

Archéologie de l'informatique

par **Frédéric RICQUEBOURG**

Thèse au format PDF

Thèse de doctorat de philosophie – étude des systèmes
sous la direction de Daniel PARROCHIA
soutenue le 6 mars 2008

Composition du jury : Daniel PARROCHIA, professeur à l'université Jean Moulin Lyon 3 Franck
TINLAND, professeur à l'université Montpellier III Gérard CHAZAL, professeur à l'université de
Bourgogne Jean SALLANTIN, directeur de recherches au CNRS

Remerciements

Cela a été un honneur pour moi de travailler sous la direction de Daniel Parrochia. Son aide et sa disponibilité, pendant toutes ces années, m'ont été extrêmement précieuses.

Je suis aussi particulièrement honoré que Franck Tinland – mon ancien Directeur de Recherche en D.E.A. - ait accepté ici de tenir le rôle d'examineur.

Enfin je remercie vivement Gérard Chazal et Jean Sallatin, les rapporteurs de cette thèse.

Pour leur gentillesse et l'assistance qu'ils n'ont jamais hésité à m'apporter tout au long de cette recherche, je remercie tout particulièrement Donald E. Knuth (Stanford University), Igor Aleksander (Imperial College of London), Jack B. Copeland (University of Canterbury), John Gustafson (Iowa State University) et Andrew Hodges (Wadham College of Oxford).

Toute notre gratitude va également aux personnels du Computer History Museum (Mountain View, Californie).

Il m'aurait été impossible de mener à terme ce travail sans l'amour et le soutien de nombreuses personnes. Je pense donc tout particulièrement ici à...

Marion, ma femme, pour son amour indéfectible, sa gentillesse, sa compréhension et son soutien inconditionnel, toutes ces années durant. Je t'aime.

Niels mon petit garçon adoré, et Elisa bien sûr.

Mes parents, sans qui rien de tout cela n'aurait été rendu possible.

Mes grands-parents Erna et Paul Esbrayat.

Henry et Joëlle.

Gio, Patrick et Rachid.

A JDR, mon ami, mon frère, désormais si loin. A Jipi et Zawoued, modernes Robinsons volontairement exilés sur leurs îles tropicales respectives, aventuriers administratifs à tout jamais coincés entre bières, rhum(s) et émeraudes...

Aux guerriers du K.C.C. et à ceux du Fudo Shin, Nacer, Nicolas, Aziza, Francis, Steph, Olivier, Bruno et Laurent. Merci de votre amitié...

INTRODUCTION

« Sur quelque étagère de quelque hexagone, raisonnait-on, il doit exister un livre qui est la clef et le résumé parfait de tous les autres : il y a un bibliothécaire qui a pris connaissance de ce livre et qui est semblable à un dieu... Comment localiser le vénérable et secret hexagone qui l'abritait ? Une méthode rétrograde fut proposée : pour localiser le livre A, on consulterait au préalable le livre B qui indiquerait la place de A ; pour localiser la livre B, on consulterait au préalable le livre C, et ainsi jusqu'à l'infini... C'est en de semblables aventures que j'ai moi-même prodigué mes forces, usé mes ans. »

Jorge Luis Borges, Fictions.

« Voudriez-vous me dire, s'il vous plaît, par où je dois m'en aller d'ici ?

- Cela dépend beaucoup de l'endroit où tu veux aller.
- Peu m'importe l'endroit.
- En ce cas, peu importe la route que tu prendras...
- ... pourvu que j'arrive quelque part », ajouta Alice en guise d'explication.

« Oh, tu ne manqueras pas d'arriver quelque part, si tu marches assez longtemps. »

Lewis Carroll. Alice au pays des merveilles.

La conférence inaugurale du *Forum on the History of Computing*, prononcée par Michael S. Mahoney¹ le 20 avril 1993 dans le cadre de la *Second History of Programming Languages Conference*² débutait par l'observation suivante : « *It should be easy to do the history of computing. After all, computing began less than 50 years ago, and we have crowds of eye witnesses, mountains of documents, storerooms of original equipment, and the computer itself to process all the information those sources generate. What's so hard ? What are we missing ?* »³. Au jour où nous écrivons, c'est-à-dire quelques huit années après que M. Mahoney ait effectué cette intervention, il apparaît clairement que les difficultés, notoires ou

¹ Michael S. Mahoney enseigne l'Histoire des Sciences à l'Université de Princeton, New Jersey, U.S.A.

² *The Second ACM SIGPLAN History of Programming Languages Conference (HOPL-II)*, 20-23 Avril 1993, Cambridge, Massachussets. Tous les articles de cette conférence ont été pré publiés dans les ACM SIGPLAN Notices, vol. 28, n°3, mars 1993. Ils ont ensuite fait l'objet d'une seconde édition : Th. J. Bergin, Jr. et Richard G. Gibson, Jr., *History of Programming Languages-II*, New York, ACM Press, 1996.

³ Th. J. Bergin, Jr. et Richard G. Gibson, Jr., *History of Programming Languages-II*, New York, ACM Press, 1996, chapitre XVI, p. 772.

moins manifestes, qu'il s'efforçait de déterminer à l'époque dans la suite de ce document et qui se dressaient selon lui comme autant de facteurs de possible adversité sur la voie de la constitution d'une histoire de l'informatique⁴ fidèle et exhaustive ne sont pas dissipées. Loin s'en faut. Pourtant, et c'est là précisément l'objet de sa remarque introductive en même temps que cela participe fondamentalement de la définition de la figure paradoxale de cette problématique épistémologique, l'informatique est une toute jeune discipline. Comme ne manque pas de le rappeler le conférencier américain, l'informatique a "débuté"⁵ il y a peine un demi-siècle (une soixantaine d'années aujourd'hui). Les témoins – acteurs directs ou indirects - de sa naissance tumultueuse, de ses métamorphoses remarquables et de son irrésistible montée en puissance dans tous les secteurs d'activité de nos sociétés⁶ sont à mille lieues de faire défaut (M. Mahoney évoque ici des « *crowds of eye witnesses* » c'est-à-dire littéralement des foules de témoins oculaires !). Nous disposons en outre de « montagnes de documents », de réserves (« *storerooms* ») de matériel original⁷, et, dernier point et non des moindres, de l'ordinateur lui-même pour venir à bout, c'est-à-dire finalement traiter d'une manière plaisamment récursive, de toute l'information que ces sources diverses et assurément florissantes sont susceptibles de générer par rapport à sa propre ligne de développement historique. Ainsi, non seulement les données attachées au domaine d'étude dont l'histoire est

⁴ Nous traduisons ici l'américain « *history of computing* » par « histoire de l'informatique », conférant ainsi à ce vocable une acception plus large, et également plus commune, que celle que lui attribua au début des années 60 le français Philippe Dreyfus qui visait initialement par ce terme forgé *ad hoc* « la science qui, à l'aide d'algorithmes, traite des données afin d'obtenir de l'information » [Ramunni, 1989, p.18]. Il est ici question, tout au moins momentanément et conformément à la perspective adoptée par M. Mahoney, de la discipline qui couvre la conception et le fonctionnement des ordinateurs et des logiciels qui leur sont associés en vue de l'accomplissement de tâches diversifiées. Cette définition peut en fait être rapprochée avec bénéfice des sens n°2 n°3 et n°4 que donne le Petit Larousse du terme « informatique » : 2° *l'informatique des systèmes* : architecture des ordinateurs et des systèmes d'exploitation, réseaux, etc. ; 3° *l'informatique technologique* : qui se rapporte aux matériels : composants électroniques, semi-conducteurs, mémoires, enregistrements sur supports magnétiques, organes périphériques d'entrée-sortie, etc. ; 4° *l'informatique méthodologique* qui a trait surtout aux logiciels : compilation, langages, etc.

⁵ Cela seulement si l'on est disposé à accepter comme prémisses essentielles à cette hypothèse le fait que c'est E.N.I.A.C. (*Electronic Numerical Integrator And Calculator*), qui constitue le foyer concret à partir duquel se déploie historiquement ce que les américains nomment le *field of automatic electronic computing systems*, c'est-à-dire le champ ou le domaine des systèmes de calcul électroniques et automatiques.

⁶ Concernant la diffusion massive de l'outil informatique dans la quasi totalité des champs du social, il conviendrait également de nous inclure, en tant que nous sommes tous, de fait, des utilisateurs avérés ou occasionnels de cette machine et de ses dérivés, dans la classe ou plutôt la foule des « *eye witnesses* » dont parle M. Mahoney. Nous sommes en effet nous-même des acteurs, ou tout du moins des témoins de l'histoire de l'informatique, et notre propre insertion, subie ou décidée, dans cette trajectoire toujours en train de s'élaborer ne saurait aucunement être considérée comme un fait trivial.

⁷ Ces ressources (conjointement matérielles et documentaires), sont localisées dans des structures majoritairement implantées aux Etats-Unis et au Royaume-Uni. Indiquons ici quelques-unes de ces institutions qui figurent parmi les plus renommées: le *Charles Babbage Institute* (Minneapolis, U.S.A.), le *Computer Museum* (Boston, Mass. et Moffett Field, Cal., U.S.A.), la *Library of Congress* (Washington D.C., U.S.A.) ou encore la *Smithsonian Institution N.A.S.M. and N.M.A.H.* (Washington D.C., U.S.A.), *The National Archive for the History of Computing – Centre for the History of Science* (Manchester, G.B.).

à bâtir sont pour la plupart aisément mobilisables, diversifiées et extrêmement abondantes, la majorité des artefacts les plus archaïques, pour ne même pas faire référence ici aux dispositifs plus récents, ont été préservés dans le cadre d'initiatives conduites par des collectionneurs privés, des institutions publiques ou corporatives⁸, mais les protagonistes de cette épopée techno-scientifique inouïe - et parmi ceux-là les figures les plus fondamentales et les plus emblématiques de la discipline - ont laissé derrière eux une littérature technique (occasionnellement de type monographique), scientifique, historiographique (et parfois même autobiographique⁹) de première main tout à fait extraordinaire tant elle peut être qualifiée à la fois d'étonnamment luxuriante¹⁰ et de richement documentée. Le philosophe qui souhaite donc s'approprier cet objet inouï qu'est l'ordinateur afin de tenter d'en dire non seulement le procès et les principes fondateurs, mais aussi d'en déceler les enjeux passés, présents ou à venir, s'inscrit alors dans un lieu formidablement composite où la multiplicité des marques plus ou moins saillantes qui lui sont effectivement offertes pour nourrir son investigation finit par menacer de venir brouiller, ou tout du moins dérouter, son discours. On s'étonnera peut-être même de l'ambition et de l'étrangeté mêlées d'un pareil projet intellectuel. De quel droit après tout le philosophe peut-il prétendre à arraisonner, pour user ici de deux termes bien chers à M. Heidegger, l'espace informatique en vue de le méditer ? Au nom de quoi la philosophie, domaine subtil et sublime de la magnificence des mots et royaume des idées séparées de la pesanteur du réel viendrait-elle soudainement s'immiscer dans le tissu apparemment si tangible du domaine informatique ? Le célèbre philosophe de Rembrandt a-t-il ainsi à ce point épuisé les richesses dédaléennes du transcendant, de l'immatérialité ou de l'Être pour vouloir quitter aujourd'hui sa paisible résidence et s'aventurer de la sorte dans une sphère où règnent sans partage la positivité, la matérialité ? Une semblable tentative d'intrusion ne risque-t-elle pas en fait de l'amener à se heurter avec violence à la réalité de choses étrangères qu'il a trop longuement ignorées ou délaissées ? Ne vaut-il pas mieux alors pour lui qu'il demeure silencieusement assis à sa petite table de méditation, relié au monde par la seule entremise d'une fenêtre ouverte et surtout oublié d'un des phénomènes les plus

⁸ Ainsi, des entreprises telles que *AT&T*, *Apple Computer*, *Digital Equipment Corporation*, *Hewlett Packard Corporation*, *I.B.M. Corporation*, *Texas Instrument*, pour ne citer qu'elles, se sont dotées de programmes de recherche historique bien établis, lesquels sont fréquemment accompagnés d'opérations muséales permanentes et destinées au grand public. Ces expositions font parfois l'objet d'une mise en ligne sur Internet et peuvent donc être consultées *online*.

⁹ C'est le cas par exemple de Thomas Watson Jr. (*Father, Son & Co : My Life at IBM and Beyond*, New York, Bantam Books, 1990) ou encore de Maurice Wilkes (*Memoirs of a Computer Pionnee*, Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1985).

¹⁰ Précisons que la littérature effectivement consacrée à l'histoire de l'informatique (couvrant soit le matériel, soit le logiciel, soit les deux simultanément), représente toutefois la portion congrue de cet ensemble tout à fait considérable de données.

saisissants et les plus déroutants de sa propre contemporanéité technique ? Après tout l'informaticien se mêle-t-il de philosophie ? Très peu, vraisemblablement. Pourquoi donc le philosophe, en retour, s'embarrasserait-il d'informatique ? Nous pouvons ainsi nous interroger sur la manière dont nous nous trouverons en mesure de rendre compte de cette prétention philosophique pour le moins inhabituelle. S'agira-t-il seulement d'entreprendre dans la hâte ce cheminement de pensée au nom du constat d'urgence que nous impose aujourd'hui la conscience des écrasantes mutations sociales qu'a progressivement commandées l'informatique dans le processus toujours bien actuel de son prodigieux essor invasif ? Si cela se produit effectivement, et même s'il parvient au final à quelques résultats tout à fait dignes d'intérêt, le penseur risque de se voir crédité à tort ou à raison d'une certaine forme d'attentisme, symptomatique d'une façon ou d'une autre du caractère quelque peu tardif de sa réaction. Faudra-t-il encore s'intéresser à l'informatique en procédant seulement à la convocation de ses aspects les plus immédiatement remarquables, ou bien ceux, parfois les mêmes, que la philosophie jugera à l'aune de ses propres valeurs comme les plus provocateurs ou les plus inacceptables ? Une fois encore l'intelligence artificielle devra-t-elle subir le courroux d'une pensée philosophique outrée par son matérialisme arrogant et son insupportable réductionnisme, tourmentée dans sa chair par la perspective de voir le dernier bastion de la spécificité humaine, déjà solidement éprouvée par Copernic, Darwin et Freud, céder sous les coups de boutoir pourtant encore bien peu précis de cette discipline à peine cinquantenaire ? Suffira-t-il, pour prétendre à comprendre véritablement ce qu'est *fondamentalement* l'informatique et les raisons profondes de son emprise accélérée sur le monde, d'en dénoncer avec virulence et indignation les dérives orwelliennes réelles ("numérisation" de l'humain, localisation facilitée et manipulation souvent insidieuse des individus, standardisation graduelle des modes de vie, raréfaction du travail) ? De pointer avec défiance ou alarmisme l'utilisation massive et systématisée qu'en font aujourd'hui les grandes firmes biotechnologiques¹¹ pour procéder au séquençage du génome humain ? Faut-il réellement porter aussi haut le funeste étendard du cauchemar huxleyien ? Procéder à

¹¹ *Celera Genomics*, la firme informatique *Compaq* et l'U.S. *Sandia Labs* (laboratoire du département de l'énergie américaine) se sont ainsi associés pour construire un système informatique entièrement dédié au séquençage du génome humain. Doté d'une puissance de 10^{14} instructions par seconde (ips), il sera normalement opérationnel en 2004. Parallèlement, *I.B.M.* a annoncé la construction de *Blue Gene*, ordinateur destiné au même type de tâche et qui devrait atteindre 10^{15} ips. Rappelons, sans toutefois nous hasarder à en tirer des conclusions qui seraient de toute façon dangereuses et infondées, que certaines estimations de la puissance de calcul du cerveau humain sont de cet ordre. Pour Hans Moravec, le cerveau humain est équivalent à un ordinateur d'une puissance de 10^{14} ips. Nick Bostrom (université de Yale), l'estime à 10^{17} ips. Ray Kurzweil parvient à un nombre de 2×10^{16} ips. La fourchette, extrêmement large, habituellement avancée pour définir cette puissance oscille en fait entre 10^{13} et 10^{19} ips. *Blue Gene* et l'ordinateur de *Compaq* s'inscrivent donc dans cet écart.

l'exhumation d'un fantasme luddite que nous serons condamnés alors à revisiter¹² ? Devons-nous donc finalement comprendre à partir de cela que l'ordinateur peut en raison dernière être légitimement réduit à une formidable machine automatique dont toutes les ressources seraient intégralement et continûment mobilisées par ceux qui en ont la maîtrise véritable en vue du contrôle absolu de l'espace humain et de l'Humain lui-même ? L'ordinateur comme avatar ultime, généralisé, transparent et *u-topique* celui-là, du *Panopticon* benthamien étudié ailleurs¹³ par M. Foucault ? Oui, peut-être, mais assurément pas seulement ! Si chacun demeure souverain quant à sa capacité de reconnaître, dans la tempérance, l'exagération et, pourquoi pas, la dénégation, la dangerosité réelle ou projetée de l'informatisation grandissante et continue de la société, nous ne croyons néanmoins pas que ces accès particuliers qui ouvrent tous sur la sphère informatique contemporaine, aussi saisissants et impérieux qu'ils puissent nous apparaître, nous autorisent à en révéler la complexité originaire et les idiosyncrasies constitutives. Il y a là certes, et pour détourner à peine le titre d'un ouvrage célèbre, matière à penser¹⁴. Toutes ces conséquences sociales et technologiques colossales, quelquefois dérangeantes, voire même inquiétantes, qu'induit dans son sillage l'irrépressible « météore » informatique doivent impérativement faire l'objet d'une saisie intellectuelle. Nul doute que le philosophe trouvera assurément une place centrale dans cette entreprise déjà en progrès¹⁵. Mais la démarche aux légitimes ambitions transformatrices qui vaudra sûrement dans l'espace éthique et juridique, à titre préventif ou correctif, ne pourra être transposée telle quelle lors même qu'il sera question d'appréhender l'informatique et son histoire. S'il s'assignait la tâche de penser la complexité de ce procès en vue d'en corriger ou d'en empêcher au final l'écoulement irrésistible que nous sommes tous à même de constater, le philosophe ne ferait rien d'autre que céder à la tentation d'exercer un pouvoir qu'il ne possède pas. Il ne saurait cependant en aller ainsi s'il consent d'emblée à se dessaisir de l'ambition, totalement illusoire, qui consiste à vouloir s'emparer du complexe informatique dans son ensemble en vue de tenter, au nom de conquêtes métaphysiques ou éthiques parfois très anciennes, d'en mener le cours, d'en infléchir les tendances ou d'en réguler le déroulement. Affirmons-le sans plus attendre, notre réflexion sera de part en part habitée et travaillée par

¹² Comme peut en témoigner l'énorme succès populaire qu'ont rencontré des films tels que *Blade Runner*, *Ghost in the Shell*, *Terminator 1* et *2* ou *Matrix*.

¹³ Foucault, M., *Surveiller et punir, naissance de la prison*, Paris, N.R.F., Ed. Gallimard, 1975, pp. 197-229.

¹⁴ Changeux, J.-P., Connes, A., *Matière à pensée*, Coll. « Points », n° OJ22, Paris, Odile Jacob, 1992.

¹⁵ Les *nerds* et autres *hackers* qui « sévissaient » en Californie ou au *M.I.T.* dans les années 70 avaient déjà pris la pleine mesure de ces dangers, allant même jusqu'à initier un mouvement contre-culturel encourageant la libre circulation de l'information, la décentralisation et la défiance systématique vis-à-vis de l'autorité fédérale et gouvernementale. Ce mouvement existe toujours, multipliant ses actions parfois dévastatrices sur Internet.

une véritable intention de participation, d'engagement synergique, et non pas par une volonté où une visée à la fois dominatrice et normalisatrice serait à l'œuvre. Elle s'attachera au repérage, au recueil et à l'intelligence des principes et du sens enfoui, techniques et philosophiques, de cette lame de fond en les accompagnant dans leur déploiement. Elle n'aura nullement vocation à polariser celle-ci dans le temps où elle parviendra à saisir ceux-là. Pour le dire autrement, si notre dessein doit bel et bien consister en une tentative d'éclaircissement des fondements originels et une volonté affirmée de parcourir les multiples lignes de croissance de cette trajectoire technique, son objectif dernier ne saurait ambitionner d'en assurer une quelconque domination ou maîtrise. Nous n'avons jamais caressé cette prétention. Comprenons bien que nous ne souhaitons pas ici amener la philosophie et l'informatique à se rencontrer d'une façon qui serait d'emblée affectée et conduite par un antagonisme disciplinaire – en supposant que l'informatique soit une discipline à part entière et non seulement une méthode transdisciplinaire - à la fois préjugé et indépassable. Notre effort sera donc plutôt celui qui visera à une compénétration, à un dialogue fécond entre ces deux domaines en apparence si hétérogènes.

Il sera ici question, fondamentalement, des ordinateurs et de leur histoire, c'est-à-dire finalement d'une épistémologie de l'informatique et de ses artefacts. Pareille tentative d'appropriation philosophique de cette lignée technique et de ses pratiques ne saurait cependant être uniquement entreprise elle-même pour elle-même, c'est-à-dire à la manière d'une « glose » qui viserait exclusivement le détail des spécificités matérielles des achèvements successifs de l'informatique et qui, de la sorte, se suffirait complètement. La technique, et par voie de conséquence l'objet technique, n'est pas chose neutre. Sa pleine compréhension ne passe pas, en tout cas ne passe pas exclusivement, par l'établissement d'une somme de ses accomplissements heureux et malheureux, fut-elle, quand bien même cela serait possible, complètement achevée. En quadrillant si parfaitement l'espace social dans lequel elle se déploie silencieusement et impérieusement, en se coulant dans ses interstices les plus infimes, les plus intimes, ceux-là même qui signent l'ouverture des sphères réservées de l'individuel et l'interindividuel, la technique altère radicalement la structure et les innombrables jeux articulatoires qui définissent le tissu complexe du monde dans lequel l'Homme doit vivre avec ses semblables. Étrangement, ces transformations massives et profondes qu'induit le complexe technique au cœur de nos sociétés et sur ses composantes individuelles échappent très fréquemment, au moins pour un temps, au regard de ceux-là même, c'est-à-dire la totalité d'entre nous, qui en font si régulièrement usage. Tout se passe

en vérité comme si l'objet technique, quel qu'il soit et malgré sa présence et sa tangibilité de plus en plus envahissantes, exigeait de la part de celui qui cherche à le saisir adéquatement un effort visant d'abord à le desserrer de la gangue masquante, en fait l'espace même de notre existence quotidienne, où il trouve son lieu propre de fonctionnement. Au sein de la communauté humaine qu'il irrigue et bouleverse en permanence, il demeure disponible, à la fois omniprésent et curieusement en retrait. Là, il se tait en s'exposant avec ostentation, il se dissimule dans la visibilité en offrant presque toujours son efficacité attendue à la foule des utilisateurs qui en manipule les effecteurs terminaux tout en ignorant souvent la complexité, la réticularité imbriquée, qui gît sourdement derrière. Au final, c'est dans le dysfonctionnement – et peut être aussi dans une sorte de discours apologétique qui emprunterait conjointement au publicitaire et au technologique pour exalter les vertus de la *nouveauté technique* immédiatement offerte à la consommation - que la technique se manifeste le plus sûrement. Ses moments de véritable manquement, ses « pannes », ses « ratés », ses « défaillances », ses « imprévus », pour reprendre les mots de Jean-Pierre Sérís¹⁶, sont autant de révélateurs, plus ou moins ponctuels, plus ou moins brefs, plus ou moins catastrophiques aussi, de sa très discrète ubiquité. C'est lorsqu'elle se donne à nous sous la modalité du pathologique, du négatif, que nous sommes réellement à même de percevoir pleinement sa prodigieuse dimension et de mesurer la dépendance écrasante dans laquelle nous nous trouvons à son endroit. Mais sitôt les choses remises en place, sitôt la déficience gommée, réparée, la technique se replie à nouveau sur elle-même dans un silence à peine troublé par les interventions diversifiées des membres autorisés de son moderne clergé, les techniciens, les spécialistes et autres technologues. L'ordre technique, l'objet technique, se trouvent ainsi pris dans un étrange régime d'oscillations irrégulières, entre reflux muet et persistant et, parfois, surgissement brusque et intempestif. Si cette rythmique à deux temps possède une qualité aussi certaine qu'occasionnelle, celle de rendre absolument impératives, au moins pour un temps donné, la prise de conscience et la formulation des problématiques éthiques et politiques que pose le plus urgemment la technique au sein de la sphère sociale, elle n'en autorise néanmoins pas immédiatement une intelligence profonde. L'approche archéologique, délaissant ainsi l'omniprésente informatique actuelle et ses irisations parfois sinistres pour s'installer dans le vestigiel et l'oublié nous conduira à son commencement puis au cœur de la fibre parfois irrégulière de son mouvement invasif. Plus encore, ce sont les primitives logiques, mathématiques, mécaniques et philosophiques de l'informatique actuelle, trop souvent

¹⁶ Sérís, J.-P., *La Technique*, Paris, P.U.F., 1994, p.12.

manquées puisque anciennes et littéralement éclipsées par la fascination qu'occasionne l'artéfact prodigieux qu'elles ont finalement engendré qu'elle nous permettra effectivement de placer en lumière pour les comprendre pleinement. Contrairement à certaines idées populaires trop facilement reçues, l'informatique n'est pas issue d'un improbable phénomène de génération spontanée qui aurait trouvé dans la furie du brasier planétaire des années quarante des faisceaux conjoncturels extraordinairement propices à la fois à sa survenue et à la pérennisation de sa proliférante engeance. Ainsi, la seconde guerre mondiale ne saurait légitimement se voir confondue avec le moment originel de l'informatique. S'il convient de lui reconnaître un rôle indéniablement prépondérant en amont de ce processus, c'est celui d'un haut fourneau dans le ventre duquel sont venus fusionner, avec une célérité incroyable et sous la pression ahurissante d'un environnement conflictuel inédit, tout un spectre de concepts, d'idées, et de réalisations techniques diversifiés qui demeuraient disponibles et plus ou moins éclatés dans l'espace humain depuis fort longtemps. La venue au monde est certes un moment suprême, délicat et unique. La gésine, et surtout le travail fascinant qui lui succède, ne manquent jamais de capter toutes les attentions. A tel point d'ailleurs qu'ils finissent bien souvent par occulter, en raison de leur intensité et de leur caractère extrêmement brutal, le lent et complexe processus de gestation sans lequel ils n'auraient jamais pu avoir lieu... Comme ne manque pas de le rappeler avec à-propos G. Chazal¹⁷, le moment de l'élaboration concrète de l'artéfact informatique peut être situé dans le temps, de la même manière que les traditions techniques et scientifiques qui l'ont permise en convergeant peuvent être identifiées avec précision. La fin de la deuxième guerre mondiale voit ainsi l'avènement du Golem calculatoire. Mais dans le temps où s'est opérée cette genèse, la vieille figure pragoise de Rabbi Loew s'est depuis longtemps effacée au profit de celles, plus prosaïques mais tout aussi captivantes, des mathématiciens, des logiciens, des cryptanalystes, des cryptographes et des ingénieurs qui ont enfanté ce serviteur d'un genre nouveau. Le métal et l'électricité ont alors remplacé l'argile précieusement choisie. Les « *tentatives de mécanisation du calcul... l'invention et le développement des mémoires artificielles... le développement des théories formelles de Turing, de Church ou de Skolem*¹⁸ » ont été substitués, en amont de l'acte créateur, aux rituels obscurs et aux terribles formules occultes de la Kabbale. Le nom divin, autrefois inscrit sur la bouche ou le front de cette créature mythologique et qui lui conférait sa puissance magique a cédé sa place à un code opératoire et

¹⁷ Chazal, G., *Le Miroir Automate: Introduction à une Philosophie de l'Informatique*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 1995, p.7.

¹⁸ Chazal, G., *op.cit.*, p.7.

transparent - décimal, hexadécimal ou binaire - qui trouve désormais son lieu propre au cœur même d'une machine automatique presque entièrement fermée aux regards. Plus encore, le pouvoir merveilleux et terrifiant de cette épigraphe ésotérique donatrice du souffle primordial, en se perdant dans l'opacité de la machine universelle électronique et en se retrouvant dans l'efficacité formidable du code logico-mathématique qui l'alimente a fait de l'Homme l'héritier de la toute-puissance des Dieux disparus. S'il nous est permis, métaphoriquement, de découvrir à l'ordinateur une figure tutélaire d'ordre divin, alors nous dirons sans hésitation qu'il a vu le jour et grandi sous les auspices constants et bienveillants d'Arès. C'est en effet la deuxième guerre mondiale qui servira de catalyseur essentiel à la construction de cette machine qui sera destinée, dans un premier temps et sous ses formes électromécanique et électronique¹⁹ élémentaires, aux travaux de cryptanalyse menés à Bletchley Park (G.B.) et au calcul des tables de tir balistique dans les installations de l'*Aberdeen Ballistic Research Laboratory*²⁰ (U.S.A.). Plus tard elle permettra d'accélérer le développement de la bombe à hydrogène américaine²¹ et sera intensivement utilisée lors de la mise au point du programme de missiles tactiques et intercontinentaux de ce pays. L'Homme du milieu du 20^{ème} siècle, moderne Prométhée infailliblement secondé par l'aveugle puissance de calcul que lui offre l'ordinateur électronique accède ainsi à la maîtrise du feu atomique et se voit doté, dans le même temps, des moyens de projeter ces vecteurs de destruction massive avec une précision sans précédent. Lorsque les regards Américains et Soviétiques²², anxieusement suspendus les uns aux autres en raison de la guerre froide, se tourneront vers les profondeurs de l'espace, l'ordinateur, plus que jamais, accompagnera la démesure de l'entreprise dans le secret des salles stériles. Remarquons que l'informatique ne quittera jamais le prolix incubateur militaire qui permit son essor et garantit, avec force moyens financiers, ses mutations les plus

¹⁹ Les Bombes utilisées par le *Government Code & Cypher School* à Bletchley Park pour casser le chiffre allemand Enigma étaient des dispositifs électromécaniques. Les Colossus, introduits à Bletchley Park en février 1944, étaient des systèmes électroniques destinés à briser le code allemand Fish.

²⁰ Le B.R.L. utilisa conjointement ou successivement des machines telles que l'*I.B.M. Aberdeen Relay Calculator* (ou P.S.R.C.), l'E.N.I.A.C., l'E.D.V.A.C., l'O.R.D.V.A.C. et l'*I.B.M. Card Programmed Calculator*. Avant la guerre, les tables de tir étaient calculées avec un calculateur de bureau mû par électricité (il fallait à peu près vingt heures de travail à une personne entraînée pour produire une seule trajectoire à l'aide d'un *electrically driven desktop calculator*). Le B.R.L. disposait à la même époque d'un analyseur différentiel électromécanique du type de celui qui avait été construit à la *Moore School of Engineering*. Vingt minutes de temps machine étaient alors requises pour fournir une trajectoire. Mais la configuration de cette machine était longue et délicate. De plus elle souffrait d'un manque de précision notoire et nécessitait une attention permanente en raison de sa propension à se dérégler lorsqu'elle fonctionnait (on parlait de *backlash problem*, ou du problème du choc en retour, et du *slippage problem*, ou problème de glissement, de dérapage).

²¹ L'E.N.I.A.C. et l'*I.B.M. 701*, partiellement dérivé du design de l'*I.A.S. Machine* de J. von Neumann, furent tour à tour installés au *Nuclear Weapons Laboratory* de Los Alamos (Nouveau Mexique).

²² En 1946, les Soviétiques cherchèrent à commander un E.N.I.A.C. à l'Université de Pennsylvanie. Leur demande fut bien entendu rejetée. Remarquons cependant qu'à cette date le « First Draft of a Report on the EDVAC » de J. von Neumann avait déjà fait l'objet d'une diffusion assez large...

remarquables, mais qu'elle finira assez rapidement par le déborder. Certains, parmi lesquels J.P. Eckert et J. Mauchly, géniaux créateurs d'E.N.I.A.C., percevront très tôt son énorme potentiel économique et stimuleront sa pénétration dans le secteur marchand. *I.B.M.* et les autres constructeurs de calculateurs électroniques de l'époque ne mettront que peu de temps à apercevoir la brèche extrêmement prometteuse ouverte par *Eckert-Mauchly Computing Corporation* et à s'y engouffrer, mais jamais ils ne mettront fin à leur collaboration avec l'armée. La révolution technologique que constituera l'invention et la diffusion des matériaux semi-conducteurs (*Solid State Technology*), la mise en réseau des machines, elle aussi précocement initiée par les militaires²³, amplifieront plus encore cette déferlante jusqu'à permettre finalement l'arrivée massive de l'ordinateur dans les foyers par le biais de la micro-informatique désormais interconnectée. Cette irruption ininterrompue, cette incessante montée en puissance de l'ordinateur dans tous les secteurs de la société n'a eu de cesse de se poursuivre jusqu'à aujourd'hui²⁴. Gageons que ce phénomène est encore loin d'avoir atteint sa vitesse de croisière, et, encore moins, son point d'apogée. La *Galaxie Gutenberg* aura mis plus de cinq siècles et demi à revêtir la forme que nous lui connaissons, façonnant si profondément et si irrémédiablement la texture intime de notre monde au gré des bouleversements notoires qui scandèrent sa longue évolution. *L'Univers Informatique*, celui dont A.M. Turing et de J. von Neumann formalisèrent si magistralement les fondamentaux théoriques, vient à peine d'achever son *Big Bang*. Nul ne saurait affirmer sérieusement aujourd'hui qu'il n'est pas entré dans une phase d'expansion dont on ne peut conjecturer ni la durée, ni la portée, ni la multiplicité et la profondeur des conséquences qu'elle aura cependant à n'en point douter sur l'intégralité de l'espace humain. Parallèlement, et pour la première fois de son histoire, l'Homme se trouvera bientôt en mesure de se dispenser totalement du recours à la matrice utérine pour donner vie à son semblable (en tout cas en puissance et sauf interdit éthico-juridique véritablement dissuasif). Au delà de la maîtrise même de ce processus naturel et principiel, le génie génétique autorisera sans doute à terme, et par des voies biochimiques inédites, le contrôle génotypique de l'individu, c'est-à-dire finalement le paramétrage littéral des spécificités phénotypiques et le clonage de celui-ci. Le fils prodigue de l'Evolution, l'*homo faber*, par l'entremise d'une technologie toujours plus sophistiquée et efficiente, aura su décrypter et utiliser en les canalisant et en les accélérant d'une manière prodigieuse les

²³ Nous pensons ici aux réseaux S.A.G.E. (*Semi Automatic Ground Environment*), sur lequel les chercheurs américains travaillèrent dès 1952, et au réseau A.R.P.A.N.E.T. (*Advanced Research Project Agency Network*) qui date lui des années 70.

²⁴ Cent millions d'ordinateurs de bureau, principalement des P.C., des machines *Apple Computer* ou des *workstations* (de marque *Compaq*, *Silicon Graphics Industries*, *Sun Microsystems* ...), ont été vendus en l'an 2000. Le seul nombre des P.C. actuellement en service dans le monde est estimé à quelques 500 millions !

moyens élaborés le long des voies tourmentées et hasardeuses que ce processus aveugle emprunta des éons durant pour « parvenir » jusqu'à lui. Si l'Homme a été sans conteste le maître d'œuvre absolu de la fondation de son imminente emprise sur son propre matériel génétique, l'ordinateur en a quant à lui été l'infatigable et puissante cheville ouvrière. Est-ce là quelque chose de si étonnant ? Ne parle-t-on pas ici aussi du *décryptage* d'un *code*, du séquençage et du *traitement* de l'*information* génétique ? Par un phénomène de *feedback* remarquable, la compréhension et le contrôle de la structure et du fonctionnement du vivant dans ce qu'il a de plus intime et de plus élémentaire éclaire et oriente à son tour la sphère informatique dans ses développements les plus élaborés. Ceci n'a certes rien de véritablement nouveau comme en témoignent certains des travaux fondateurs que nous devons, en autres, à Warren S. McCulloch et Walter Pitts, à Alan M. Turing ou à John von Neumann²⁵. Mais, alors que dans les années cinquante cette collusion ne faisait que tracer en pointillés certaines des voies de développement fondamentales²⁶ que devait emprunter une recherche en informatique encore balbutiante, le biologique, dans ce qu'il a à la fois de plus élémentaire et de plus extraordinaire, c'est-à-dire le cellulaire cérébral et l'acide désoxyribonucléique, vient aujourd'hui traverser l'informatique pour en nourrir la technique fondamentale. On parle ainsi aujourd'hui très sérieusement de *D.N.A. Computing Technology*²⁷ et d'ordinateurs neuronaux tandis que des neurones bien réels ont déjà été employés pour construire des circuits correspondant à certaines opérations logiques élémentaires. Etrange ironie, curieux renversement encore à venir. Alors que l'intelligence artificielle, dont l'objectif avoué était de « ... faire exécuter par l'ordinateur des tâches pour lesquelles l'homme, dans un contexte donné, est aujourd'hui meilleur que la machine²⁸ », n'a pas tenu les promesses exorbitantes que certains de ses pères fondateurs avaient formulées en leur temps, voici que l'élément le plus simple du cerveau, le neurone, se voit maintenant convoqué au cœur même de la machine

²⁵ Citons par exemple W. McCulloch et W. Pitts, *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*, Bulletin of Mathematical Biophysics, Oxford, Elsevier Science, 1943,5, 155-133; A. M. Turing, « Computing Machinery and Intelligence », *Mind*, Vol. LIX, n°236, 1950; ou encore J. von Neumann, *The Computer and the Brain*, New Haven, Yale University Press, 1958.

²⁶ Nous songeons ici principalement à l'intelligence artificielle, à l'informatique connexionniste et à l'informatique neuronale.

²⁷ Ou technique de calcul fondée sur l'utilisation de l'A.D.N. Leonard Adleman, mathématicien à la *Southern California University*, est le pionnier de ce nouveau genre de calcul. Il a notamment utilisé l'acide désoxyribonucléique pour tenter de résoudre un problème bien connu de ceux qui s'intéressent à la théorie des graphes et à l'intelligence artificielle : celui du voyageur de commerce. A ce sujet, cf. Kurzweil, R., *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence*, New York, Penguin Book, 1999, pp. 107-108.

²⁸ Tout au moins selon la définition qu'en donnent J.-M. Alliot et T. Schiex à la page 36 de *Intelligence Artificielle et Informatique Théorique*, Toulouse, Cepaduès Editions, 1993. Comme il existe de nombreuses approches dans le domaine de l'intelligence artificielle (strong *A.I.*, weak *A.I.*, approche cognitive, approche pragmatiste, approche connexionniste...), il en existe de nombreuses définitions qui, si elles partagent bon nombre d'éléments, ne sont néanmoins pas superposables les unes aux autres.

pour venir en assurer les fonctions calculatoires les plus fondamentales. Alors, reprenant à notre propre compte les interrogations que formule Michael S. Mahoney à la fin du court passage que nous avons extrait de sa conférence, nous posons à notre tour ces questions, « *What's so hard ? What are we missing ?*²⁹ », dès lors qu'il est question de l'informatique et de l'étude de son histoire.

Surprenante situation en vérité que celle dans laquelle se découvre l'épistémologue lorsqu'il entreprend d'interroger ce que l'on a déjà nommé ailleurs le phénomène informatique³⁰ en vue d'en reconstruire ou d'en retracer non pas l'Histoire, mais, plus humblement et par la force des choses aussi, *une* histoire. Vouloir œuvrer dans ce domaine, vouloir procéder à la cartographie circonstanciée de ce milieu, c'est en effet se retrouver d'emblée positionné dans un registre caractérisé précisément par une bien étrange bipolarité : d'un côté en effet, l'on est confronté à une réelle profusion de matériaux extrêmement diversifiés, tous susceptibles à un titre ou à un autre d'être légitimement soumis à l'investigation scientifique et de se voir intégrés comme tels dans l'étude dont l'élaboration est à faire. Nous voici alors placés en quelque sorte aux antipodes de la situation dans laquelle peuvent se trouver pris, dans une certaine mesure, le paléographe, le paléontologue ou bien encore, pour reprendre la belle expression d'André Brahic, « l'archéologue du ciel³¹ ». Sorte de contraste saisissant entre une rareté fréquemment extrême du matériau nourricier déterminant de façon impérative l'économie expérimentale et théorique de ces disciplines et la prodigalité excessive du gisement dans lequel peut puiser sans vraiment craindre de l'épuiser l'archéologue de l'informatique. Ecart prodigieux aussi entre la vastitude des régions spatiales et temporelles que ces sciences de tous les lointains parcourent pour arracher leurs objets exceptionnels, dispersés et engloutis par la terre ou le vide sidéral, et la très brève séquence constituée par les quelques décennies communément consacrées où vient se condenser la kyrielle de données à laquelle nous faisons référence plus haut. Dans cette conjoncture apparemment avantageuse, profitable, la tâche de l'archéologue se trouve en réalité compliquée, voire même menacée, par l'étendue considérable et le caractère réellement inextricable de cette surabondance d'informations dont une très grande partie est pourtant si commodément accessible³². Le risque d'indécision, celui de la décision aussi, la confusion,

²⁹ Littéralement : « Qu'est-ce qui est si difficile ? Que ratons-nous ? ».

³⁰ Chazal, G., *Le Miroir Automate: Introduction à une Philosophie de l'Informatique*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 1995, p.7.

³¹ In Yves Michaux et Al., *Qu'est-ce que l'Univers, Université de tous les savoirs*, vol. 4, « Enfants du Soleil ? Histoire de nos origines. » par André Brahic, 189^{ème} conférence, Paris, Odile Jacob, février 2001, p. 298.

³² Nous précisons ici que cette affirmation peut être considérée comme tout à fait recevable tant qu'il s'agit strictement du *hardware*. Dès lors que nous évoquons le *software*, elle ne saurait être maintenue. En effet, dès le

l'étouffement, le débordement liés au surgissement de la multitude enchevêtrée au cœur de l'espace discursif pèsent ainsi de tout leur poids sur le projet scientifique, menaçant de violer à la fois la précision et la rectitude qui en assurent la solidité et la stabilité. S'il s'agissait encore et seulement de trier, de classer, de sélectionner, de répertorier, d'agencer, bref d'organiser ou d'*in-former*, au sens aristotélicien, le foisonnement et la voluminosité des données brutes disponibles selon des lignes d'ordonnement éprouvées et assurées – ordre linéaire chronologique par exemple - en vue de conférer à cet ensemble une structure susceptible d'être exploitée avec tout le bénéfice scientifique que l'on est en droit d'attendre d'une pareille démarche, la tâche serait sans nul doute immense, certes, mais néanmoins envisageable. Ce minutieux processus de recueil, d'émondement et de distribution élémentaires serait plus concevable encore si l'on n'omet pas de prendre en ligne de compte le fait que l'artefact informatique et sa stupéfiante puissance de traitement, comme nous le notions plus haut, pourraient être convoqués à volonté pour le mener à terme. Or, à notre sens, les choses, lorsqu'il est question de l'informatique et de son histoire, ne sauraient supporter de faire l'objet d'une saisie investigatrice opérée par le truchement d'une méthodologie aussi frontale et simplificatrice – laquelle malgré tout possède ses propres vertus - s'il l'on entend préserver dans leur plénitude et leur originalité propres les traits véritablement distinctifs du déploiement de cette florissante lignée technologique. Avouons à ce point, et là nous nous décalons pour désormais nous installer dans l'influence directe du second pôle du registre dont nous parlions plus haut afin de tenter d'en apprécier la composante paradoxale, que nous avons eu beau jeu de recourir peut-être un peu abusivement aux champs lexicaux du buissonnant, du multiple et de l'envahissant pour procéder à l'état des lieux de notre domaine de recherche puisque, en dépit de tout ce que nous nous sommes efforcés d'avancer brièvement jusqu'ici, nous n'avancions pas en territoire inviolé. C'est en fait très loin d'être le cas. L'examen liminaire, critique et détaillé, d'une méthodologie très répandue, en l'occurrence celle qui est fondée sur la notion de "générations" d'ordinateurs, nous permettra de prendre la mesure du travail déjà accompli. En même temps, et surtout, la mise en lumière des incohérences et des insuffisances radicales caractéristiques de cette entrée qui ne saurait être ignorée nous servira à définir la méthode qui sera la nôtre, et que nous voulons exempte de pareilles imperfections, pour pénétrer et comprendre ce champ.

début des années 80, l'*U.S. Patent Office* a découvert qu'une très grande partie de ce que les praticiens américains désignent sous l'appellation d'*Art of Programming*, à l'instar d'ailleurs du *software* conçu durant les années 50, n'était que très peu ou pas du tout documenté. A cela vient s'ajouter le fait que la plupart des calculateurs automatiques auxquels ces logiciels étaient destinés alors ont été déclassés et donnés, ou bien vendus, parfois incomplets, à des institutions qui les exhibent lors d'expositions. Si dans ces circonstances ils demeurent visibles à tous, ils ont été, bien évidemment, depuis longtemps désactivés.

Définition et critique de la notion de "génération" d'ordinateurs : confusions et déficits fondamentaux d'une approche historique de l'informatique.

Bon nombre d'explorateurs, dont certains praticiens de grand renom, ont foulé avant nous le sol encombré de cette « contrée informatique » immense et ont défini en nous précédant de la sorte des itinéraires plus ou moins larges, des sentes plus ou moins praticables, lesquels constituent autant de pistes offertes, autant de balises possibles, pour quiconque souhaite s'aventurer dans cet espace intriqué en économisant conjointement son souffle et ses pas. Alors certes l'orientation et la mobilité dans ce domaine de recherche se trouvent grandement facilitées par la préexistence de ces parcours, par la pré-définition de grandes structures et de secteurs aisément repérables ainsi que par le marquage rassurant que lui impriment certaines lignes de forces persistantes qui le découpent en le sillonnant. Mais, bien entendu, toute médaille, et celle dont nous nous préoccupons est de taille, possède son revers : la plupart des travaux qui aspirent à retracer l'histoire de l'informatique procèdent finalement d'une matrice partagée qui admet nombre de degrés possibles de variabilité. Ce schème récurrent, pour en illustrer ici rapidement le principe général d'opération, consiste initialement en une collecte de l'information, laquelle est fréquemment réalisée par une volonté dont la faculté sélective est déjà à l'œuvre, consciemment ou non d'ailleurs. Ce recueil ou amassement accompli, l'allègement se poursuit. L'adventice, ou ce qui est jugé tel, est écarté, émondé. On s'efforce, en reprenant l'expression imagée de François Dagognet, « d'extraire l'or du sable³³ » et, ce faisant, on abandonne souvent trop vite dans ce processus de criblage mené parfois au moyen d'un tamis à la maille bien lâche, quelques belles pépites sur la berge. Ce qui est maintenu, saisi, et pour ainsi dire sélectivement confisqué à la matière disponible, fait alors fréquemment l'objet d'une distribution chronologique ou géographico-chronologique simplifiée et se voit ordonnancé conformément aux impératifs formels de cadres organisateurs divers déjà bien ancrés et par conséquent largement acceptés. Ainsi en est-il par exemple de cette singulière modalité d'accès à l'histoire de l'informatique, maintes fois usitée³⁴, que Jérôme Ramunni désigne – et dénonce du même coup - avec grande justesse

³³ Dagognet, F., *Mémoire pour l'avenir, vers une méthodologie de l'informatique*, Paris, Vrin, 1979, p. 42.

³⁴ Paul E. Cerruzi (*A History of Modern Computing*, Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1998) a lui aussi parfois recours à la notion de génération d'ordinateurs, mais lorsqu'il fait cela (par exemple au chapitre I de cet ouvrage, page 44, il parle de "*first generation*"), M. Cerruzi ne manque pas d'employer les guillemets.

comme « le mythe publicitaire des générations d'ordinateurs³⁵ ». Ce « mythe publicitaire », pour reprendre l'expression utilisée par cet auteur, si massivement diffusé au point même qu'il trouve tout naturellement une place dans bon nombre de dictionnaires d'informatique ou de micro-informatique³⁶, ordonne fixement le milieu informatique en vue de rendre compte de son histoire. Il fonde principalement son discours sur une assise consolidée et finalement très peu sujette à la variation, l'architecture de type von Neumann³⁷, et sur la succession, présupposément continue mais encore distinctement partitionnée, des différentes techniques dont procédaient et procèdent encore³⁸, selon cette classification de type évolutif³⁹, les composants fondamentaux qui furent utilisés pour la construction des unités logiques et arithmétiques⁴⁰ et celle de la mémoire des calculateurs. Ainsi, conformément aux réquisits de cet accès très usuel, la première génération d'ordinateurs (1946–1960) est celle qui consacre le règne sans partage de la technique du tube à vide (*vacuum tube*) et voit l'apparition, entre autres dispositifs conçus alors pour la mémoire principale, des lignes délai acoustiques

³⁵ Ramunni, J., *La physique du calcul, histoire de l'ordinateur*, Coll. « Histoire et Philosophie des Sciences », Paris, Hachette, 1989, chapitre IV., pp. 112 et 113. Précisons que M. J. Ramunni utilise malgré tout cette notion (les titres des chapitres IV, VI et VII de son ouvrage s'y réfèrent par exemple explicitement), mais, ce faisant, il a parfaitement conscience des erreurs et des insuffisances dont est porteuse cette approche et il ne manque donc ni d'éviter les premières, ni de combler les secondes.

³⁶ Voir par exemple De Schryver, J., *Dictionnaire Micro-Informatique*, Coll. « Mégapoche », Paris, Sybex, 1997, entrée « Générations (d'ordinateurs) », pp. 194 et 195.

³⁷ Les caractéristiques théoriques du dispositif architectural destiné à améliorer l'efficacité des calculateurs électroniques, lequel devait être désigné rétrospectivement comme « Architecture de type von Neumann », ont été pour la première fois exposées dans le « *First Draft of a Report on the EDVAC* », de John von Neumann, daté du 30 juin 1945.

³⁸ Nous nous situons, à ce jour encore, dans ce que nous conviendrons de nommer, à défaut d'une expression peut être moins sujette à controverse, « l'ère du microprocesseur ». La technique implémentée dans nos calculateurs demeure celle des semi-conducteurs de type V.L.S.I. ou U.L.S.I. tandis que le nombre de transistors par unité de surface, en vertu de la pseudo loi de Gordon Moore, double tous les dix-huit mois. La première version de cette « loi » fut formulée par G. Moore dans le numéro d'avril 1965 de la revue *Electronics Magazine*. Elle énonçait alors un doublement annuel de ce nombre et prédisait que cette tendance se poursuivrait une dizaine d'année encore. En 1975, G. Moore reconsidéra ses observations et modifiait son énoncé en conséquence : le doublement du nombre de transistors par unité de surface s'effectuait désormais tous les deux ans. Des collègues électroniciens de G. Moore réévaluèrent à la baisse cette estimation, la réduisant à dix-huit mois. C'est cette valeur qui est généralement retenue lorsqu'on évoque la « loi » de Moore (voir à ce sujet J.-P. Delahaye, « Jusqu'où l'ordinateur calculera-t-il ? », in *Pour la Science*, n°283, pp. 100-105, mai 2001). La technique employée est donc toujours celle du microprocesseur. Ce sont les techniques de lithographie optique et les longueurs d'onde utilisées à cette fin (aujourd'hui entre les ultraviolets et les rayons X ; le *Pentium 4* d'Intel, introduit sur le marché en décembre 2000 fut gravé avec une longueur d'onde de 180 nanomètres) qui font véritablement l'objet d'un perfectionnement soutenu. Les calculateurs quantiques ou à base d'acide désoxyribonucléique (A.D.N.), encore au stade expérimental, pourraient constituer la base d'un nouveau saut qualitatif dans la technique des calculateurs.

³⁹ Chaque saut technologique, donc "générationnel" selon cette conception, s'accompagne d'un gain quantitatif d'ordre multidimensionnel. Ainsi, non seulement on est en mesure de constater une augmentation certaine de la fiabilité, de l'intégration, et donc de la vitesse ou puissance des matériels concernés mais ces accroissements s'accompagnent également d'une baisse significative de la taille et de la consommation énergétique des calculateurs en même temps que décroissent les coûts de fabrication de ces derniers. Ces facteurs conjugués concourent bien évidemment à la diffusion massive des calculateurs dans les différents secteurs de l'espace social.

⁴⁰ *Arithmetic Logic Unit.* ou A.L.U.

(*mercury delay lines* ou *magnetostrictive delay lines*), des mémoires thermiques ou magnétiques de type tambour (*thermal memory drum* ou *magnetic memory drum*), des tubes Wynn-Williams (thyatron ou *Cathode Ray Tubes*) et des mémoires à tores de ferrite (*core memory*). La deuxième (1958–1967), est fondée sur l'utilisation de transistors (*transfer resistor*) isolés et fichés de manière individuelle sur des cartes (on parle alors de *discrete transistor technology*). La troisième période, ou génération (1964–1977), se concrétise dans l'avènement du microprocesseur (*chip*), c'est-à-dire des machines comportant des circuits intégrés (*integrated circuit technology*; utilisation de la lithographie optique; techniques M.O.S⁴¹, L.S.I.⁴²). La quatrième génération de calculateurs (1971–2001...) fait quant à elle usage de composants de type V.L.S.I.⁴³ et U.L.S.I.⁴⁴.

A propos du nombre de « générations » d'ordinateurs.

Une première chose, assurément capitale pour la suite de notre propos, doit d'ores et déjà être signalée à partir de ce point. Si l'on s'efforce de considérer avec circonspection et attention les différents dispositifs supposés caractériser successivement, et donc du même fait démarquer, les quatre stades susmentionnés, il devient alors possible de formuler deux remarques absolument essentielles. D'abord, constatons que ce sont *les éléments premiers fondamentalement constitutifs des A.L.U. et des systèmes supportant la mémoire des ordinateurs qui, sans conteste, circonscrivent les contours des deux foyers primordiaux d'évolution* de cette lignée technique. C'est vers ces centres déterminés, où s'enracinent les problématiques premières que sont respectivement celles de la mémoire centrale et des circuits logiques et arithmétiques, que viennent essentiellement converger les formidables poussées innovatrices qui ont conféré au milieu informatique le modelé de sa courbe et la dynamique caractéristiques de son déploiement. Le *design* architectural des ordinateurs, quant à lui, tend à persister invariablement dans son identité, laquelle fut assez tôt cristallisée en principe, c'est-à-dire fixée en termes de structure logique⁴⁵ et non pas du point de vue de la

⁴¹ Acronyme pour *Metal Oxyde Semi-conductor*.

⁴² Acronyme pour *Large Scale Integration* (intégration à grande échelle). Les composants de type L.S.I. sont caractérisés par une densité de transistors allant de 2300 (Intel 4004 - 1971) à 10⁵ unités par *chip*.

⁴³ Acronyme pour *Very Large Scale Integration* (intégration à très grande échelle). Pour les éléments V.L.S.I., la densité de transistors s'élève jusqu'à 10⁶ unités sur une seule puce.

⁴⁴ Acronyme pour *Ultra Large Scale Integration* (intégration à ultra grande échelle). Catégorie de composants à gravure submicronique.

⁴⁵ Dans le « First Draft of a Report on the EDVAC », John von Neumann présente le "plan" d'une nouvelle machine: un *very high speed automatic digital computing system*. Ce texte ne constitue en fait rien de moins que l'acte de naissance, du point de vue théorique, de l'ordinateur moderne. Dans la deuxième partie de ce travail fondateur (2.0 *Main Subdivision of the System*), sont ainsi définis les concepts essentiels de *central arithmetical*

stricte réalisation matérielle, dès le milieu de l'année 1945 par John von Neumann. Précisons incidemment qu'en ce qui les concerne, les mémoires secondaires et les autres matériels périphériques (*input/output devices*) bénéficient assez régulièrement d'améliorations qui portent de manière non exclusive sur les divers matériaux employés pour leur construction, sur leur fiabilité, leur intégration, leur temps d'accès aux données ou leur capacité de stockage, sans qu'ils fassent pour autant l'objet de mutations techniques substantielles. Ensuite, et par rapport à cela, remarquons que *les véritables innovations que nous nous trouvons effectivement en mesure de distinguer ne concernent, et ne concernent strictement, que ce que nous avons convenu jusque-là de désigner comme les deux premières « générations » d'ordinateurs électroniques*. La première, initialement caractérisée par les omniprésentes lampes à vide, se voit peu à peu pénétrée par des dispositifs tels que les lignes délai acoustiques à mercure, les lignes délais magnétostrictives⁴⁶, ou encore les tubes Wynn-Williams. Alors certes ces systèmes se trouvent être moins susceptibles de défection que ces dernières, très fragiles. Ajoutons qu'en plus de ce bénéfice qualitatif estimable, ils autorisent également une capacité de stockage et une vitesse d'accès aux données plus élevée. Cependant la fonction qu'ils doivent remplir (support mémoire), demeure la même que celle qui était initialement assignée aux lampes à vide. Plus important encore, il est primordial de constater que la manière dont ils satisfont cette charge fonctionnelle ne saurait être assimilée ou comprise comme un facteur de mutation technologique remarquable. Leur *modus operandi* reste celui de la sérialité (sous la forme de la propagation ou du *scanning*⁴⁷). Ainsi, s'ils permettent effectivement d'accroître quelque peu la fiabilité, la vitesse et la capacité mémoire des calculateurs, leur introduction ne s'accompagne ni d'une refonte du schéma théorique d'accès aux données, ni d'une réduction notable de leurs dimensions (les C.R.T. sont très volumineux), et encore moins d'une simplification de la structure à laquelle ils sont intégrés (à titre d'illustration, rappelons que chaque mécanisme à lignes mercure de 10³ bits d'E.D.V.A.C⁴⁸. ne nécessitait pas moins de 11 tubes à vide entièrement dédiés au contrôle - détection, modulation, démodulation, *reshaping* et amplification - des signaux acoustiques). En outre, leur production n'était pas aisée et ils posaient bon nombre de problèmes

part (CA), de *central control* (CC), de *memory* (M), d'*outside recording medium* (R), d'*input* (I), d'*output* (O). La notion centrale d'*element*, les principes gouvernant les interactions de ces sous-systèmes et le fonctionnement arithmétique de l'ensemble y sont également définis avec précision. Ce schéma général et détaillé constitue à ce jour encore l'embase théorique sur lequel est fondée la construction de la très grande majorité des ordinateurs existant, y compris celle de nos *personal computers* (P.C.).

⁴⁶ Conçues en 1951 par Booth et Ferranti Co.

⁴⁷ Balayage.

⁴⁸ *Electronic Discrete Variable Arithmetic Computer*.

techniques⁴⁹, notamment *in situ*, qui s'avéraient très délicats à surmonter. Apparaissent alors, et c'est là *le premier moment de véritable révolution technologique* que connaîtra l'informatique, les mémoires à tores de ferrite. Ces dispositifs présentent deux propriétés déterminantes par rapport à leurs prédécesseurs: il s'agit d'abord de mémoires non volatiles. Autrement dit, l'information qui s'y trouve stockée est maintenue dans la durée sans pour autant nécessiter d'alimentation électrique permanente en vue de son rafraîchissement (à la différence des lignes délai ou des tubes). Ensuite, elles sont de type *Random Access Memory*⁵⁰. Comme sa désignation ne l'indique décidément pas, dans une mémoire R.A.M., l'accès en lecture ou en écriture à n'importe quel *bit* stocké ou devant être stocké dans la matrice mémorielle, qu'elle soit bi ou tridimensionnelle, est effectué aussi rapidement que pour n'importe quel autre. Ceci constitue une amélioration absolument considérable par rapport au mode opératoire caractéristique des autres systèmes mémoire alors en service dans la mesure où celui-ci impliquait l'introduction d'un délai, extrêmement pénalisant pour la durée effective du calcul, lorsqu'une requête d'accès ou d'enregistrement concernant une information particulière se présentait dans un programme. Celle-ci, en même temps que les nombreuses autres données conservées dans les mémoires étaient en effet placées, selon le cas, dans une succession de cycles mécaniques ou acoustiques dont la synchronisation, parfois inconstante, était assurée par l'unité de contrôle du calculateur. Il était donc indispensable, comme cela se produit par exemple lorsque l'on recherche un morceau musical spécifique sur une bande magnétique de cassette audio ordinaire, de laisser le flux d'informations sauvegardées se défaire séquentiellement, avant d'atteindre ou d'inscrire l'information requise ou restituée par la tâche calculatoire en cours. Les mémoires à tores de ferrite permettent de surmonter ce défaut majeur puisque, grâce à l'accès *aléatoire*, elles réduisent très considérablement l'écart éminemment stratégique existant entre la vitesse de fonctionnement des unités qu'elles composent et celle des unités logiques et arithmétiques de l'ordinateur. Par voie de conséquence, non seulement la rapidité avec laquelle le calcul peut être mené à son terme s'en trouve améliorée mais leur non volatilité assure la sécurisation de ce dernier, y compris en cas de panne. *La seconde révolution technologique* que connaîtra l'informatique est celle que permettra l'invention et l'implantation du transistor (l'introduction des matériaux semi-conducteurs dans le champ informatique concernera dans un premier temps la partie électronique des ordinateurs, plus particulièrement les A.L.U., puis, plus tard, la mémoire

⁴⁹ Pour les lignes, il s'agissait principalement du contact acoustique entre le mercure et les cristaux de quartz piézoélectrique et de la dépendance thermique de la vitesse du son dans le mercure.

⁵⁰ Mémoire à accès « aléatoire », également appelée R.A.M.

centrale). La stupéfiante montée en puissance de cet agencement inédit entraînera, outre une réduction considérable de la consommation énergétique des ordinateurs (et donc des contraintes de refroidissement qui lui sont nécessairement attachées⁵¹), une diminution cruciale de la taille de ces derniers (on sera désormais autorisés à parler de *miniaturisation* des composants), ainsi qu'un accroissement formidable de leur fiabilité et de leur vitesse ou fréquence de fonctionnement (les distances que les électrons ont à parcourir entre les éléments s'amenuisent spectaculairement). Plus profondément encore, trois effets décisifs pour la suite de l'histoire de l'informatique devaient s'ensuivre de l'arrivée du transistor. Très rapidement, on comprit que cet élément ne pouvait être directement substitué aux tubes à vide comme cela avait pu être le cas pour les lignes délais à mercure. Leur implantation dans les ordinateurs nécessitait au contraire que l'on identifie d'abord la structure existante devant être transformée puis que l'on procède ensuite à son portage vers la toute nouvelle technique des semi-conducteurs en tenant précisément compte des contraintes physiques propres à ces derniers. Ceci impliquait ni plus ni moins qu'un processus de refonte intégral de la conception des circuits logiques et arithmétiques des machines. Un autre résultat important fut l'homogénéisation croissante des machines que permettait le transistor. Jusqu'à l'arrivée de celui-ci, les ordinateurs consistaient en effet en des élaborations extrêmement composites. On y voyait fréquemment coexister dans un assemblage baroque et fragile une multitude combinée de tubes à vide, de lignes délais mercurielles ou magnétiques, de mémoires à tores, de C.R.T., etc. *Mutatis mutandis*, le transistor, en remplaçant progressivement ces divers dispositifs, va réduire cette hétérogénéité jusqu'à instaurer une véritable uniformisation des composants. Le substrat employé pour construire les A.L.U. et les mémoires sera désormais le même, avec tous les gains de rapidité, d'intégration et de fiabilité que l'on peut en attendre. Enfin, le transistor, par le biais de la miniaturisation qu'il implique, introduit conjointement les notions de modularité (ou d'interchangeabilité) et d'automatisation de la fabrication dans le secteur informatique. Modularité car les circuits électroniques complexes constitués de transistors (par exemple un additionneur), peuvent méthodiquement être réduits à des sous-ensembles plus simples et interconnectables (des cartes par exemple). Ils sont donc aisément remplaçables en cas de panne. Automatisation ensuite puisque l'un des avantages principaux du transistor, sa taille très réduite, constitue conjointement le talon d'Achille de son processus

⁵¹ Plus une machine consomme d'électricité, plus elle génère de chaleur. Or celle-ci est très fréquemment à l'origine de pannes qui peuvent être, sinon sérieuses, du moins considérablement inconfortables (E.N.I.A.C., par exemple, consommait 150 kWh et comportait 17468 tubes à vides. Si l'un d'entre eux venait à claquer, sa localisation pouvait s'avérer très fastidieuse alors que paradoxalement son remplacement ne nécessitait que quelques minutes à un opérateur expérimenté. Le temps de calcul en était proportionnellement affecté).

de confection. Les jonctions entre les éléments transistorisés étant minuscules, leur fabrication est donc extrêmement délicate et très sensible à de mauvaises manipulations. L'introduction d'une procédure de production en série recourant à la lithographie pour construire ces éléments permettra de remédier efficacement à ce problème en même temps qu'elle renforcera la vertu de leur interchangeabilité. Dans un dernier temps, c'est l'ordinateur transistorisé lui-même qui sera utilisé pour contrôler non seulement son propre assemblage mais également travailler à son propre perfectionnement. Comme l'écrivait récemment Ray Kurzweil: « *The first computers were designed on paper and assembled by hand. Today, they are designed on computer workstations with the computers themselves working out many details of the next generation's design (sic)⁵² and are produced in fully automated factories with human guidance but limited direct intervention⁵³. ».*

Voyons là encore un bel exemple de récursivité !

Pour résumer tout ce que nous venons de dire, et en schématisant quelque peu bien entendu, il ne serait nullement excessif d'affirmer que les deux premières « générations » d'ordinateurs sont commandées et travaillées en profondeur par l'impérieuse nécessité de résoudre les questions primitives de la mémoire et des circuits logiques. C'est alors dans l'ouverture de la troisième « génération » que viennent se condenser les solutions les plus optimales apportées antérieurement à ces problèmes. Et c'est dans cette même ouverture que surgissent les interrogations attachées à la fois à la gestion de cette structure complexe qu'est l'ordinateur et au développement du logiciel⁵⁴ qui en permet l'emploi. La "génération" suivante, s'il faut la distinguer⁵⁵, ne constitue en fait « que » l'aboutissement, en termes d'intégration, de perfectionnement des dispositifs et des concepts qui leur sont liés, des processus initiés et continués lors des "trois premiers moments" de l'histoire de l'informatique. Nous terminons donc en affirmant que si le concept de « génération d'ordinateurs », avec tout ce qui le fonde et l'accompagne, doit encore être provisoirement accepté, le nombre de celles-ci ne saurait aucunement prétendre équivaloir à quatre. Comme nous venons en effet de le voir, l'informatique n'a connu que deux moments technologiques

⁵² Nous soulignons.

⁵³ Kurzweil, R., *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence*, New York, Penguin Book, 1999, p.32.

⁵⁴ Nous entendons ici non seulement les compilateurs/interpréteurs, les O.S. (*Operating Systems*), les langages de haut niveau, mais également le *software* dédié à des applications spécifiques.

⁵⁵ Nous en nions l'existence et la pensons plutôt comme la continuation, dans le perfectionnement, des processus réellement novateurs initiés plus tôt.

révolutionnaires : ceux que bornent les apparitions des mémoires à tores de ferrite et du transistor, et ceux-là seulement.

- Conséquence : le schème générationnel quadripartite est inapte à rendre compte précisément de l'histoire de l'informatique. Une approche bipartite centrée sur la notion d'innovation technologique lui est, de très loin, préférable.

Du chevauchement des générations.

Ceci ayant été spécifié, nous nous trouvons également en mesure de procéder au repérage d'un trait singulier qui ne manque pas d'être surprenant concernant le découpage somme toutes précis – qui ne saurait toutefois aucunement prétendre à une quelconque exclusivité puisqu'il ne constitue après tout qu'une instance possible de ce mode d'appréhension de l'histoire de l'informatique - proposé par M. De Schryver. Les différentes phases distinguées ici, sans exception, débordent toutes les unes sur les autres avec plus ou moins d'amplitude (ainsi : [1^{ère} génération : 1946 – 1960] ; [2^{ème} génération : 1958 – 1967] ; [3^{ème} génération : 1964 – 1977] ; etc.). Il est légitimement envisageable de rendre compte de ces empiètements répétitifs en convoquant, tout au moins dans un premier temps, deux facteurs d'explication tout à fait essentiels. Ainsi, et ceci constitue le premier élément d'interprétation que nous avancerons, lors même qu'une technique (ou ses avatars perfectionnés) peut effectivement être qualifiée de dominante, c'est-à-dire qu'elle constitue pendant un intervalle de temps donné la base technique fondamentale à partir de laquelle vont être élaborés les éléments primordiaux entrant dans la construction de la mémoire principale et des A.L.U. de calculateurs électroniques pleinement opérationnels (c'est par exemple le cas des tubes à vide et des lignes délai acoustiques pour la première "génération" de calculateurs), d'autres dispositifs élémentaires et fondamentaux (par exemple le transistor, qui fut inventé en 1947), sont conçus et font ensuite parallèlement l'objet d'un développement. Ensuite, et c'est là le second facteur d'éclaircissement, ces derniers sont substitués⁵⁶ progressivement aux éléments clefs des calculateurs représentatifs de la phase en cours (ce fut le cas par exemple pour la mémoire principale de l'E.N.I.A.C., dotée partiellement d'éléments à tores de ferrite

⁵⁶ Concernant les matériaux semi-conducteurs, et plus spécifiquement le transistor à base de silicium, nous rappelons encore que leur introduction impliqua bien plus qu'un simple processus de substitution aux anciens éléments de base des calculateurs puisque leur emploi nécessita que l'on réétudie en profondeur, et à partir de leurs spécificités propres, le design des circuits logiques et arithmétiques des machines.

en 1953), tandis que dans le même temps ils sont perfectionnés⁵⁷, fiabilisés sans cesse, et s'imposent peu à peu, du fait même des gains de performance, d'intégration, et de coût qu'ils autorisent de plus en plus, comme le paradigme technologique sur la base duquel sont fabriqués des prototypes de calculateurs préfigurant l'advenue d'une "nouvelle génération". Pendant un laps de temps donné, qui peut en fait durer des années mais demeure néanmoins relativement bref, technique établie et technique embryonnaire, ou en cours de développement, se trouvent donc de fait placées dans un singulier rapport de coextensivité chronologique. Il survient cependant un moment où il est possible de constater que la nouvelle technique commence graduellement à supplanter l'ancienne. Les prototypes et surtout les machines qui en sont dérivées, rendues extrêmement attractives à cause de leurs performances remarquables, investissent alors peu à peu les centres de recherche, les agences gouvernementales ou encore, quoique plus tardivement, les secteurs industriels et commerciaux. Mais cette pénétration ne s'effectue pas de manière brutale. Compte tenu du coût élevé des calculateurs, des contraintes pesantes liées à la fois à leur mise en place et aux changements d'habitudes, longues à définir et à acquérir, qu'implique leur exploitation optimale, leur déclassement⁵⁸, et donc leur renouvellement au profit de dispositifs plus compétitifs, se voit fréquemment retardé au maximum. Ce sont là, très succinctement exposées, quelques-unes des raisons essentielles qui permettent de comprendre pourquoi il ne saurait être véritablement surprenant de voir coexister au cours d'une même période et de façon de plus en plus concurrentielle, des lignées de calculateurs qui ne participent pas de la même technique fondamentale. Cela nous autorise également à rendre compte de façon nécessaire, mais non pas suffisante, des empiètements que nous signalions plus haut. La situation est en effet bien plus complexe que ce que nous l'avons jusque là laissé pressentir.

- Conséquence : les « générations » d'ordinateurs que l'on présente fréquemment comme étant facilement localisables sur une ligne temporelle d'une soixantaine d'années ne se plient pas aussi docilement que cela au processus qui vise à leur affecter des segments temporels précisément définis. On remarque au contraire qu'elles s'interpénètrent profondément (première, deuxième et troisième

⁵⁷ Le transistor à base de germanium sera remplacé par le transistor à base de silicium, moins coûteux et plus facile à produire en masse, annoncé en mars 1954 par la firme américaine *Texas Instruments* lors de la *National Conference on Airborne Electronics*.

⁵⁸ Le cas de certains calculateurs intégrés au système de défense américain S.A.G.E. (*SemiAutomatic Ground Environment*), parfois désignés sous l'appellation de Whirlwind II, est particulièrement explicite : le premier prototype fut livré par I.B.M. à l'armée américaine en 1955 tandis que la machine de série était disponible en 1956 (la première est livrée à la *Mc Guire Air Force Base* en juin). Le dernier ordinateur original du système S.A.G.E. fut retiré en 1983 pour être remplacé par un modèle plus récent !

"génération"), voire se confondent dans la durée (troisième et quatrième génération). Cet entremêlement trop souvent ignoré ne consiste pas en une simple juxtaposition. Il est en fait porteur d'une singularité essentielle.

De la contemporanéité des deux moments essentiels de l'histoire de l'informatique.

Si les intervalles assignés à ces quatre grands moments historiques⁵⁹ de l'informatique peuvent sensiblement varier en extension d'un auteur à l'autre, en fonction par exemple du niveau de « résolution temporelle et technologique » adopté par ceux-ci, il n'en demeure pas moins que le schème commun d'exposition s'apparente souvent à un déroulement chronologique très faiblement différencié, résolument linéaire et synoptique, et parfois modulé par des thématiques ou des critères⁶⁰ qui répondent à des orientations d'ordre technique, industriel ou social par exemple. Tout se passe alors comme s'il était effectivement possible, et cela sans entraîner de préjudices réels pour le rendu fidèle de la dynamique de

⁵⁹ Un projet d'ordinateur de "cinquième génération" fut initié en 1978 par le M.I.T.I. (*Ministry of International Trade and Industry*), ministère japonais de l'industrie et du commerce extérieur. Les fonds alloués étaient colossaux puisque le projet, qui devait aboutir dans les années 90 à une machine de type K.I.P.S. (*Knowledge Information Processing Systems*), bénéficiait d'une somme de 450 millions de dollars apportés par le M.I.T.I. tandis qu'une somme équivalente devait être investie par les industries partenaires (*Fujitsu, Hitachi, N.E.C., Mitsubishi, Oki, Toshiba*). Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point plus tard.

⁶⁰ Par exemple, deux critères au moins peuvent être distingués qui permettent d'apprécier pleinement la variabilité saisissante à laquelle peuvent être effectivement soumis les bornages censés circonscrire en les démarquant les différentes périodes temporelles où sont habituellement inscrites les soi-disant générations d'ordinateurs. Si l'on adopte comme vecteur de sectorisation générationnelle la production de séries commerciales (proposée par J. Ramunni), la première génération d'ordinateurs trouve son lieu propre dans l'intervalle 1951 – 1959 (*L'Universal Automatic Computer (UNIVAC I) d'Eckert-Mauchly Computing Corporation est livré en mars 1951 à l'U.S. Census Bureau*). A partir de là, on se trouve déjà en mesure de constater un décalage net avec l'intervalle correspondant que nous indiquons plus haut (1946 – 1960), qui est celui proposé par De Schryver dans son *Dictionnaire Micro-informatique*. Le choix effectué par De Schryver, consistant à proposer l'année 1946 comme borne inférieure de la période convenant à la première génération d'ordinateurs, indique clairement qu'il y inclut E.N.I.A.C. (ce calculateur électronique fut dévoilé au public le 14 février 1946 à la *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie). Or, bien sûr, E.N.I.A.C. n'a jamais été une machine destinée à la commercialisation (construit pour le *U.S. Ordnance Department of the War Department* sous le numéro de contrat W-670-ORD-4926, il fut utilisé pour effectuer des calculs liés à des domaines sensibles à la fois par le *Ballistic Research Laboratory* et le *Los Alamos Research Lab*. Son impact sur les communautés industrielles, scientifiques et militaires, nous y reviendrons, fut considérable dans la mesure où il constituait la preuve matérielle de la faisabilité et de la supériorité indéniables – accroissement de la précision et de la vitesse des calculs – des calculateurs électroniques). De tout cela, il ressort clairement qu'en fonction des orientations spécifiquement adoptées par les auteurs en vue de rendre compte de l'histoire de l'informatique, l'étendue des séquences temporelles alors discriminées ne demeure jamais constante. Comme on vient de le constater, l'approche que l'on pourrait qualifier de globale – en l'occurrence celle de De Schryver – qui inclut donc E.N.I.A.C. – majore la première période remarquable de l'histoire de l'informatique de cinq années par rapport à la perspective qui privilégie l'abord fondé sur les séries commerciales. Un deuxième critère, parmi bien d'autres envisageables, autorisant une entrée différenciée en vue de procéder à un ordonnancement de l'histoire de l'informatique est celui qui consiste à privilégier la production de prototypes. Là encore, la durée des phases effectivement distinguées s'en trouve souvent sensiblement modifiée (constatation, selon les cas, d'un phénomène de "contraction" ou de "dilatation"). Dans tous les cas, le choix initial de "l'angle d'approche", fut-il composite, hybride, détermine de façon impérieuse la manière dont est élaborée cette histoire.

l'évolution historique de cet objet composite et étonnamment hétérogène qu'est l'ordinateur, d'inscrire dans un processus de succession continue, dépourvue d'aspérités, d'irrégularités ou de fractures, le cortège en vérité extrêmement disparate des multiples machines construites depuis les années quarante⁶¹. Dans la plupart des cas de figure, le discours vient alors se conformer aux exigences inhérentes à ce type de distribution : la série, la linéarisation, en même temps que l'écrêtage des singularités ou des pics jugés insuffisamment significatifs prévalent absolument tandis que les ruptures, les écarts infertiles, les empiètements, la coextensivité, la réticularité, escamotés ou laissés à leur enfouissement pourtant décelable, sont ignorés. C'est alors, pour faire nôtre le terme de Gaston Bachelard, un véritable régime de *mutilation* qui s'instaure. Ce processus abrasif est opiniâtrement sélectif. Il désagrège et sépare en taisant trop fréquemment le complexe, en rejetant souvent les verticalités riches de complexités, les transversalités, les hybridations, les croisements et les simultanités, bref les spécificités, les saillies et les modelés, qui par leur existence même résistent peu ou prou au laminage d'un domaine d'étude dont il semble parfois qu'on le voudrait trop parfaitement glacé et orienté. Précisons qu'il continue à fonctionner dans l'épure temporelle horizontale qu'il vise à construire en triant encore, dans l'énorme population souvent frappée de « consanguinité théorique » des calculateurs électroniques, les machines qui lui paraissent les plus particulièrement dignes d'attention. Inutile bien entendu de préciser ici que dans nombre de travaux consacrés à l'histoire de l'informatique, quant il ne s'agit pas purement et simplement d'études intégralement dédiées au développement d'une seule machine, les calculateurs qui font l'objet de toutes les attentions sont très souvent les mêmes. La figure organisationnelle dominante est donc unidimensionnelle, lisse, sérielle, ne faisant pli sur elle-même qu'en de rares occasions. Elle oscille comme une longue corde aux nœuds parfois fort nombreux, très spécifiquement partitionnée selon la modalité générationnelle déjà mentionnée, sous les impulsions disjointes qu'impriment sélectivement sur ses séquences constitutives des transitions technologiques pensées comme étant de nature distributive mais

⁶¹ A titre indicatif et en nous basant sur un travail effectué par Bruce Watson, qui s'est lui-même appuyé sur deux articles rédigés par le Dr. Kenneth E. Knight, parus dans la revue américaine *Datamation* (« Changes in Computer Performance », septembre. 1966 et « Evolving Computer Performance 1963-1967 », janvier 1968), nous nous sommes livrés à une énumération des calculateurs ayant existé de la fin des années 30 à nos jours. En complétant nous-mêmes ce listage, nous sommes parvenus à ce jour à dénombrer 1014 machines. Hans B. Pufal (1995, 1996, 1997) a enrichi d'une manière absolument remarquable le travail initié par Bruce Watson amenant le nombre de machines ainsi recensées à 4335 ! Pourtant, cette liste n'est encore pas exhaustive puisque bon nombre de calculateurs d'origine européenne n'y figurent pas encore. La liste de H. B. Pufal peut être intégralement téléchargée, en même temps qu'un dispositif de navigation intégré très fonctionnel, à partir de l'adresse suivante : <http://www.digiweb.com/~hansp/ccc/ccclist.htm>. La BIG LIST de Bruce Watson, toujours archivée, peut être consultée à partir des liens suivants : <http://gn.update.uu.se:70/0/chp/art/bwatson> ou <http://freeflight.com/fms/comp/misc/List.txt>.

qui ne sont parfois pas aussi instauratrices que ce qu'on le laisserait volontiers supposer. De toute façon elle persiste dans son unicité initiale, toujours accompagnée par l'ombre portée immense et homogène de l'architecture de type von Neumann qui vient certifier à tout instant ses étranges prétentions continuistes ; ambitions que nous qualifions « d'étranges » puisqu'en même temps qu'elles visent à instaurer une succession chronologique quasi continue dans l'espace des artefacts informatiques, elles informent ou discriminent en amont cette régularité supposée en la discrétisant ostensiblement à au moins quatre reprises afin d'en faire ressortir plus encore la nature prétendument consécutive. Le fil chronologique ainsi pourvu de marques saillantes commodément repérables est alors déroulé placidement, régulièrement, scandé de manière arythmique par des références, souvent très renseignées des points de vue historique et technique, concernant les « machines qui ont vraiment compté » (*Milestones of the History of Computing* diraient les américains). Pourtant les éléments historiques – et pour tout dire artefactuels - ne manquent pas, qui permettent de révéler immédiatement et de façon très éclatante les défauts ou déficits fondamentaux dont sont intrinsèquement porteuses ces modalités pour le moins statiques d'appréhension de l'histoire de l'informatique. La prise en compte privilégiée des séries prototypiques, dont les machines sont par excellence spécifiques, mises pour l'occasion en dialogue avec les séries commerciales, accomplit à cet égard une fonction révélatrice tout à fait intéressante et réellement féconde. Dès lors que l'on accorde à ces lignées l'attention qu'elles méritent véritablement, autrement dit dès lors que l'on accepte l'éclatement, fut-il transitoire, du prisme courant qui établit et conforte les habitudes occurrentes de linéarité totalisatrice et de lissage, les choses ne se présentent plus de la même manière. Evidemment, la simplicité toute relative de leur mouvement rectiligne supposé se décompose en même temps que l'on s'établit de plein pied au confluent des zones d'influence des problématiques techniques, absolument fondamentales en informatique, relatives à la mémoire centrale et à l'unité logique et arithmétique. Un exemple particulièrement significatif peut tout de suite être mentionné ici : en janvier 1954 les *Bell Laboratories* produisent pour le compte de l'*U.S. Air Force* le premier ordinateur électronique entièrement transistorisé. Il s'agit du TRADIC (*TRansistorized Airborne Digital Computer*). Ce ordinateur d'un genre nouveau fut d'ailleurs suivi en novembre de la même année par le TRANSAC (*TRANSistor Automatic Computer*) de *Philco Corporation*, lui aussi entièrement équipé de transistors à point de contact⁶² au germanium. Or, nous rappelle J.

⁶² Il convient cependant de rappeler, comme le fait J. H. Felker (« Performance of TRADIC System », *Proceedings Eastern Joint Computer Conference*, 1954, pp. 46-49), que les transistors de contact (*junction*

Ramunni, « on constate que le premier ordinateur à tores de ferrite n'a été achevé qu'en novembre 1954.⁶³ ». Que faut-il dès lors comprendre à la lumière de cela ? Qu'est-ce que tout ceci implique au final ? Le transistor⁶⁴ se voit complètement intégré dans des systèmes informatiques destinés à l'armée américaine *avant* même que les mémoires à tores de ferrite, un peu plus anciennes⁶⁵ mais plus fiables et nettement moins coûteuses, ne se voient implantées dans un ordinateur commercial opérationnel. Selon cette perspective particulière, la seconde génération d'ordinateur voit donc le jour avant la première ! Bien entendu, un simple exemple, fut-il aussi sûrement explicite, ne saurait ici comme ailleurs prétendre à être érigé en référent absolu. Mais à partir de l'examen de ce dernier, on se trouve peut-être en mesure d'apprécier plus précisément et plus pleinement les risques - simplification exagérée et écrasement de la dynamique de déploiement du milieu étudié - inhérents à une approche méthodologique de l'histoire de l'informatique qui aurait essentiellement recours, sans trop de discernement ni de précautions, à la catégorie pourtant prépondérante de « génération d'ordinateurs » pour conduire l'intégralité de son discours. Nous l'avons déjà affirmé, cet accès que nous qualifions plus haut de frontal pour tenter d'en souligner avec plus de force la nature que nous jugeons « abrupte » et dangereusement réductrice, recèle malgré tout des

transistor) n'étaient pas des éléments très fiables et qu'ils étaient en outre extrêmement difficiles à produire en grande quantité. Cette précision permet de relativiser encore plus le propos.

⁶³ J. Ramunni, *La physique du calcul*, op. cit., p.112. Il s'agit de la machine commerciale E.R.A. 1103 (*Engineering Research Associates* était une division de *Remington Rand Corporation*), qui fut livrée à la fin de l'année 1954 au N.A.C.A. (*National Advisory Committee for Aeronautics*). Cette machine utilisait des mémoires à tores de ferrite en lieu et place des mémoires à tubes Williams qui avaient été initialement employées pour E.R.A. 1101 (destiné à des travaux scientifiques et d'engineering) et les premiers E.R.A. 1103 (deux versions du 1103 existaient dès le milieu de l'année 1952, une à vocation scientifique et l'autre commerciale. Quelques vingt machines de ce type furent construites et livrées à des agences militaires et des compagnies aérospatiales). Suivant les conseils du N.A.C.A., E.R.A. modifia substantiellement le 1103. Ces modifications furent ensuite implantées comme des caractéristiques standards sur le modèle 1103-A.

⁶⁴ Le transistor (avec comme élément de base un cristal de germanium) fut élaboré aux *Bell Laboratories* par J. Bardeen, W.H. Brattain et W. Shockley en 1947. Une demande de brevet fut déposée l'année suivante.

⁶⁵ Les mémoires à tores de ferrite, non volatiles, furent développées vers la fin des années 40 aux Etats-Unis (*I.B.M.*, Université de l'Illinois, Harvard, M.I.T., etc.). Héritières indirectes de dispositifs de contrôle de tir développés et utilisés par la marine allemande pendant la deuxième guerre mondiale (lesquels étaient basés sur des matériaux magnétiques exhibant la propriété d'hystérésis), elle furent installées dès 1952 sur le Harvard Mark IV, puis, en 1953, sur l'E.N.I.A.C. (pour le stockage des résultats intermédiaires et servir de *buffer* rapide aux unités d'entrée/sortie. Elles furent conçues pour cette machine par Burroughs Corporation) et sur le *Whirlwind I* (*Whirlwind Core Plane*, M.I.T., 1953 et le *Whirlwind Core Memory Stack*, M.I.T, 1953. Jay Forrester en était l'inventeur). Dans les deux cas, ce sont des *upgrades* ou perfectionnements de machines précédemment équipées de tubes à vide. Notons qu'à la fin de l'année 1945, le *Whirlwind*, projet initié en 1943, avait déjà fait l'objet d'une refonte théorique considérable puisque autrefois prévu comme un calculateur analogique (en fait un simulateur de vol analogique devant opérer en temps réel), il avait été transformé en calculateur électronique digital (il utilisait des *Cathode Ray Tubes* (C.R.T.) spécialement développés au M.I.T., 4500 tubes à vide et 14800 diodes cristal). Le *Harvard Mark IV* constituait quant à lui une évolution du *Harvard Mark III* (mis en service en mars 1950 au *Naval Proving Ground de Dahlgren*, Virginie). Il reprenait bon nombre des caractéristiques techniques propres à cette machine hybride (le *Mark III* utilisait en effet 5000 tubes à vide et 2000 relais électromécaniques) avec cependant une exception notoire : des mémoires à tores de ferrite y furent employées pour construire 200 registres.

caractéristiques propres dont certaines se révèlent jusqu'à un certain point tout à fait profitables. Ainsi, il est sans nul doute permis de discerner une valeur opératoire certaine quant au travail de défrichage qu'il a incontestablement permis d'accomplir. Mais le prix à payer pour cela, comme nous nous sommes efforcés de le démontrer, est celui d'une simplification qui revêt bien trop souvent un caractère outrancier.

Désormais pourvus de tous ces éléments de révision, nous nous trouvons en position de comprendre avec netteté la nature fondamentalement « mythique », au sens que l'on pourrait assigner à une construction de l'esprit ne reposant pas sur un fond de réalité mais qui serait néanmoins extrêmement populaire (donc forcément publique), du schème quadripartite qui prévaut de manière surprenante, sous un mode ou sous un autre, dès lors qu'il est question de l'étude de l'histoire de l'informatique. Étrangement, l'apparente richesse qu'offre cet accès trop souvent ratifié – il distingue comme nous l'avons déjà établi quatre divisions décisives au sein de cette fantastique aventure technologique – sacre en la masquant la simplification immodérée qu'il tend à diffuser massivement. Comprenons par là que le mode bilatéral que nous lui avons opposé, en identifiant seulement deux fractionnements essentiels dans ce mouvement en lieu et place des quatre habituels, restaure la complexité immanente d'un processus foncièrement dynamique qui se désagrège, se coagule et s'aplatit lorsqu'il se trouve saisi dans un schéma linéaire qui est voué, d'emblée, à la perdre dans le temps même où il se construit. Le délaissement de la figure quadripartite au profit de la figure bipartite en vue de rendre compte du déploiement de l'informatique ne saurait alors être compris et assimilé à l'élection d'une visée encore plus réductrice que celle à laquelle elle doit être substituée. Elle est même tout le contraire de cela puisqu'en s'établissant elle ouvre sur un espace pourtant déjà visité dont la teneur profonde, labyrinthique et composée, demeurerait désespérément tue. Tout en n'excluant pas la possibilité d'invoquer la distribution générationnelle quadripartite – en ne perdant jamais de vue ce qu'elle est et ce qu'elle vaut - c'est cette ligne d'approche que nous nous efforcerons de privilégier et de maintenir afin de tenter de comprendre l'histoire de l'informatique en ce qu'elle a de plus originel et original.

Nous débiterons notre investigation en interrogeant les concepts de calculateur, d'ordinateur et d'information. Il s'agira ensuite pour nous d'appréhender l'ordinateur en étudiant son schème architectural fondamental et en examinant aussi la façon dont il est possible de représenter les informations en machine afin que celles-ci puissent effectivement être manipulées par ces instruments. Ceci fait, nous pourrions nous intéresser aux circuits électroniques fondamentaux mis en œuvre au cœur des ordinateurs et à la logique booléenne

qu'ils matérialisent désormais aux échelles micrométriques. Cette relation constituée entre structures électroniques fonctionnelles premières de l'ordinateur et logique bivalente nous permettra ensuite de nous intéresser à l'archétype logico-mathématique de l'ordinateur, à son essence si l'on préfère : la machine universelle de Turing.

La seconde partie de notre travail sera plus particulièrement construite autour de la genèse de l'ordinateur et de celle de ses composants fondamentaux (éléments de commutation primitifs, mémoire centrale, mémoire de masse, périphériques d'entrée/sortie). Afin de parfaitement comprendre en quoi l'ordinateur introduisit une rupture inouïe dans la longue série des automates calculatoires qui le précédèrent, nous commencerons par nous intéresser à certains des instruments de calcul qui le devancèrent, tels l'abaque, le *Tidal Harmonic Analyser* de Sir William Thomson ou encore les *Analytical* et *Difference Engines* de Sir Charles Babbage. Nous nous emploierons ensuite à étudier les spécificités et les limitations respectives des systèmes de calcul appartenant aux classes des machines analogiques et digitales, non sans revenir évidemment sur les conditions dans lesquelles ils étaient employés ainsi que sur les objectifs et les méthodes qui étaient poursuivis et mises en œuvre par leur moyen. Ce travail nous amènera à voir pour quels motifs et dans quelles circonstances on a commencé à procéder à l'électronisation de certains de ces dispositifs, au tournant des années trente. La deuxième guerre mondiale, comme chacun le sait, ne fera qu'accélérer ce processus de pénétration de la technologie électronique au sein de la sphère des appareils de calcul. La diversité des théâtres d'engagement et l'entrée en service de nouvelles machines de guerre conventionnelles nécessiteront bien entendu la réalisation ou la réévaluation *rapide et massive* des tables balistiques utilisées sur le terrain par les différentes armées. Mais c'est surtout la mise au point de la bombe atomique américaine, dans le cadre du projet Manhattan, qui exigera que l'on imagine une machine à calculer électronique dotée d'une puissance de traitement, d'une vitesse d'opération et de dimensions totalement inédites, l'*Electronic Numerical Integrator and Computer*. Ce sont trois des chercheurs et ingénieurs engagés dans le processus de conception de l'E.N.I.A.C. – nommément l'ingénieur électronicien John. Presper Eckert, le physicien John William Mauchly et le mathématicien John (János) Von Neumann – qui conçurent l'idée de l'ordinateur alors même que la construction du Léviathan de la *Moore School of Electrical Engineering* n'était pas encore achevée. Après nous être livrés à un examen minutieux de l'E.N.I.A.C., de sa structure et de son mode opératoire particuliers – chaque nouveau problème à traiter réclamait en effet un recâblage partiel de ses circuits logiques et arithmétiques - nous étudierons de manière extrêmement détaillée le *First Draft of a Report on the EDVAC*. Ce texte fameux signé de la seule main de J. Von Neumann,

mais qui doit énormément à J. P. Eckert et J. W. Mauchly, est universellement considéré comme l'acte de naissance de l'ordinateur. Cette étude du document spécifiant l'architecture typique de l'ordinateur – celle-ci, dite de Von Neumann, a toujours cours aujourd'hui - nous permettra de voir en quoi calculateur numérique électronique et ordinateur diffèrent par essence. Elle nous autorisera également à comprendre les économies globale et intime de cet instrument nanti d'un si formidable pouvoir de traitement de l'information.

Il s'agira ensuite pour nous de voir quelles sortes de solutions technologiques on a successivement projetées afin de résoudre un problème technique qui s'est révélé central et persistant tout au long de la seconde moitié des années 40 et des années 50: celui du support matériel des mémoires internes et des périphériques de stockage auxiliaire des ordinateurs. A dire vrai, c'est là un axe de recherche et de développement – avec ses contraintes propres de coût, de dimensions, de rapidité, de capacité et de fiabilité - qui n'a jamais cessé de travailler et d'orienter l'industrie informatique tout au long de son histoire. Des mémoires thermiques d'Andrew D. Booth aux *Selectrons* de Ian Rachman, en passant par les très sensibles lignes délai acoustiques ou magnétostrictives mises en œuvre sur l'E.D.V.A.C., l'E.D.S.A.C., le *Pilot A.C.E.* (pour le premier type), ou le *Ferranti Pegasus* (pour le second), nombreux et variés seront les dispositifs de stockage inventés pour permettre aux ordinateurs de remplir leurs multiples tâches dans les conditions les meilleures qui se puissent imaginer. C'est au début des années 50 toutefois que les matrices mémorielles à tores de ferrite feront leur apparition, grâce notamment aux travaux d'An Wang (Harvard puis *Wang Laboratories*) et de Jay Forrester (M.I.T.). Economiques, performantes, fiables et miniaturisables jusqu'à un certain point, ces dispositifs magnétiques autorisant un accès aléatoire aux données qu'ils permettaient de retenir – y compris lorsque l'ordinateur ne fonctionnait pas – furent massivement employés par l'industrie informations jusque dans les années 70. Comme nous chercherons à le montrer, il n'est pas exagéré de dire que si révolutions informatiques il y eut, alors l'invention des mémoires à tores de ferrite fut assurément l'une d'entre elles, et non la moindre. Les mémoires à tores permirent en effet d'apporter une solution extrêmement satisfaisante – et ce sur tous les points - au problème capital que posait la réalisation matérielle de la mémoire interne des ordinateurs depuis l'invention de cet instrument. Les premières machines équipées de ce type de mémoires seront de coûteux prototypes, bien entendu. Mais dès la fin des années 50 et grâce à l'implantation d'unités de fabrication dans le sud est asiatique, de plus en plus de systèmes informatiques civils équipés de mémoires à tores purent être introduits sur le marché. La mise au point et la production massive des mémoires à tores de ferrite représentèrent certains des facteurs essentiels qui permirent à

l'informatique de sortir de sa phase prototypique et de rentrer dans sa phase proprement industrielle. Une seconde invention d'une importance capitale pour l'évolution de l'informatique fut celle du transistor. Développé conjointement par William B. Shockley, Walter H. Brattain et John Bardeen, ce composant en matériau semi-conducteur (il devait initialement s'agir de germanium), vit le jour aux *Bell Laboratories* au cours des deux derniers mois de l'année 1947. Au début des années 50, l'industrie américaine dans son ensemble commença à prendre conscience des avantages immenses qu'elle pourrait tirer de l'usage de ce nouveau composant miniature, lequel était capable de se comporter comme n'importe quel type de commutateur électronique avec une rapidité d'exécution et une fiabilité phénoménales. Avant que n'apparaisse le premier ordinateur transistorisé – il s'agissait du *TRAnsistor DIgital Computer* ou T.R.A.D.I.C. développé par les *Bell Labs* pour l'*U.S. Air Force* en 1954 – le transistor fut ainsi utilisé pour fabriquer des prothèses auditives et de petits postes radiophoniques. Une pensée ambitionnant d'appréhender véritablement l'histoire de l'informatique ne peut à notre sens faire l'économie d'un retour – fut-il très bref – sur celle des semi-conducteurs et de leur industrie. Depuis leur création, au sortir de la deuxième guerre mondiale, ces deux sphères technologiques très fortement innovantes n'ont en effet cessé d'évoluer en parallèle tout en s'interpénétrant et en s'influçant l'une l'autre, le tout pour un bénéfice mutuel évidemment immense. Nous identifierons les moments essentiels de l'histoire des composants en semi-conducteur - la mise au point du transistor à jonctions, l'invention de la technologie planaire et la création du transistor M.O.S. à effet de champ représentèrent par exemple quelques-uns de ces moments remarquables – en montrant d'une part quelle était la nature et la portée du ou des gains technologiques que ces découvertes capitales autorisèrent, et d'autre part dans quelles circonstances, à quelles fins et pour quels bénéfices l'industrie informatique s'en empara et les incorpora à ses propres productions. Un des dispositifs les plus essentiels jamais mis au point par les fabricants de composants électroniques en matériau semi-conducteur fut certainement le circuit intégré. Ce dispositif imaginé par des équipes de la *Texas Instruments* et de la *Fairchild Semiconductor* entre 1959 et 1961 – mais déjà décrit par le scientifique britannique Geoffrey W. A. Dummer en 1952 – révolutionna profondément l'informatique et ses instruments, en autorisant une augmentation remarquable des performances des ordinateurs ainsi qu'une diminution croissante et continue de leurs dimensions. Les premiers champs d'application du circuit intégré concerneront l'informatique bien sûr, mais aussi et surtout les systèmes d'armes avancés, les missiles tactiques et stratégiques, les propulseurs spatiaux et les satellites espions. Les décennies 50 et 60 seront celles de la guerre froide. Pendant plus de vingt ans l'évolution

tout à la fois intriquée et symétrique des industries informatique et microélectronique s'est déroulée sur fond de course effrénée aux armements thermonucléaires et aux vecteurs spatiaux, entre l'UR.S.S. et les Etats-Unis. L'informatique a joué un rôle prépondérant tout au long de cette confrontation d'envergure planétaire. Omniprésent dans toutes les dimensions et à tous les niveaux de ce conflit idéologique formidable, l'ordinateur a entre autres choses permis de réaliser d'immenses progrès dans les secteurs de l'armement, des technologies spatiales, du renseignement, du guidage, etc. Ce contexte d'intenses tensions géostratégiques vit les deux superpuissances en lice se livrer à un bras de fer politique, militaire et économique sans précédent. Les Etats-Unis d'Eisenhower, de Kennedy et de Nixon – on pourrait tout aussi bien ajouter ici Reagan - mobilisèrent sans relâche des ressources financières, matérielles et humaines considérables pour emporter cette guerre où la course à la lune ne représenta certainement pas la moins décisive des batailles. Nous nous emploierons alors à démontrer comment et pourquoi l'ordinateur fut l'un des grands vainqueurs de cette époque tourmentée où la triangulaire université/gouvernement/ armées joua à plein, avec des moyens à peine croyables.

La troisième partie de notre travail de recherche sera consacré aux trois informatiques. Nous parcourrons la première informatique - celle des prototypes et des grands mainframes scientifiques, gouvernementaux et industriels – en nous intéressant à ses problématiques, ses caractéristiques et ses enjeux propres. L'étude détaillée d'un certain nombre d'ordinateurs mis au point en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis entre 1944 et 1955 nous sera ici d'une aide extrêmement précieuse. Nous nous intéresserons ensuite à la deuxième informatique. Le coût extrêmement élevé des ordinateurs, associé au fait qu'il était nécessaire de disposer en quasi permanence d'une équipe de techniciens qualifiés pour les utiliser et les maintenir fit que dans un premier temps, seules les organisations gouvernementales, industrielles et scientifiques qui possédaient d'importants moyens financiers purent en disposer et faire usage. La monopolisation de l'outil informatique par des structures étatiques – dont de nombreuses agences de renseignement - et de puissantes corporations industrielles aboutit à une concentration et à une confiscation pures et simples de l'information. La deuxième informatique correspondit donc à une période caractérisée par une méfiance accrue des populations à l'endroit de l'ordinateur, cette machine mystérieuse et complexe qui paraissait devoir être le seul apanage de l'état et des grands groupes industriels et commerciaux. Nous explorerons ces lignes de force en prenant toujours en compte les innovations technologiques réalisées à la fois dans le secteur de la microélectronique et de l'informatique. Ainsi nous verrons qu'au cours de la même période, l'industrie informatique commença véritablement à

s'organiser, à se diversifier et à produire certains des concepts et des matériels qui rendirent finalement possible l'avènement de l'informatique personnelle, une dizaine d'années plus tard. Sur fond de guerre au Vietnam et de contestation sociale montante, nous verrons pour quelles raisons et dans quelles circonstances exactes le mini-ordinateur, le principe du *time-sharing*, les premiers réseaux informatiques (militaires et civils) et le langage de programmation BASIC ont vu le jour. Nous nous intéresserons également à la montée en puissance et à l'autonomisation du logiciel.

Nous avons consacré la troisième et dernière partie de notre recherche à la micro-informatique. Trouvant ses différents points d'ancrage – notamment théoriques et technologiques – dans les deux informatiques qui l'ont précédée, la troisième informatique – celle de la libéralisation de l'information et de la diffusion massive de l'ordinateur dans les différentes strates de la société - trouvera dans l'Amérique contestataire ainsi que dans l'enthousiasme et l'inventivité des communautés de hackers et d'amateurs d'électronique le sol fertile nécessaire à son apparition, à son développement et, finalement, à sa spectaculaire explosion. À bien des égards, la troisième informatique sera l'antithèse de la seconde. Elle se constituera essentiellement contre cette dernière, contre ses pratiques, ses valeurs et sa philosophie favorisant la centralisation et la mise sous secret de l'information. Par certains de ses aspects – notamment l'ingéniosité que manifestèrent certains des pionniers du micro-ordinateur – la troisième informatique n'ira d'ailleurs pas sans nous rappeler les temps épiques de la première informatique. Cette période sera bien évidemment marquée par un certain nombre d'évènements technologiques décisifs – comme l'invention du microprocesseur, la mise au point des mémoires à accès aléatoire en silicium et la création des systèmes d'exploitation à interface graphique – ainsi que par plusieurs importants phénomènes de fond, comme le désengagement progressif du Département de la Défense américain dans le secteur informatique, la montée en puissance des réseaux et de l'industrie du logiciel, et, bien sûr, la constitution de la micro-informatique d'abord comme un loisir pour passionnés et ensuite comme une industrie grand public. Nous suivrons tous ces et achèverons notre réflexion au tout début des années 80.

Notre nous proposons, modestement, de parcourir l'histoire de l'informatique en tentant d'en comprendre les dynamiques fines et globales et d'en repérer les moments essentiels, c'est-à-dire les phases de rupture, d'avancée et de mutation fondamentales. En même temps que nous sillonnerons ce continuum éminemment dense et enchevêtré, nous tenterons de prendre la mesure exacte de l'impact que les technologies informatiques ont eu sur nos sociétés actuelles. Nous chercherons ainsi à voir pourquoi et comment l'ordinateur et,

plus largement, les technologies informatiques, se sont transformés tout en nous métamorphosant radicalement, nous et notre aptitude à appréhender et à comprendre le monde, au cours de ces 60 dernières années.

Partie 1

Qu'est-ce qu'un ordinateur ?

« Les machines, avec leur irréfutable logique, leurs chiffres d'une froide précision, leurs inlassables observations, parfaitement exactes, et leur connaissance absolue des mathématiques, pouvaient traiter n'importe quelle idée, aussi simple que fût son commencement, et atteindre la conclusion. Les machines avaient le type d'imagination idéal, la capacité de construire un avenir nécessaire à partir d'un fait présent. L'Homme, lui, avait une imagination d'un type différent : l'imagination illogique et brillante qui ne voit que vaguement l'avenir, sans connaître ni le pourquoi, ni le comment ; une imagination qui surpasse la machine et sa précision. L'Homme pouvait parvenir plus rapidement à la conclusion, mais la machine finissait toujours par l'atteindre, et sa conclusion était toujours la bonne. L'homme progressait à pas de géant. La machine, elle, avançait à pas réguliers et irrésistibles. »

John W. Campbell, Jr.

Avant propos.

Aujourd'hui, peut-être plus que jamais, on trouvera sûrement matière à reprocher à la pensée philosophique, et, par voie de nécessaire conséquence, à celui qui a choisi d'en faire profession, de réserver plus volontiers et plus souvent la primauté de son travail de réflexion au domaine presque impalpable des mots et des idées plutôt qu'à celui, bien tangible, des choses qui l'entourent. Des choses qui, *tous*, nous et les sociétés humaines que nous formons, nous entourent, nous pénètrent, nous façonnent et nous déterminent. Ainsi, et d'une certaine façon, le philosophe serait « coupable ». « Coupable » de s'appliquer, avec une assiduité et un dévouement presque exclusifs qui jamais ne semblent vouloir céder à l'épuisement, à la conduite de cet effort incessant de pénétration, de compréhension, qu'exige nécessairement l'appréhension des figures souvent abscones qui, dans la sphère du conceptuel, du pur intellect, lui ont été léguées par ses fameux prédécesseurs. « Coupable » aussi parfois d'en sécréter de nouvelles – toute aussi abstruses et détachées de l'espace humain expérimenté au quotidien – afin de prolonger les contours des anciennes ou, au contraire, de marquer sa rupture avec elles. Il serait « coupable » enfin de ne jamais manquer de souffle lorsqu'il s'agit de revenir, pour la penser et la repenser encore, à la chronique deux fois millénaire de sa propre discipline et de faire montre en même temps d'une attitude étonnamment frileuse dès lors qu'il est question de s'aventurer hors des sentes balisées, des chemins maintes fois parcourus, dont, de fait, il est si coutumier. Bien éloignée de nous l'idée, il va de soi déraisonnable, indéfendable, qui consisterait à soutenir que le philosophe se doit d'abandonner purement et simplement son illustre et inépuisable héritage disciplinaire : nous n'avons en effet jamais douté du fait que les voies ouvertes et balisées avec tant de génie et d'acharnement par nos devanciers recelaient encore bien des trésors dont la découverte ou la redécouverte, à coup sûr fondamentales, demeuraient à faire. Toute aussi insensée cependant serait aujourd'hui l'attitude qui consisterait, pour une très grande majorité des membres de la communauté philosophique, à choisir de ne pas vouloir réduire cet écart peut-être protecteur, peut-être effectivement nécessaire à la bonne conduite et à la tranquillité de la démarche réflexive, qui, quelquefois, a eu malheureusement pour effet de les maintenir encore et toujours à distance d'un monde dans lequel pourtant, eux aussi, ont à conduire non seulement leurs recherches mais aussi leurs propres expériences ordinaires. Bien entendu, nous ne cèderons pas ici à la tentation douteuse et inopportune qui consisterait à invoquer la figure à la fois mythique et caricaturale du métaphysicien retranché dans sa tour d'ivoire,

précautionneusement séparé des perturbations induites par le monde sensible et volontairement égaré, peut être à jamais, dans les innombrables voies labyrinthiques qui se dessinent dans la sphère eidétique. Car le philosophe, s'il a jamais été un pareil individu, a cessé de l'être depuis longtemps. Qu'il consente alors à infléchir son regard en direction de sa propre contemporanéité, en direction de l'univers humain et technique qui, de fait et inévitablement, est le sien: c'est un monde changeant, convulsé, toujours en plein bouleversement, sujet à de colossales mutations sociales et techniques qui n'épargnent ni ses tréfonds, ni ses espaces interstitiels les plus infimes, les plus éloignés, les plus protégés, qu'il rencontrera. Un monde où le temps et l'espace ont été repliés, concentrés, compactés jusqu'à se trouver presque réduits aux improbables dimensions du ponctuel et de l'instantané. Un monde dont la physionomie, le relief et la matière – qu'elle soit inerte ou animée - se sont vus pénétrés et modelés en profondeur et sans répit par le paradigme informationnel initié, il y a quelques soixante années de cela, par les travaux issus de la première cybernétique et ceux de l'informatique naissante. L'acte de venue au monde de l'ordinateur digital fut officieusement signé alors que le brasier de la deuxième guerre mondiale dévastait la planète : on l'utilisa d'abord, alors qu'il n'était encore qu'un Titan électromécanique bruyant, volumineux et dépourvu de mémoire interne (Colossus), pour essayer de décrypter les messages ennemis interceptés par radio, spécialement ceux qui avaient été chiffrés au moyen de versions perfectionnées de la fameuse machine inventée et commercialisée dès 1918 par la firme allemande Scherbius et Ritter, *Enigma*. Il fut également employé à cette époque pour calculer de nouvelles tables balistiques destinées à améliorer la précision des tirs d'artillerie ou pour neutraliser les fréquents phénomènes d'oscillations perturbatrices qui grevaient alors l'efficacité des batteries de D.C.A. Puis son extraordinaire puissance, son incroyable vitesse, furent mises au service de la construction d'armes de destruction massive dont le pouvoir de dévastation était sans aucun précédent connu dans l'histoire humaine. Des armes terrifiantes qui devaient mettre un point final à un conflit mondial qui avait duré six ans et ouvrir sur la définition d'un nouvel équilibre géostratégique planétaire qui menaça, durant près de cinquante ans, de s'effondrer. Mais la fragile stabilité, contre toute attente peut-être, s'avéra tenir. Les deux blocs rivaux, durant cette longue période, n'eurent de cesse de renforcer, d'améliorer et d'augmenter les capacités et la portée de leurs vecteurs de frappe nucléaire, avec toutes les extraordinaires conséquences que l'on sait en ce qui concerne le domaine de la conquête spatiale. Les ordinateurs, devenus désormais incontournables à une époque tissée de mortelles incertitudes, où la dialectique de l'épée et du bouclier s'était formidablement accélérée jusqu'à venir faire planer de façon permanente le spectre de la vitrification sur la

planète entière, bénéficièrent eux aussi de considérables perfectionnements. Le 30 juin 1945, John von Neumann, alors membre de la prestigieuse *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie définit, dans un article devenu mondialement célèbre - le *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.* - l'architecture qui devait être celle, tout du moins jusqu'à aujourd'hui, de tous les ordinateurs. Bien entendu, les composants utilisés pour leur construction ne demeurèrent pas les mêmes : les encombrantes bascules électromécaniques cédèrent la place aux fragiles tubes à vide, eux-mêmes bientôt remplacés par des éléments transistorisés à base de germanium, puis de silicium. On gagna donc en vitesse de calcul et en capacité d'intégration, mais l'architecture définie par von Neumann il y a cinquante-six ans maintenant persista toujours dans son identité. Dès lors que nos calculateurs digitaux furent dotés, de manière toujours plus efficace, de capacités de communication fiabilisées, la surface, mais également les multiples trajectoires orbitales de notre globe, se parèrent graduellement, cumulativement, de complexes manteaux réticulaires inter-communicants en perpétuelle extension. Ces réseaux – guerre froide oblige - furent initialement définis, mis en œuvre et exploités à des fins presque exclusivement militaires (intelligence, surveillance et interdiction de l'espace aérien, centres de commandement stratégiques distribués avec A.R.P.A.NET). Puis les technologies qui avaient été spécifiquement élaborées pour assurer la construction et le bon fonctionnement de ces dispositifs à la fois défensifs et offensifs investirent progressivement, mais sous des formes dérivées, presque méconnaissables, les sphères industrielles et financières et finirent par diffuser dans la société civile. L'ordinateur, le micro-ordinateur, la téléphonie cellulaire, la télévision, les liaisons satellitaires en tous genres ou encore Internet ne sont ainsi que les émanations techniques certes tardives, certes « civilisées », d'artefacts formidables qui furent conçus afin de permettre directement ou non l'anéantissement de l'adversaire lors de titanesques conflits armés dont l'un s'est soldé par la perte de dizaines de millions de vies et l'autre, fort heureusement, ne s'est jamais ouvertement déclaré. Dès le départ, tout du moins en ce qui concerne l'ordinateur, il s'est ainsi toujours agit de gouverner, de commander, bref, de décider (ou en tout cas d'accélérer et de faciliter le processus de décision dans des conditions extrêmement sensibles). A force de les voir si proches, si disponibles, à force de les utiliser et de les remplacer pour des versions encore et toujours plus performantes et miniaturisées, peut-être avons-nous fini par perdre de vue le fait essentiel que tous ces objets, devenus aujourd'hui tout aussi banals qu'indispensables, sont fondamentalement enfants d'efforts de guerre sans précédents. Peut être avons-nous aussi oublié que ces derniers, aussi insignifiants qu'ils puissent effectivement paraître, constituent pourtant à n'en point douter les piliers et les vecteurs de propagation, à la fois discrets et

innombrables, du dévorant processus d'internationalisation des échanges – la mondialisation – qui touche aujourd'hui l'ensemble de notre planète. Nous n'entendons pas ici exagérer l'importance du rôle que peuvent bien jouer ces objets dans un pareil processus en allant jusqu'à en faire, pour ainsi dire, ses silencieux agents. Mais nous n'entendons pas non plus sous-estimer ou par trop minimiser ce rôle. Car, après tout, d'où cette moderne Babel Marchande en cours d'élévation tire-t-elle toute sa formidable puissance ? De quelle nature est le ciment qui en assure à la fois cohésion et force de diffusion ? A quelle source miraculeuse vient-elle s'abreuver pour se voir, jour après jour, renforcée et dressée de la sorte ? Pour répondre à ces questions, que l'on se tourne tout simplement vers nos propres sociétés et, surtout, que l'on considère un instant les définitions que nous-mêmes sommes disposés à en donner. Le plus souvent, on entendra alors évoquer la société de l'information, ou, ce qui revient quasiment au même, la société de la communication. Cernés d'objets communicants, en permanence sollicités et saturés par d'interminables flux d'images, de sons, de textes qui ne cessent d'enfler, pressés encore de recevoir l'information ou de diffuser celle-ci par tous les moyens disponibles – et ils ne manquent pas – les hommes ont fini par accepter comme allant de soi le fait de définir les groupes sociaux auxquels ils appartiennent – et donc de définir leur propre identité, leur propre humanité - en les rangeant sous l'étendard unique de l'information. Entité aussi impalpable qu'ubiquitaire, tout aussi capable de représenter de colossales sommes d'argent qui jamais ne seront sonnantes et trébuchantes que d'improbables univers virtuels où l'on peut mourir mille fois, l'information, aux vitesses que lui prêtent l'électronique et la photonique, parcourt subtilement et sans discontinuer la quasi totalité de nos lieux de vie. En les envahissant de la sorte, elle en altère les structures profondes, tout de même qu'elle bouleverse forcément et radicalement les modalités relationnelles qui lient ceux qui les fréquentent, les habitent. Les fluctuations du tout informationnel, pour le meilleur ou pour le pire, rythment et travaillent ainsi en permanence la texture de plus en plus composée et resserrée de cet espace humain ultratechnicisé et en incessante transformation dans lequel tous nous avons à vivre. Le philosophe véritablement soucieux de son monde, de sa communauté, n'aura de cesse à vouloir remplir parfaitement son rôle qui, nous le croyons, est plus que jamais celui d'un veilleur en même temps qu'il est celui d'un guide. En cela, il ne pourra se soustraire à la tâche – certes colossale et sûrement de longue haleine - qui consiste à accepter de penser les profondes mutations techniques et sociales, mais elles sont forcément liées, qui ébranlent littéralement les fondements de son univers et métamorphosent si profondément la nature même des relations que ses semblables entretiennent les uns aux autres. S'il souhaite parvenir à appréhender son monde, et cette tension uniformisante qui le traverse et le travaille

aujourd'hui si intimement, il n'aura d'autre choix que de se tourner vers la technique et les objets toujours plus perfectionnés qu'en permanence elle secrète. L'objet technique, et tout particulièrement l'ordinateur, n'est pas cet outil neutre qu'on voudrait parfois qu'il soit. Plongé au cœur de l'espace humain, il n'y est nullement étranger. Sa diffusion massive, son emploi systématique sont tout sauf indifférents. Certes l'homme, patiemment, en trace les délinéaments, il en façonne la matière, en améliore sans cesse les performances, en définit et en affine les applications. Il est celui qui détermine sa *causa finalis* en même temps qu'il est sa *causa efficiens*. Mais l'être technique, une fois finalisé, une fois opérationnel, une fois libéré dans l'espace social, ne vient pas s'y situer en une posture de parfaite neutralité, de pure disponibilité. Certes il se trouve là, posé, immobile, toujours prêt à être utilisé pour réaliser une tâche particulière à un moment donné et être à nouveau abandonné, momentanément, lorsque celle-ci se trouve accomplie. Mais ce serait grandement se fourvoyer que de croire que cette utilisation, surtout lorsqu'elle est généralisée, surtout lorsqu'elle est systématisée, laisse totalement intacts ceux qui s'y livrent. L'objet technique, en retour, par effet de rétroaction, touche celui qui l'utilise. Il modifie sa perception, la représentation qu'il se fait du monde qu'il habite. Il altère la manière dont il se rapporte à son univers, la façon dont il se comporte vis-à-vis des autres, la façon dont il se perçoit lui-même. L'ordinateur fait partie, nul n'en doutera, de cette classe d'objets techniques dont l'avènement et la diffusion généralisée ont littéralement transfiguré notre monde en même temps qu'ils nous ont transformés à jamais. Comprendre l'économie intime de cet artéfact étonnant, repérer ses métamorphoses, retracer son histoire tumultueuse, identifier et penser ses formidables potentialités et déceler les menaces dont il est gros constituent autant d'étapes nécessaires sur une des nombreuses voies qui nous mèneront finalement, nous osons le croire, à la compréhension de ce monde kaléidoscopique qui est le nôtre. En ceci au moins, le fait de vouloir rapprocher philosophie et informatique, n'est pas, pour reprendre le mot de François Dagognet, « frauduleux ». Peut-être y a-t-il même, bien que nous répugnions véritablement à employer ce mot, urgence à le faire.

Les problématiques auxquelles nous nous intéresserons dans le cadre de cette réflexion seront principalement commandées par la figure, désormais inévitable, de l'ordinateur digital. Il s'agira en effet pour nous de tenter de comprendre ce qu'est l'ordinateur, d'essayer de défaire l'écheveau embrouillé de son incroyable épopée, de saisir, enfin, comment il a modifié en profondeur notre représentation du monde, des autres, de nous-mêmes. Cet artéfact constituera ainsi le centre de gravité, le point d'origine et celui d'aboutissement de toute notre entreprise philosophique. Peut-être s'étonnera-t-on du fait que nous ayons choisi de placer

notre démarche sous l'égide de la méthode archéologique ? N'y a-t-il pas là en effet quelque contradiction à vouloir ainsi appréhender un domaine technique apparemment fort récent, en tout cas bien actuel, en faisant usage d'un *logos* qui, par définition, concerne précisément et au premier chef un domaine qui n'est autre que celui de l'*arkhaios* ? Car qu'est-ce donc au juste que l'archéologie sinon une discipline qui vise, en mettant patiemment et délicatement à jour les vestiges d'un passé depuis longtemps enfoui, à saisir et à comprendre ce que furent, en des époques oubliées et dans des registres tels que le social, le religieux ou l'« industrie », les activités humaines ? L'ordinateur, ce joyau technologique désormais omniprésent qui n'en finit plus d'opérer ses métamorphoses fabuleuses jusque sous nos yeux est-il ainsi vraiment justiciable d'un tel traitement ? Peut-il être livré à une approche tout entière tendue vers le vestigiel, toute entière orientée vers l'enseveli ? On se tromperait sûrement en affirmant le contraire ! Car l'ordinateur, en tout cas les idées qui permirent effectivement son surgissement et son avènement, sont fort anciennes. Certaines le sont au moins autant que les premières tentatives connues qui furent faites afin de permettre la mécanisation du calcul. Pourtant, on verra fréquemment associé à l'ordinateur, tout du moins à l'ordinateur digital électronique, le nom de John von Neumann. C'est là un fait historique pleinement avéré qui, d'un certain point de vue, ne saurait être contesté. Mais John von Neumann n'est nullement le père de l'ordinateur. Il en a certes, avec tout le génie qui le caractérisait, cristallisé les lignes architecturales dès 1945 mais, contrairement à ce que l'on entend parfois affirmer avec légèreté ou bien ingénuité, il ne l'a pas créé. Croire cela, ce serait méconnaître les rôles absolument fondamentaux que jouèrent dans sa conception John Prosper Eckert et John Mauchly. Ce serait aussi négliger l'influence essentielle qu'exercèrent sur les géniaux concepteurs d'E.N.I.A.C. des hommes tels que John Vincent Atanasoff et Clifford Berry. Ce serait encore oublier les travaux annonciateurs de Konrad Zuse, le théorème de limitation et la machine logique d'Alan Turing, l'algèbre de Georges Boole, les merveilleuses réalisations de Wilhelm Schickard, de Blaise Pascal, de G.W. Leibniz, de Samuel Morland, de Charles Babbage, ou bien encore celles de René Grillet. L'histoire de l'ordinateur ne débute pas brutalement avec l'achèvement de la deuxième guerre mondiale. Sa concrétisation, au milieu du XX^{ème} siècle, est la résultante d'un croisement de faisceaux de circonstances historiques exceptionnelles, de découvertes logico-mathématiques remarquables et de progrès techniques sans précédents. Mais ses racines véritables plongent dans des couches plus anciennes, plus ensevelies, de l'histoire de l'Humanité. Quiconque prétendra comprendre ce qu'est véritablement l'ordinateur trouvera ainsi dans l'approche archéologique un outil précieux.

1. *Calculators, computers, calculateurs et ordinateurs.*

1.1.1. De la provenance des termes *Calculator, Computer* et *Calculateur.*

Le substantif « ordinateur » a été introduit - et non créé - dans le domaine informatique en 1955 par Mr. Jacques Perret⁶⁶, alors professeur de latin à la Sorbonne, à la demande de la filière française de la firme américaine I.B.M. L'année suivante, cette entreprise devait déposer légalement cette appellation. L'origine du mot « ordinateur », dont on connaît l'heureuse fortune actuelle, peut ainsi être aisément déterminée. Il s'agit en fait d'un néologisme⁶⁷ dont l'élaboration a été initiée en raison de motivations essentiellement commerciales. Il n'était bien sûr pas question, à l'époque, d'invoquer une quelconque forme de protectionnisme linguistique pour justifier une pareille initiative. Les motifs permettant de rendre compte de cette création débordent également, comme nous ne manquerons pas de le démontrer, les problèmes pouvant effectivement se poser à une société qui souhaite exporter une gamme de produits à l'étranger et qui se trouve de fait obligée d'en traduire la dénomination ou l'appellation initiales dans la langue du pays où ces objets doivent faire l'objet d'une commercialisation. Le terme d'« ordinateur » est en effet porteur d'enjeux qui dépassent, et de loin, la seule question de la transcription d'un mot d'une langue dans une autre, fût-ce seulement pour des prétextes mercantiles. On peut certes concéder que les termes de *calculator*, de *computer* ou de *data processing machine*, alors concurremment en usage aux Etats-Unis⁶⁸ et en Grande-Bretagne pour désigner les dispositifs que nous appelons depuis maintenant plus de 45 ans « ordinateurs », auraient été peut-être bien peu susceptibles d'éveiller instantanément l'intérêt des consommateurs potentiels présents alors sur le marché

⁶⁶ La lettre qu'adressa Mr. Jacques Perret à I.B.M. France pour proposer l'usage du mot *ordinateur* est précisément datée du 16 avril 1955.

⁶⁷ Le mot « néologisme » revêt couramment deux significations distinctes : celle d'acception nouvelle d'un mot et celle de création d'un mot. Nous l'entendons ici au premier sens.

⁶⁸ A la page 207 d'*Une histoire de l'informatique*, [Breton 1990], M. Philippe Breton écrit que le mot *ordinateur* fut « proposé par le professeur Jacques Perret en 1955 à la demande d'I.B.M. France pour remplacer l'impropre « calculateur », de la même façon que *computer* avait remplacé *calculator* ». Comme nous ne manquerons pas de le démontrer, cette interprétation nous paraît être exagérément simplificatrice et partiellement erronée. M. Breton semble en effet suggérer ici qu'à cette époque le terme *computer* avait déjà supplanté, outre-atlantique, l'usage du mot *calculator* (calculateur). Il n'en est rien. Si John von Neumann parlait dès 1946 de *very high speed automatic digital computing system* (en définissant les spécificités logico-techniques caractéristiques de ces systèmes), tandis qu'Eckert et Mauchly choisissaient de nommer leurs machines commerciales *computers*, I.B.M. ne recourut que très tardivement à ces appellations, leur préférant pendant longtemps encore des dénominations telles que *automatic calculators* ou *sequence controlled calculators*. L'objet de ce chapitre est de démontrer pourquoi il en fut ainsi.

français. Pourtant tous ces mots possédaient alors un équivalent en français. Ainsi, il aurait été possible, et même aisé, de traduire *calculator* par « calculateur » ou « calculatrice⁶⁹ ». Il aurait été pareillement tout à fait concevable et acceptable, encore une fois, de transcrire le vocable *computer*⁷⁰ par « calculateur ». Quant à l'expression *Data Processing Machine*, un peu plus encombrante il est vrai, son sens aurait néanmoins pu être assez fidèlement restitué en usant d'une formule telle que « *machine destinée au traitement de données* ». Aucune de ces solutions, en apparence également recevables, ne fût pourtant retenue par I.B.M. Au regard de cela, on serait peut-être tentés de supposer que le constructeur américain renonça à recourir à ces termes pourtant préalablement disponibles dans le lexique français car il souhaitait dès le départ se trouver en possession d'une désignation susceptible de faire l'objet d'un dépôt autorisant un droit d'exploitation exclusif. Or des termes participant du vocabulaire courant d'une langue vivante n'auraient sans nul doute pas manqué d'ouvrir sur des questions juridiques considérables pour quiconque aurait envisagé de les déposer dans un but spécifiquement commercial. Pourtant, comme le rappelle J. Ramunni⁷¹, c'est à la demande expresse de Mr. Jacques Perret qu'I.B.M. déposa en 1956 le mot « ordinateur » en vue de le protéger à titre d'appellation contrôlée. On peut donc légitimement présumer, sans bien sûr se risquer à mésestimer les compétences du département *marketing* déjà fort aguerris de cette firme, qu'I.B.M. n'avait pas l'intention, tout au moins originellement, de protéger le ou les termes français qui devraient être d'une façon ou d'une autre substitués à l'anglais *calculator* ou *computer*. Il est aussi permis de supposer que le fabricant avait très certainement envisagé la possibilité d'user de mots tels que « calculateurs » pour désigner ses machines. Pourtant, cette désignation, à l'instar d'ailleurs de celles qui étaient également envisageables, ne fut pas sélectionnée. I.B.M. recourut finalement aux services d'un latiniste issu de l'Université pour forger *ad hoc* une nouvelle acception au mot « ordinateur », laquelle n'existait auparavant pas dans la langue française. On peut à partir de ce point s'interroger sur la nature des motivations qui ont réellement conduites cette firme de notoriété internationale à agir de la sorte. Etait-il

⁶⁹ Ce terme est toutefois utilisé en français pour désigner ce que les américains appellent *Hand-held-calculator* (ou calculateur de main ou de poche). Selon la définition triviale qu'en donne le *Petit Larousse 2000 Grand Format*, une *calculatrice* est une petite machine qui effectue de façon automatique des opérations numériques. Une des toutes premières calculatrices de poche jamais produites fut le *SR-10 calculator* de *Texas Instrument* (également nommée *slide rule calculator*). Elle fut mise sur le marché en 1971 et fut suivie en 1972 par l'introduction de la HP-35) de Hewlett Packard (le clavier de cette HP possédait 35 touches). Ces dates sont de toute façon bien postérieures à celle où fût effectivement introduit le mot *ordinateur*.

⁷⁰ A la suite de la promulgation de la loi du 4 août 1994 relative à l'emploi de la langue française, (connue sous le nom de loi «Toubon», et qui fut substituée à la loi du 31 décembre 1975 dont elle élargit le champ d'application et renforce les dispositions), le terme *computer* a été francisé. On peut désormais parler de *ordinateur*. Notons cependant que l'acronyme P.C., qui signifie *Personal Computer*, est une dénomination extrêmement courante, y compris en français, pour désigner un ordinateur personnel.

⁷¹ [Ramunni 1989], pp. 17-18.

seulement question de prévenir les imbroglios juridiques que soulèverait très vraisemblablement une démarche visant à s'appropriier, pour une finalité commerciale clairement revendiquée, des mots relevant du vocabulaire ordinaire en procédant de cette manière ? S'agissait-il au contraire, en créant de toutes pièces un terme original et spécifique pour les dénommer et les différencier, de s'efforcer de souligner le caractère inaugurateur, réellement inouï, de ces machines d'un nouveau type ? D'optimiser plus encore, par l'intermédiaire de ce procédé finalement assez peu dispendieux, l'impact publicitaire que pourrait avoir leur introduction effective sur d'éventuels acquéreurs ? Peut-être conviendrait-il effectivement de ne pas écarter trop vite ces différents facteurs explicatifs afin de rendre compte du choix terminologique pour lequel opta en définitive *I.B.M*⁷². Il faudrait cependant veiller à leur assigner le rang qui fut véritablement le leur concernant la part active qu'ils ont pu prendre dans le développement de ce processus. Ainsi, et tout au plus, serions-nous alors en mesure de les convoquer à titre de raisons d'ordre secondaire. Car les causes fondamentales qui ont amené le constructeur américain à opter pour le terme « ordinateur » afin de nommer en français ses calculateurs électroniques ne sauraient aucunement se voir réduites à ces seules explications. Elles renvoient en fait directement et conjointement à l'histoire du calcul, à celle des individus qui étaient en charge de son effectuation, à celle des machines destinées à le faciliter ou à l'effectuer de manière automatisée, et à la perception que pouvait avoir de ces dernières le grand public de l'époque.

Originellement les termes anglo-américains *computer* et *calculator* n'étaient pas, cela va de soit, directement liés aux machines électroniques qu'ils servent à désigner couramment aujourd'hui. Le mot *computer*, qui procède étymologiquement des termes latins *compūto* et *compūtātōr*, respectivement « calculer », « compter », et « calculateur », fut primitivement employé pour désigner une personne dont l'activité sociale impliquait principalement l'effectuation de tâches de nature calculatoire. On retrouve par ailleurs cette notion centrale d'un individu principalement employé au calcul dans l'ancien terme français *computiste*. Le *computiste* est ainsi « celui qui travaille à dresser le calendrier ecclésiastique⁷³ ». Ce calcul, dont la finalité consistait spécifiquement à établir les dates des fêtes mobiles dans le

⁷² Ainsi trouve-t-on la phrase suivante à l'entrée « Ordinateur » du *Dictionnaire des Sciences* (M. Serres, N. Farouki et Al., *Le Trésor, Dictionnaire des Sciences*, Paris, Flammarion, 1997, p. 669) : « Tombé en désuétude, il [le mot ordinateur] a été exhumé en 1956 par un écrivain français, Jacques Perret, sollicité par un fabricant américain d'ordinateurs de bureau, soucieux de franciser les dénominations de ses produits pour s'implanter plus facilement dans notre pays. » Concernant les raisons véritables de la création du mot *ordinateur*, cette allégation est certes nécessaire, mais elle n'est pas suffisante.

⁷³ Raoul Mortier et Al., *Dictionnaire Encyclopédique Quillet*, Librairie Aristide Quillet, Paris, 1934, Vol. C^{hat} E, p.945.

calendrier⁷⁴, se nommait *comput*, tandis que le verbe permettant de désigner cette opération était *computer*. Le terme *calculator*, quant à lui, se trouve également être dérivé du latin : le *calcŭlātōr*, ou calculateur, est « *celui qui dresse, qui tient les comptes*⁷⁵ ». Il est aussi celui « *qui enseigne à compter*⁷⁶ ». Le mot *calcŭlus* sert lui à signifier le calcul, le compte, mais aussi la pierre, le caillou (entre autres moyens d'aide au calcul, précisons ici, s'il est besoin, que les romains se servaient de petits cailloux pour compter). Quant au vocable *calcŭlātō*, bien qu'il renvoie premièrement à la concrétion pierreuse susceptible de se former dans un organe ou un canal, son sens second demeure toujours celui d'un calcul, d'un compte. A partir de l'énonciation de ces quelques données d'ordre étymologique, il nous est d'ores et déjà possible de repérer à quel point les termes qui servaient ou servent encore aujourd'hui à nommer nos automates électroniques proviennent de mots fort anciens. Plus que cela, nous nous trouvons également en mesure de découvrir à la racine primitive de ces vocables quatre notions fondamentales et partagées – presque entremêlées - qui, du point de vue définitionnel, viennent régulièrement coexister les unes avec les autres:

1. La notion de calcul ou de compte : centrale, elle se trouve systématiquement incluse, de manière tout à fait explicite, dans la ou les significations admises couramment pour l'ensemble des termes que nous avons mentionnés ci-dessus.
2. La notion visant l'acte même qui consiste à calculer, à compter : c'est précisément là le sens du verbe latin *compŭto*, du verbe français « computer » ou de verbes anglo-américains tels que *to compute*⁷⁷ et, bien entendu, *to calculate*.
3. La notion d'individu qui s'adonne au calcul (en le pratiquant ou en l'enseignant) : on la relève dans les mots latins *compŭtātōr*, *calcŭlātōr*, puis dans les termes français « computiste » et « calculateur ». Elle est également

⁷⁴ Le comput ecclésiastique, ou plus simplement comput, avait principalement pour objet la détermination de l'époque de la fête de Pâques. La connaissance des méthodes connues sous le nom de *lettres dominicales*, de *nombre d'or*, et d'*épacte* permettait de fixer celle-ci assez facilement.

⁷⁵ F. Gaffiot, *Dictionnaire Latin Français*, Paris, Hachette, 1934, p.243.

⁷⁶ *Ibidem*.

⁷⁷ Daniel Parrochia ne manque pas de le rappeler, le verbe *to compute* possède une portée plus générale, à savoir «calculer» au sens d' «estimer», d' «évaluer». In [Parrochia 1992], p.61.

présente, tout au moins initialement, dans les vocables anglo-américains *computer* et *calculator*.

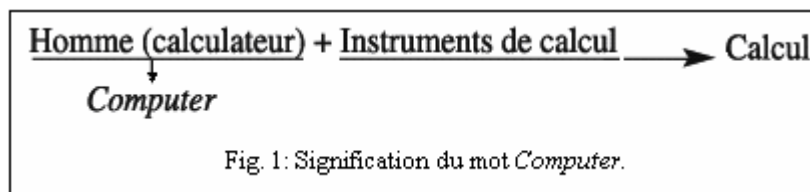
4. L'idée (toutefois moins représentée), d'un dispositif externe élémentaire autorisant celui qui calcule à alléger à la fois la pénibilité de sa tâche et à fiabiliser celle-ci dans le cours même de son procès : la seconde acception du mot *calcūlus* désigne ainsi les cailloux⁷⁸ de la table à calculer qu'employaient autrefois par les romains pour compter.

A l'origine, donc, les mots *computer* et *calculator* – l'anglais et l'américain proposent aussi *reckoner*⁷⁹ à titre synonymique – semblent tous deux signaler un individu affairé au calcul, qu'il s'agisse par ailleurs de son application dans le cadre de tâches concrètes, parfois assez triviales, ou, plus théoriquement, de son enseignement. Toutefois, nous devons préciser que la langue américaine a ensuite introduit une distinction sensible quant au sens précis qu'il faut convenir d'assigner respectivement à ces deux termes dont une étude de la racine latine suffit pourtant à souligner l'extrême proximité sémantique. Le mot *computer* entre en usage régulier dans la langue anglaise autour de l'année 1646 où il est d'abord et seulement employé pour désigner une personne qui fait des calculs, très fréquemment au moyen d'un dispositif auxiliaire. Ce sens se voit néanmoins infléchi vers 1897, date à laquelle on remarque que le mot est usité, notamment dans le numéro du 22 janvier du journal *Engineering*, pour désigner une machine à calculer mécanique. Ce renouvellement sémantique du terme *computer* à la fin du XIX^e siècle préfigure d'une certaine manière la situation problématique qui, en 1946, caractérisera précisément le rapport qu'entretenaient les significations des substantifs *calculator* et *computer* aux machines électroniques qu'ils servaient alors tous deux à désigner. Jusqu'à cette époque, cependant, c'est le sens le plus ancien qui prévaudra généralement, même si nous devons noter qu'il ne cessera de perdre graduellement sa position dominante au profit de l'acception apparue aux alentours de 1897. Ainsi, pour Emerson W. Pugh, mais également pour des auteurs tels que Martin Campbell-Kelly et William Aspray, *computer*

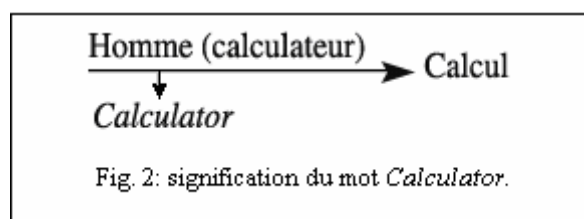
⁷⁸ Il peut s'agir également de cailloux, de pions ou de jetons d'une sorte de jeux de dames ou d'échecs. Cicéron, dans ses *Fragmenta* [F, 5,60], parle de *calculus reducere*, c'est-à-dire de ramener un jeton en arrière. Fabius Quintilianus dans le *De institutione oratoria* [11, 2,38] et Ovide, dans son *Ars amatoria* [2,207 ; 2,478 ; 3, 358], évoquent le fait de le pousser en avant (*promovere*). Étaient aussi nommés *calcūlus* les cailloux utilisés lors de votes.

⁷⁹ *To reckon* signifie compter, calculer, mais aussi juger, estimer ou évaluer. Le terme *reckoner* est fréquemment employé pour désigner une table ou un barème (*ready reckoner*) comportant des calculs déjà effectués. Par extension *reckoner* désigne aussi un calculateur. (Forbes, Holland Smith et Knox, *Harrap's Compact Dictionnaire*, Harrap Books Ltd., Edinburgh, Revised Edition, 1989, p.346).

« was a word primarily used to designate a person who did computing with the help of calculating equipment⁸⁰ » ; il s'agissait donc, autrefois, d'un mot essentiellement utilisé pour désigner une personne qui se livrait à une activité calculatoire avec l'aide d'un équipement de calcul. Son sens répond alors au schéma descriptif suivant :



En conséquence, et si l'on se réfère strictement à la provenance de ces termes, ceci devrait tout naturellement nous amener à concevoir déductivement que le *calculator* était également un individu occupé à une semblable activité de comptage, mais qu'à la différence du *computer*, il n'employait pas de dispositif spécial pour s'assister dans cette occupation. Le schéma permettant de rendre compte de cet état de fait serait alors en toute vraisemblance celui-ci :

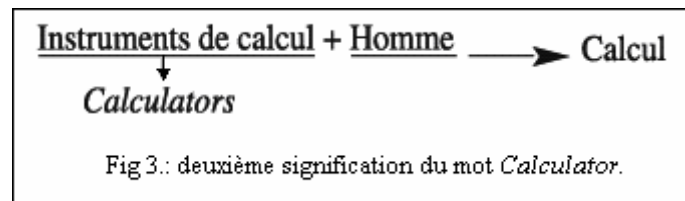


Pourtant, ce serait se méprendre gravement que de supposer cela. Par *calculator*, il faut au contraire strictement entendre un dispositif d'aide au calcul⁸¹, que celui-ci soit au demeurant mécanique, électromécanique ou bien électronique⁸², et non pas un individu qui calcule ou qui compte. Le schéma qui correspond bel et bien au sens consacré du terme *calculator* est par conséquent celui qui suit :

⁸⁰ [Pugh 1995], pp. 142-143. Martin Campbell-Kelly et William Aspray ont intitulé le premier chapitre de leur ouvrage [Campbell-Kelly et Aspray 1996], pp. 9-28, « *When computers were people* ». Ces auteurs y retracent sommairement l'histoire des « *computers humains* » employés notamment à la fin du XVIII^e siècle au calcul des tables de navigation, des tables astronomiques ou encore des tables d'assurance vie.

⁸¹ Michael R. Williams, évoquant successivement les machines mécaniques de Wilhelm Schickard (1592 – 1635) ou celles construites au XIX^e siècle par l'américain F.S.Baldwin ou le suédois W.T. Odhner les nomme *calculators* [Williams 1997], fig. 3-3, p. 123 et p. 147, fig. 3-22. Concernant celles de Blaise Pascal (1623-1662), de G.W. von Leibniz (1646-1716) ou de S. Morland (1625-1695), il parle plus volontiers de *calculating machine* ou de *calculating instruments* (*Ibidem*, fig. 3-6, p.126, fig. 3-13, p. 135 et p. 140).

⁸² Nous aurons bientôt l'occasion de préciser pour quelles raisons et dans quelles circonstances les automates électroniques furent dénommés soit *calculators*, soit *computers*.



Cette acception – l'homme défini en tant que calculateur (*calculator*) - est ainsi tombée en désuétude. Elle a été comme évacuée et oubliée au bénéfice d'une signification purement instrumentale qui était déjà repérable dans le terme latin *calcūlus*. C'est précisément cette dernière qui s'est imposée finalement à l'anglo-américain *calculator*. Une ligne de séparation distinctive existe donc bel et bien entre ces deux vocables. Le *computer*, comme nous venons de le voir, désignant la personne qui calcule au moyen d'un instrument de calcul tandis que le terme *calculator* est spécifiquement utilisé pour signifier les instances relevant précisément de la classe comprenant ces dispositifs. Incidemment, la question de la portée qu'il convient véritablement d'assigner à cette catégorie ne manque d'ailleurs pas de se poser à nous.

1.1.2. Détermination des limites de la classe des calculateurs.

Il paraît admissible, tout au moins dans un premier temps, de proposer comme conditions nécessaires – mais non pas suffisantes - d'appartenance à la catégorie des calculateurs la satisfaction des deux critères suivants :

1. Être un dispositif auxiliaire externe permettant de faciliter et de fiabiliser, en l'accéléralant éventuellement, l'effectuation d'un calcul (addition(s), soustraction(s), multiplication(s), division(s), fonctions logarithmiques).
2. Posséder un degré au moins sommaire d'achèvement technique (ce qui autorise, au moins potentiellement, l'admission de systèmes très élémentaires tout en excluant du même coup des méthodes de calcul s'appuyant exclusivement sur les seules ressources offertes par le corps

humain, comme par exemple le procédé de comptage digital proposé par Pacioli de Venise dans sa *Suma de Arithmetica Geometria*⁸³ [1494]).

La question de l'identification de la borne convenant à la délimitation chronologique supérieure propre à cette série ne se pose guère. L'analyseur différentiel de Vannevar Bush, l'A.B.C.⁸⁴ de John B. Atanasoff et Clifford Berry, les systèmes Z1, Z2, Z3, et Z4 de Konrad Zuse, *Colossus*, *Harvard Mark I* et II, E.N.I.A.C., E.D.V.A.C., l'I.B.M. 701, le système I.B.M. 360 - en fait toutes les machines que nous nommons « ordinateurs » - étaient et sont encore toutes, *fondamentalement*, des calculateurs (au sens de *calculator*). Même si la plupart de ces systèmes fonctionnaient de façon automatisée, limitant ainsi l'intervention humaine à des tâches relevant principalement de la configuration du matériel, de la programmation (parfois, comme c'était par exemple le cas pour E.N.I.A.C., en modifiant la configuration d'une partie importante du câblage de la machine), de l'interprétation des résultats, ou de la maintenance, leur fonction essentielle demeurait l'assistance au calcul⁸⁵, y compris bien sûr dans le cas où l'exécution de ce dernier se voyait intégralement prise en charge. Ce fut par ailleurs la nécessité de s'acquitter de plus en plus rapidement des tâches calculatoires complexes⁸⁶ qui se présentaient en nombre sans cesse croissant dans le domaine militaro-scientifique des années quarante, tout particulièrement aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne, qui précipita finalement l'avènement et la multiplication de ces machines. De ce point de vue, et si l'on accepte de laisser momentanément en suspens la question soulevée par l'emploi du terme *computer* pour les désigner également, elles sont toutes, comme nous l'avons déjà dit, des *calculators*.

Le problème concernant le calage de la frontière chronologique inférieure ouvrant sur cette catégorie d'objets ne se révèle pas aussi aisé à défaire. A partir de quand, en effet, est-on autorisés à parler de calculateurs (*calculators*) dès lors que l'on évoque les premiers systèmes d'aide au calcul ? Si l'on exclut d'emblée du domaine recouvrant l'ensemble de ces instruments les appendices corporels ou même le corps humain dans son entièreté⁸⁷ (lesquels

⁸³ [Williams 1997], p. 49, fig. 2-1.

⁸⁴ Atanasoff-Berry Computer.

⁸⁵ Bon nombre de ces machines furent surnommées à l'époque *numbers crunchers*, c'est-à-dire littéralement «croqueurs de nombres».

⁸⁶ Comme l'analyse harmonique, la résolution de systèmes d'équations différentielles, le calcul de tir des projectiles ou encore la cryptanalyse... Ce genre de computations, toujours plus nombreuses, fastidieuses, et coûteuses en termes de temps d'exécution, était en plus, et de façon exponentielle, très susceptible de se voir entaché d'erreurs.

⁸⁷ Ph. Breton, soulignant le caractère liminaire, originel, du « corps comme auxiliaire de calcul » nous rappelle que « la plupart des civilisations semblent avoir connu la main comme premier auxiliaire de calcul. Il insiste par ailleurs sur les faits suivants : Cette méthode ne se réduisait pas simplement à « compter sur ses doigts » mais

permirent cependant très tôt à l'Homme de compter plus facilement et de manière plus assurée), il demeure pourtant des accessoires ou des dispositifs auxiliaires de calcul, parfois tout aussi extrêmement anciens qu'élémentaires, dont la classification comme calculateurs, ou bien alors l'éviction de cette catégorie d'instruments, ne se révèle guère évidente. *Quid*, en effet, de l'abaque, du boulier, du quadrant ou du compas proportionnel ? Que penser du secteur, des *Bones* ou du *Multiplicationis Promptarium* de John Napier ? Citons encore les règles à calcul... Sont-ce là des dispositifs véritablement susceptibles d'être désignés comme des calculateurs ? Voici en effet des objets spécifiquement destinés à accompagner et à sécuriser des procédures de calcul menées dans le cadre d'activités⁸⁸ fort variées et qui possèdent tous, sans doute possible, un degré variable d'achèvement technique (ils remplissent de ce fait la première condition, et une partie de la seconde, que nous avons définies en page 8 comme étant nécessaires pour qu'un objet puisse être caractérisé en tant que calculateur). Remarquons en plus de cela qu'ils n'exploitent pas, en raison même de leur nature fondamentalement instrumentale, de leur inscription foncière dans la matière inerte (bois, os, métal, etc.), l'ensemble des possibilités calculatoires autrement permises par la seule complexion du corps humain (par là même, ils répondent maintenant intégralement aux exigences exprimées par notre second critère). S'ils continuent donc à solliciter le corps dans le processus de leur mise en œuvre et de leur utilisation, ce n'est que de façon limitée et en vue d'opérer des manipulations élémentaires et répétitives d'ordre essentiellement mécanique (par exemple déplacer plusieurs fois une ou plusieurs petites boules sur une tringle de boulier ou manœuvrer autant qu'il est nécessaire la partie mobile d'une règle à calcul). L'apparition et

incitait au contraire à utiliser toute la richesse architecturale de la main. Lorsque toutes ses parties sont mises à contribution, il est permis des comptes allant jusqu'à plusieurs milliers de fois l'unité ... Une tradition orientale ancienne, mais encore en vigueur au début de ce siècle, permettait aux partenaires d'une transaction commerciale de négocier un prix simplement en se touchant la main ... Le corps tout entier servit parfois d'instrument de calcul... ». In [Breton 1990], pp. 58-59. Même s'il convient évidemment de reconnaître que ces systèmes ou méthodes de calcul étaient étonnamment astucieux et élaborés, exploitant avec une intelligence rare toutes les potentialités combinatoires de la conformation du corps humain qui s'offraient à eux pour permettre avec efficacité l'accomplissement de leur fonction, il n'en demeure pas moins que, conformément aux critères 1 et 2 que nous avons précédemment dégagés en page 8, ils ne sauraient être définis comme des calculateurs. Remarquons par ailleurs que si nous nous référons maintenant au sens ancien du terme calculateur (*calculātōr*), alors le calculateur (« celui qui compte, qui effectue un calcul »), et le dispositif auxiliaire qui lui permet de mener à bien les opérations qu'il entreprend, ne font plus qu'un en un certain sens. Le calculateur est, selon cette acception particulière, l'homme qui calcule, tandis que la méthode qu'il met en œuvre dans le cadre de cette charge vient trouver son lieu de déploiement et d'opérationnalité dans sa propre dimension corporelle. Dans ce cas précis, nous pouvons dire que le procédé de calcul s'instancie, se réalise, dans la chair visible de celui qui effectue le calcul. Un tel individu exécute donc une computation en s'aidant d'un procédé dont le support exclusif n'est autre que son corps. Mais il faut ajouter à cela que c'est l'homme et lui seul qui doit toujours, et uniquement, être nommé calculateur, et non le composé qu'il peut bien venir former avec une méthode dont l'usage, même s'il comporte bon nombre d'avantages, n'a finalement rien d'obligatoire.

⁸⁸ De telles activités de computation relevaient de secteurs aussi diversifiés que le commerce, l'arithmétique, la géométrie, l'architecture civile et militaire, l'établissement du calendrier, la gnomonique, l'astronomie, l'astrologie, la musique, la navigation ou bien la prédiction des marées.

l'usage de tels instruments restreignent ainsi le rôle du corps à celui d'un simple effecteur moteur. Ses composants principaux, ses structures articulées, son étendue, ne constituent désormais plus l'armature ou le support uniques et privilégiés du calcul (bien qu'il faille encore préciser qu'en fonction des zones géographiques et des époques considérées, des dispositifs de ce type et des méthodes de calcul reposant encore sur l'emploi du corps aient pu être utilisés concurremment ou séparément. Comprendons là que l'introduction de l'usage des uns ne supprime pas obligatoirement celui de l'autre). L'abaque, le boulier, et les artefacts « primitifs » qui leur sont fonctionnellement apparentés, libèrent ainsi la corporéité de la charge de l'effectuation et de la rétention momentanée des différentes phases du calcul qui pouvaient être inscrites en elle, sur elle, et ne la mobilisent plus que partiellement dans le cadre de l'exécution obligée des maintes séquences machinales récurrentes que nécessite leur maniement adéquat. L'instrument de calcul, aussi simple de conception qu'il puisse être, passe donc au premier plan de la « scène calculatoire » tandis que le corps, devenu à la fois puissance motrice et opérateur de ce mécanisme, se trouve en fait relégué à son arrière plan. Plusieurs facteurs semblent donc concourir, pour l'instant, en faveur de l'hypothèse qui voudrait que ces instruments puissent être effectivement définis comme des calculateurs (encore une fois, au sens de *calculators*). Ce sont, comme nous l'avons vu, des systèmes possédant une certaine complexité technique. On a en effet à faire ici à des assemblages réalisés dans des matériaux divers, souvent composés, ce qui a pour conséquence directe qu'ils n'empruntent pas à la seule chair en vue de leur fonctionnement. Ils se révèlent de plus être d'un maniement relativement aisé, n'impliquant qu'un nombre restreint d'opérations élémentaires reposant sur une quantité finie de principes computationnels préfixés, lesquelles doivent être réitérées n fois au cours d'un calcul afin de parvenir à un résultat numérique satisfaisant. Ils contribuent ainsi, même si c'est d'une façon extrêmement sommaire, à préfigurer ce que sera la mécanisation le calcul. En outre, ils autorisent un certain degré de certification du calcul et, dans les mains d'un opérateur très entraîné, ils en permettent même une accélération tout à fait stupéfiante. Philippe Breton et Michael R. Williams⁸⁹ rapportent tous deux une anecdote fort intéressante quant à la puissance et à la précision de calcul que pouvait incontestablement offrir le boulier⁹⁰: le 12 novembre 1946⁹¹, le soldat Nathan Wood,

⁸⁹ [Breton 1990], p.60 et [Williams 1997], pp. 53-54.

⁹⁰ Notons que Ph. Breton parle de boulier là où M.R. Williams utilise le terme *abacus*. Ceci s'explique par le fait qu'en anglais et en américain, le terme *abacus* vaut à la fois pour désigner les objets que nous nommons boulier et abaque. Le boulier est un instrument de calcul constitué de boules coulissant sur des tiges tandis que l'abaque (du sémite *abaq*, qui signifie « poussière » et du grec *abax*, qui désigne une surface ou une table), est un dispositif diagrammatique ou un graphique donnant par simple lecture la solution approchée d'un problème numérique. Une des plus anciennes abaquas, ou « tablette de comptage » (*counting board*), connues est la

de l'Armée Américaine d'Occupation (240^{ème} Section Financière des Quartiers Généraux du Général MacArthur), rencontra lors d'un concours de calcul organisé au Japon⁹² Kiyoshi Matsuzake, employé au bureau d'épargne du Ministère de l'Administration Postale Japonaise. Nathan Wood avait été à cette époque consacré comme meilleur opérateur américain de machines à calculer mécaniques mues par électricité. Les critères qui permettaient de déterminer qui serait le vainqueur à l'issue de la compétition incluaient à la fois la vitesse et la précision atteintes lors de l'exécution de calculs de différents types. Le concours comportait à cette fin plusieurs épreuves parmi lesquelles des problèmes d'addition et de soustraction, des problèmes impliquant des divisions et des multiplications d'entiers comportant de cinq à douze chiffres chacun, ainsi qu'un problème complexe consistant en un mélange de ces différentes opérations élémentaires et portant sur quarante-cinq nombres distincts. M. Kiyoshi Matsuzake, équipé d'un *Soroban* (nom de la version japonaise du boulier, voir la figure 4, ci-dessous), battit M. Nathan Wood qui, lui, était pourvu d'une des dernières machines à calculer électriques de bureau disponibles sur le marché. Sur les cinq épreuves que comptait la rencontre, le japonais en remporta quatre, ne concédant qu'une seule et unique victoire à l'américain à l'occasion des questions qui impliquaient spécifiquement la résolution de multiplications⁹³. Cette performance est captivante à plus d'un titre. Des deux systèmes mis en œuvre lors de cette rencontre américano-japonaise que l'on voudra bien supposer amicale, lesquels furent servis par des opérateurs officiellement reconnus comme étant très expérimentés, c'est le *Soroban*, le plus ancien et le plus simple sur le plan technique, qui s'est révélé être finalement, et de loin, le plus compétitif, et ce tant en termes de précision que de rapidité. Il paraît assez peu raisonnable de penser remettre en cause les compétences réelles de M. Nathan Wood (de la même manière qu'il serait absurde de surestimer exagérément celles

tablette de Salmis, qui fut découverte en 1899 sur l'île qui devait lui donner son nom. On suppose qu'elle fut utilisée vers 300 avant Jésus-Christ par les Babyloniens. Le vase de Darius, découvert en Grèce en 1851 et exposé aujourd'hui au Musée de Naples, comporte quant à lui une illustration où figure un homme, très vraisemblablement un trésorier royal, qui utilise pour comptabiliser les tribus apportés pour son Roi par d'autres personnages un instrument qui s'apparente énormément à ce type de dispositif.

⁹¹ Concernant la date à laquelle eut effectivement lieu ce concours, M. Breton la place, sans plus de précisions, en 1945. Cf. [Breton 1990], p. 60. Le jour qu'il faut néanmoins retenir pour situer avec exactitude le déroulement de cet évènement est celui du 12 novembre 1946 (Cf. Takashi Kojima, *The Japanese Abacus, Its Use and Theory*, Charles E. Tuttle Company Inc., Boston, 1954, réédité en 1987). Notons également que cette date est celle que l'on trouve systématiquement mentionnée sur les nombreux sites *web* consacrés à l'histoire du calcul.

⁹² La rencontre eut lieu au *Emie Pyle Theater* et fut sponsorisée par le journal militaire américain *Stars and Stripes*, lequel devait faire paraître dans ses colonnes, à la suite de la défaite de M. Nathan Wood, le communiqué de presse suivant : « *The machine age tool took a step backward yesterday at the Emie Pyle Theater as the abacus, centuries old, dealt defeat to the most up-to-date electric machine now being used by the United States Government... the abacus victory was decisive* ». In *Stars and Stripes*, novembre 1946.

⁹³ Cf. annexe I, *Abacus versus Electric Calculator*, pour le détail des problèmes de l'épreuve et de son déroulement.

de M. Matsuzake) pour rendre compte d'une défaite qui, avant d'être vraiment la sienne, fut d'abord et surtout celle du calculateur électrique de bureau qu'il utilisa à cette occasion.

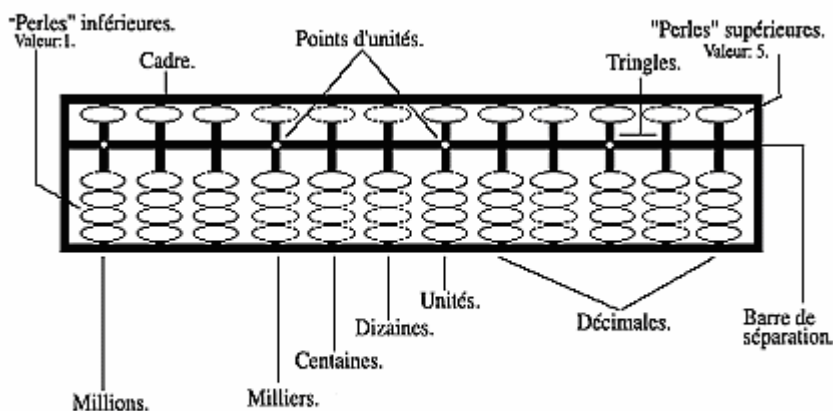


Fig 4.: un *Soroban*, version japonaise du boulier.

Bien entendu, il serait totalement abusif de vouloir s'emparer de ce seul exemple, aussi saisissant qu'il puisse être jugé, pour prétendre à proclamer la supériorité incontestable d'instruments de calcul séculaires, et parfois millénaires, sur leurs successeurs électromécaniques du milieu des années 40. Ce qui se produisit une fois, dans des circonstances très particulières, et qui engagea en les confrontant deux dispositifs particuliers utilisés par deux individus spécifiques ne saurait en effet valoir pour tous les instruments de calcul anciens, tous les calculateurs électromécaniques et tous les opérateurs possibles. Rien ne garantit que la victoire de M. Matsuzake aurait été aussi éclatante (ni même qu'il aurait gagné), si les problèmes qui avaient été soumis aux deux « paires » de compétiteurs lors des différentes épreuves avaient comporté un nombre plus important de multiplications ou si le participant japonais avait utilisé, disons, une règle à calcul. De toute façon, et puisque notre véritable préoccupation est ici constituée, rappelons-le, par les mots - et leur(s) sens- utilisés pour désigner les instruments de calcul, la question qui vaut véritablement la peine d'être formulée maintenant ne relève pas du domaine de la remise en cause de telles démonstrations. Elle serait plutôt celle-ci : peut-on légitimement utiliser le terme de « calculateurs » (*calculators*), pour nommer de semblables dispositifs ? Après tout, et alors que les calculateurs mécaniques et électromécaniques ont presque entièrement disparu, bon nombre de ces systèmes sont aujourd'hui encore utilisés dans certaines parties du monde (Il en va ainsi du boulier. Son usage est très répandu en Russie (*Ščët* ou *Stchoty*), en Chine (*Suan Pan*), au Japon et en Corée (*Soroban*)). L'un d'entre eux, à savoir le boulier japonais, a prouvé à au

moins une reprise, et de façon plutôt remarquable, sa supériorité sur un calculateur électromécanique américain. De plus comme le note Ph. Breton, « *Il – le boulier – incarnait un principe technique à l'œuvre dans la plupart des machines à calculer arithmétiques qui seront inventées jusque dans les années quarante*⁹⁴. ». Afin de résumer cette situation, nous pouvons par conséquent affirmer les choses suivantes au sujet de la plupart de ces artéfacts élémentaires:

- Ils autorisent des calculs précis.
- Ils permettent d'augmenter la vitesse à laquelle sont effectués les calculs sans pourtant nuire à leur exactitude.
- En une occasion, il a été démontré que l'un d'entre eux pouvait être plus rapide et plus précis qu'un instrument de calcul mécanique mû par électricité.
- Les principes techniques sur lesquelles ils reposent ne sont pas différents de ceux sur lesquels étaient basés les machines mécaniques et électromécaniques construites jusqu'à la moitié de ce siècle.
- Ils existent toujours et sont notamment très utilisés en Extrême-Orient et en Russie.

Peuvent-ils être pour autant qualifiés de « calculateurs » ? En vérité, il convient de répondre par la négative à cette interrogation. Les différents éléments historiques et techniques que nous venons d'étudier, pas plus que le fait que ces instruments aient pu inaugurer par l'entremise de leur conception et de leur *modus operandi* une forme très élémentaire de mécanisation du calcul, ne suffisent à en faire des « calculateurs ». On aurait tort, cependant, d'invoquer pour expliquer cela des raisons s'appuyant uniquement sur leur trop grande simplicité technique. Il conviendrait plutôt de s'orienter vers la question du degré d'automatisation du calcul qu'ils permettaient, si toutefois ils offraient une telle chose. Bien entendu, il paraît légitime de supposer que la complexité technique d'un objet et le niveau de mécanisation d'une tâche qu'il autorise, quelle qu'elle soit, vont de pair. Dans ce cas il est difficile de concéder que l'abaque, le boulier et tous les dispositifs premiers de calcul qui leur sont apparentés de près ou de loin, permettaient effectivement d'automatiser celui-ci. Il serait plus approprié d'affirmer qu'ils concrétisaient le calcul et ses différentes phases et contraintes (par exemple la prise en charge des retenues), dans l'épaisseur de leur matérialité en

⁹⁴In [Breton 1990], p.60.

abandonnant à l'homme la totalité des actions essentielles à son exécution. Quiconque a déjà vu un individu utiliser de manière réellement assurée un boulier pour calculer serait peut-être tenté d'affirmer que, si automatisation il y a, c'est bien de celle de l'homme dont il s'agit, cet objet n'étant plus alors qu'un support particulier qui serait, avec le calcul devant être réalisé, à l'origine de celle-ci. Cela n'a en effet pas grand chose à voir avec la mise en œuvre d'une *pascaline* ou, plus tardivement, d'une machine de bureau électrique ou électromécanique, lesquelles étaient certainement plus économiques du simple point de vue de l'investissement physique qu'elles requerraient de la part de leur opérateur pour fonctionner. Il est pourtant nécessaire de rappeler que bon nombre des premiers instruments mécaniques qui étaient destinés au calcul, (*mechanical calculating machines, multiplying machines, adding machines*), bien qu'effectivement et historiquement reconnus comme étant des calculateurs », n'automatisaient pas intégralement l'exécution des opérations ou des suites d'opérations arithmétiques qui pouvaient leur être soumises. Certains des mouvements ou des séquences impliqués par leur fonctionnement n'étaient donc pas exécutés par la machinerie interne mais réclamaient impérativement l'assistance permanente d'un opérateur. Les premières machines à calculer mécaniques comportaient communément (mais pas obligatoirement), les huit mécanismes ou dispositifs suivants (bien que parfois un seul organe ait pu intégrer plus d'une fonction):

1. Un mécanisme de configuration (*setup*): c'est le dispositif qui permettait à l'opérateur d'entrer les valeurs numériques devant être calculées par la machine.
2. Un mécanisme nommé « registre »: il s'agissait là d'un système habituellement composé de tambours crénelés⁹⁵, de roues ou de disques rotatifs indentés dont le positionnement servait à indiquer la valeur des nombres stockés dans la machine⁹⁶.

⁹⁵ C'était le cas de l'Arithmomètre de Charles Xavier Thomas de Colmar (1785-1870) qui comportait trois tambours crénelés (*stepped drums*) afin de représenter et de stocker les valeurs devant être calculées, ainsi que les résultats intermédiaires et finaux des opérations.

⁹⁶ Remarquons que ce type de représentation interne des chiffres entrant dans la structure du calcul, où les valeurs devant être traitées sont codées par seuil, par incrément fixe, c'est-à-dire par quantités parfaitement discontinues, fait de ces calculateurs mécaniques anciens de véritables calculateurs digitaux. Il en va du reste de même avec des dispositifs encore plus anciens et plus élémentaires tels que le boulier ou le Quipu des Incas où chaque valeur est représentée de manière discrète par un élément (boule ou nœud) ou un groupe d'éléments spécifiques. Dans le cas des systèmes analogiques, (règles à calcul, astrolabes, intégrateurs) les valeurs sont au contraire représentées sous forme de quantités physiques continues (longueurs de bâtonnets, hauteur d'un

3. Un mécanisme appelé « sélecteur » : cet organe sélectionnait et fournissait le mouvement mécanique approprié de manière à causer l'addition ou la soustraction des nombres concernés par l'opération et qui étaient conservés dans le registre.
4. Un mécanisme de retenue : cet agencement devait assurer la propagation d'une éventuelle retenue, d'un chiffre à l'autre, dans le registre de résultat. Dans le cas où une roue représentant le chiffre 9 passait à 0 (10), alors le chiffre suivant était incrémenté d'une unité. Cette retenue pouvait être propagée, le cas échéant, à l'ensemble des chiffres représentant le résultat de l'opération.
5. Un mécanisme de contrôle : il était destiné à s'assurer que l'ensemble des mécanismes composant la machine était adéquatement positionnés à la fin de chaque cycle de calcul et ce afin de prévenir le surgissement d'erreurs dans les phases suivantes ainsi que l'indésirable phénomène d'instabilité mécanique connu en anglais sous le nom de *jamming* (enrayement, blocage).
6. Un mécanisme de remise à zéro (*reset*) : il permettait de remettre à zéro, directement, le contenu du ou des registres de la machine.
7. Un effecteur : il assurait la mise en mouvement du mécanisme exécutant le calcul. Il pouvait s'agir de cadrans, de leviers ou d'une manivelle (comme sur la machine inventée en 1673 par G. W. F. Leibniz) devant être actionnés au moment opportun.
8. Un capot ou un boîtier dans lequel était logé le mécanisme de calcul proprement dit : son rôle consistait principalement à protéger le mécanisme du calculateur. Il ne laissait apparaître que les parties devant être lues et/ou actionnées par l'opérateur (c'était le cas sur la *pascaline*, qui comportait en outre un certain nombre d'indications portées pouvant être utiles à l'opérateur qui avait en charge le calcul).

liquide, valeurs angulaires, voltages, etc.). Nous reviendrons plus loin, et de manière détaillée, sur les différences fondamentales existant entre calculateurs analogiques et calculateurs digitaux (ou numériques).

La prise en compte de ces différentes caractéristiques nous autorise maintenant à préciser notre propos. Les systèmes élémentaires dont nous nous sommes demandés jusqu'à présent s'ils étaient ou non des « calculateurs » n'en exhibent aucune. Ou plutôt, nous pourrions dire qu'ils les condensent toutes (sans pour autant les différencier matériellement dans leur structure particulière qui demeure simple), à condition et à condition seulement que l'on veuille bien considérer la totalité qu'ils forment avec l'individu qui les utilise. Car c'est l'homme, en dernier lieu, et lui essentiellement, qui configure, qui retient, qui contrôle, qui déplace, qui effectue, qui met ou remet à zéro. Bref, c'est lui qui calcule véritablement, ne confiant à l'appareil auxiliaire que ce qui peut lui être effectivement et seulement confié. Les instruments que nous avons qualifiés de primitifs pour souligner leur ancienneté (et non leur caractère rudimentaire), sont donc fondamentalement des supports, des aides au calcul : ils en permettent la réalisation pas à pas, le suivi exact, et ce de manière séquentielle et réversible (une démarche qui s'avérerait sans doute bien plus fastidieuse en cas d'erreur dans le cas du calcul mental ou du comptage digital). Ils servent aussi à mémoriser de manière économique les résultats intermédiaires et à visualiser chacune des multiples opérations que peut comporter une computation donnée. En plus de cela ils sont rapidement et totalement réutilisables, une qualité que ne possèdent pas, par exemple, des supports tels que le parchemin ou la peau tannée. De la sorte ils libèrent l'homme, quoique incomplètement, de l'assujettissement coûteux qui pourrait autrement lui être imposé par la prise en charge intégrale de toutes les contraintes inhérentes à l'effectuation d'un calcul. L'opérateur délègue donc de façon active à ces dispositifs premiers – puisque c'est lui qui réalise encore toutes les manipulations relatives à ces opérations - une partie de la charge de travail obligée qu'impose la réalisation d'un calcul. Mais dans tous les cas de figure, c'est l'homme qui est et demeure le calculateur. C'est lui qui *effectue* les opérations nécessitées par la résolution du problème arithmétique auquel il s'est attaché tandis que l'instrument dont il peut bien s'accompagner à cette fin ne lui sert qu'à *représenter* les différents résultats auxquels il parvient successivement dans ce processus. Ces objets ne sont donc pas des calculateurs mais plutôt des dispositifs d'assistance au calcul. Ils n'automatisent pas ce dernier, leur rôle consiste seulement à le faciliter. En ce sens, il serait peut-être plus idoine – bien que cela puisse effectivement paraître quelque peu contre-intuitif à notre époque - de les appeler, eux et la combinaison opérationnelle qu'ils forment avec leur utilisateur, des *computers*, au sens premier du substantif américain. Le fait d'être, pour un artéfact, un calculateur (*calculator*), implique par conséquent et de manière nécessaire qu'il mécanise – même partiellement – l'exécution d'un calcul. Le premier dispositif de ce type, contrairement à une opinion

couramment admise, ne fut pas la pascaline⁹⁷ créée par le philosophe et mathématicien français Blaise Pascal (1623-1662) mais une machine nommée « horloge calculante » construite⁹⁸ très vraisemblablement autour de l'année 1623 par l'allemand Wilhelm Schickard (1592-1635), professeur de mathématiques, d'astronomie et d'hébreu à Tübingen. On peut donc à juste titre considérer que c'est bel et bien cette machine particulière qui inaugure l'ère des calculateurs et, par voie de nécessaire conséquence, celle de la mécanisation du calcul. Elles sont toutes deux encore très loin d'être achevées à ce jour.

Nous nous sommes efforcés, jusqu'à présent, de mettre en lumière la provenance des termes *calculators*, « calculateurs », et *computers*. Nous sommes ainsi parvenus à identifier leurs racines latines communes (*compŭto*, *compŭtātōr*, *calcŭlātōr*, *calcŭlus* et *calcŭlātiō*) et à identifier la différence sémantique fondamentale qui existait entre les vocables anglo-américains *calculators* et *computers*. Ces derniers étaient comme nous l'avons vu des êtres humains se livrant à des activités de calcul en s'assistant de systèmes auxiliaires divers, tandis que les premiers étaient quant à eux des dispositifs techniques spécifiquement conçus en vue de son automatisation (le premier exemplaire connu de ces machines à calculer est supposé avoir été construit, nous l'avons vu, vers 1623). Il nous faut à présent revenir à l'étude des mots et examiner la notion d'« ordinateur » afin de comprendre, enfin, les motifs véritables de l'élaboration de son nouveau sens ainsi que les enjeux dont celle-ci est profondément porteuse. Cette tâche ne pourra être menée qu'à la condition expresse de considérer d'abord et le terme français « calculateur ».

1.1.3. Vue d'ensemble de la situation du calcul électronique aux Etats-Unis dans les années cinquante et raisons véritables de l'élaboration de la nouvelle signification du mot *ordinateur* en français.

Nous savons fort bien que le terme « calculateur » admet couramment plusieurs acceptions en langue française :

⁹⁷ La pascaline fut construite par Blaise Pascal en 1642, mais, fait moins connu, il construisit au cours de son existence quelques cinquante machines de ce type.

⁹⁸ Cette machine, fut malheureusement perdue durant un incendie. Mais les lettres datées du 20 septembre 1623 et 25 février 1624 que W. Schickard envoya à J. Kepler comportent respectivement quelques indications sur le mécanisme de l'appareil et une copie des plans de celui-ci (sûrement réclamés par J. Kepler à W. Schickard lors de sa réponse à la lettre du 20 septembre 1623). Ce sont les travaux menés par le Professeur de philosophie Bruno von Freytag Loringhoff (qui était alors spécialiste des techniques employées par les horlogers du XVII^e siècle à l'université de Tübingen), durant les années cinquante et soixante qui ont permis d'établir ces faits.

- 1) Le calculateur est ainsi « *celui qui effectue des calculs, qui sait calculer*⁹⁹ ».
- 2) Par extension, il revêt aussi une signification plus péjorative qui relève directement de ce que l'on nomme dans la langue ordinaire le machiavélisme. Est alors un calculateur l'homme qui agit adroitement, par calcul, c'est-à-dire de façon rusée, perfide ou tortueuse.
- 3) Enfin, est un calculateur toute « *machine de traitement de l'information susceptible d'effectuer automatiquement des opérations numériques, logiques ou analogiques*¹⁰⁰ ».

Ce sont, bien évidemment, les sens 1 et 3 de ce substantif qui nous intéressent en premier lieu. Un examen liminaire des définitions proposées pour cette notion nous permet d'emblée de repérer un élément absolument saillant : là où l'américain et l'anglais avaient finalement distingué clairement les significations originelles du terme *calcülātōr* et de ses dérivés (le sens instrumental, présent dans *calcūlus*, a donné *calculator*, alors que sa composante significative relevant de l'ordre proprement humain, *calcülātōr*, s'est vue rattachée, conjointement à l'utilisation de certains dispositifs auxiliaires de calcul, au mot *computer*), le français les a maintenues ensemble jusqu'à aujourd'hui même en les comprenant dans un seul et même vocable : *calculateur*. Il n'existe pas, à notre connaissance, et en dehors peut-être du mot « comptable » qui appartient somme toute à un secteur d'activité assez spécialisé, de terme français qui puisse constituer un équivalent approprié au mot anglo-américain *computer* entendu précisément au sens de *compūtātōr*, c'est-à-dire de « celui qui calcule (au moyen d'un instrument) ». Or ce « défaut » conceptuel, et donc l'existence d'une trame polysémique constitutive de la double portée du mot français « calculateur », constituent très précisément la raison première pour laquelle le terme « ordinateur » a été sciemment introduit en 1955 dans le vocabulaire spécifique du champ encore naissant de l'informatique hexagonale !

Pour comprendre cet état de faits, il nous faut maintenant aborder le contexte historico-économique dans lequel se trouvaient I.B.M. et ses principaux concurrents lors de l'immédiat après-guerre et au cours de la première moitié des années cinquante. Durant l'année 1955, Thomas J. Watson Sr., alors âgé de 81 ans, et son fils cadet, Thomas J. Watson Jr., présidaient d'une main de fer à la destinée la firme américaine *I.B.M.*, respectivement en qualité de *Chairman*, et de *President* et de *Chief Executive Officer (C.E.O.)*. Ancien vendeur,

⁹⁹ Eveno B. et al. *Le Petit Larousse Grand Format 2000*, Paris, Larousse, 1999, p.167.

¹⁰⁰ *Ibidem*.

puis assistant manager, et enfin manager des ventes, à la *National Cash Register Company* (*N.C.R.*), Thomas J. Watson Sr. avait tout appris du monde des affaires de son ancien employeur, qui fut également le fondateur de la *N.C.R.*, le tyrannique John H. Patterson¹⁰¹.

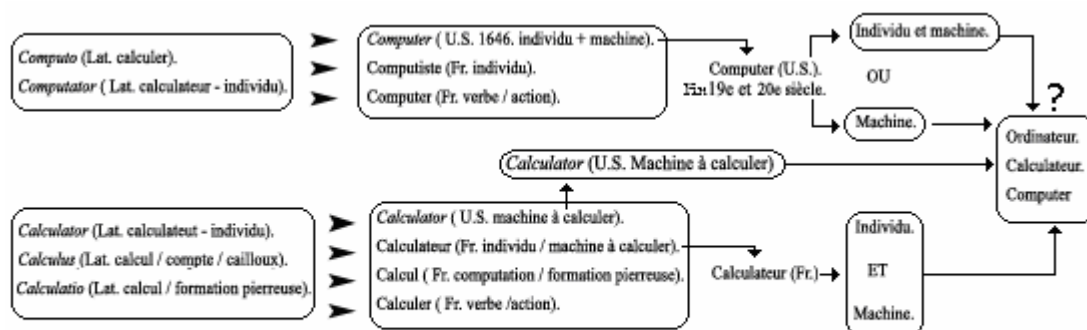


Fig. 5: origine et évolution du sens des termes *Computer*, *Calculator* et *Calculateur*.

Licencié par ce dernier au mois de novembre 1913, Thomas J. Watson Sr. devait rejoindre la *Computing Tabulating Recording Company*¹⁰² (*C.T.R.*) en tant que manager général le 1^{er} mai de l'année 1914. Il en devint président en mars 1915 et c'est en 1924 que la *C.T.R.*, toujours sous sa direction, fut rebaptisée *Industrial Business Machines* (*I.B.M.*). Engagée depuis plusieurs décennies déjà dans une lutte sans merci avec des entreprises telles que *Remington Rand*, *N.C.R.*, *Burroughs Adding Machines*, ou *Underwood-Elliot-Fisher*¹⁰³, pour la domination du marché mondial des machines de bureau mécaniques¹⁰⁴, la toute-puissante *I.B.M.*, qui à la fin des années quarante possédait en Amérique du Nord plus d'installations électroniques que tous ses concurrents réunis, ne pouvait se permettre dans

¹⁰¹ Th. J. Watson Sr. devait plus tard déclarer, après que M. Patterson l'ait pourtant licencié sans grands ménagements, « *Nearly everything I know about building a business comes from M. Patterson.* ». In [Watson et Petre 1990], pp.11-13.

¹⁰² La *C.T.R.* fut officiellement formée le 5 juillet 1911. Ce conglomérat regroupait quatre firmes : la *Computing Scale Company* de Dayton (Ohio), l'*International Time Recording Company*, d'Endicott (New York), et la *Hollerith Tabulating Machine Company*.

¹⁰³ Certaines de ces sociétés figurèrent parmi les firmes qui furent surnommées, à partir de 1964, *The Seven Dwarfs*. On y retrouvait, entre autres survivantes de l'ère désormais déclinante des machines à calculer mécaniques, les firmes *Burroughs*, *Honeywell*, *N.C.R.*, et *Remington Rand*, devenue entre temps *Sperry Rand*. La position économique hégémonique qu'occupait alors *I.B.M.* lui valut bien sûr le sobriquet de *White Snow*...

¹⁰⁴ En vérité, ce marché était extrêmement fragmenté, les fabricants de machines concentrant leurs efforts sur un ou plusieurs types de machines tandis qu'ils ne consentaient qu'un effort limité sur les autres. *Burroughs*, *Remington Rand* et *Underwood* étaient plutôt spécialisés dans le domaine des machines à calculer tandis que les caisses enregistreuses relevaient de la compétence de firmes telles que *N.C.R.*, *Burroughs* ou *R.C. Allen*. *I.B.M.* régnait sans partage sur le marché des tabulateurs, des calculateurs, et des « machines de compte », (*accounting machines*), ainsi que sur celui des fournitures (cartes perforées, pièces détachées), des périphériques d'entrée/sortie, et des services (installation, formation du personnel, réparation) qui leur étaient associés.

cette situation de tension économique constante de négliger la niche économique correspondante que pouvait représenter l'Europe et, par voie de conséquence, la France.

Tableau 1 : *Ventes, exprimées en pourcentage, des 12 principales compagnies américaines de machines à calculer mécaniques par rapport aux ventes totales de ce secteur industriel au cours des années 1947, 1949 et 1951. Les pourcentages correspondant aux parts de marché tenues par I.B.M. à la suite de la deuxième guerre mondiale nous permettent de prendre la pleine mesure de la position de domination économique que cette entreprise, tout de même talonnée de près par Remington Rand, occupait au début des années cinquante.*

Firme	1947	1949	1951
Burroughs	9,8	10.8	11.3
I.B.M.	20.4	24.0	23.7
Remington Rand	23.0	17.8	20.2
Royal Typewriter	5.0	5.6	5.4
Underwood	8.1	6.0	6.7
N.C.R.	19.6	22.0	18.8
Addressograph	5.6	5.4	5.1
Smith-Corona	3.0	3.0	2.8
Felt & Tarrant	1.4	1.0	1.2
Marchant	1.8	1.8	2.1
Monroe	2.3	2.6	2.7
Total.	100.0	100.0	100.0

Source : Lehman Brothers, « *Burroughs Adding Machines Company: Study of Company and its Position in the Business Machine Industry* », 19 mai 1952, tableau non paginé, *Burroughs Papers* ; reproduit dans Cordata, J. W., *Before the Computer: I.B.M., Burroughs, & Remington Rand & the Industry They Created 1865 – 1956*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1993, p. 252.

C'étaient là en plus des territoires où la concurrence locale directe¹⁰⁵ en matière d'équipement mécanique ou électromécanique de bureau était relativement réduite. I.B.M.

¹⁰⁵ Sur le marché des équipements mécaniques de bureau, les principaux concurrents d'I.B.M. en Europe étaient les filiales de l'américain *Remington Rand*, la *British Tabulating Machine Company* (qui concurrençait I.B.M. avec ses propres produits !), la *Powers-Samas Company* (GB.), *Olivetti* (It.), et la *Compagnie des Machines Bull*. Avant 1958, c'est-à-dire l'année où la *British Tabulating Machine Company* et *Powers-Samas Company* fusionnèrent pour former l'*International Computers and Tabulators Limited*, seule la firme anglaise *Leo*

était sortie de la guerre renforcée et bien plus puissante, bien plus influente, qu'elle ne l'avait jamais été auparavant. En octobre 1948, Thomas J. Watson Sr. décida de la restructuration de la firme qu'il dirigeait depuis 1915. Cette réorganisation s'avéra être d'une importance stratégique cruciale quant au rôle essentiel que devait jouer par la suite I.B.M. sur le marché international des ordinateurs. La firme fut ainsi scindée en deux entités majeures : l'I.B.M. *World Trade Corporation* fut créée afin de contrôler et d'étendre l'activité internationale de son groupe; elle avait également pour missions premières la gestion de la protection des brevets ainsi que l'établissement – ou la relance - des filiales de production et de distribution dans les pays dans lesquels I.B.M. voulait s'implanter ou renforcer sa présence. Les quartiers généraux et les installations principales de l'entreprise demeurèrent cependant localisés sur le territoire des Etats-Unis. La politique de pénétration des pays étrangers qui fut définie alors stipulait que le personnel de ces entreprises nationales devrait être majoritairement composé de natifs du pays concerné. Cette disposition particulière fut décidée en vue de parvenir à l'obtention d'une flexibilité et d'une adaptation optimales aux conditions économiques locales et aux habitudes des consommateurs régionaux. Dick Watson, le fils aîné de Thomas J. Watson Sr., fut nommé vice-président et directeur de l'I.B.M. *World Trade Corporation* tandis que Thomas J. Watson Jr. devint vice-président exécutif de la compagnie américaine en 1949. Au moment où la firme se trouvait sous le coup d'un procès antitrust initié par le département américain de la justice (en 1952, elle fut accusée de détenir une situation monopolistique sur la location et la vente des tabulateurs et des fournitures d'équipement de bureau, notamment les cartes perforées), les idées profondément novatrices que nourrissait Thomas J. Watson Jr. à l'égard du marché des équipements de bureau contribuèrent profondément à en remodeler la physionomie générale. Il s'engagea ainsi très rapidement dans une guerre d'usure avec les exécutifs vieillissants de la firme¹⁰⁶, plaçant peu à peu, dès 1950, des cadres plus jeunes qui partageaient ses vues aux postes clefs. Devenu président d'I.B.M. U.S.A. en 1952, il accentua comme cela n'avait jamais été fait auparavant l'investissement de la firme dans le secteur de la recherche et du développement et il commença en même temps, avec l'appui indéfectible de ses lieutenants, à mettre en place l'intégration des premiers composants électroniques disponibles dans les principaux produits commercialisés alors par l'entreprise. Convaincu, sûrement plus que ne l'avait été son père, du potentiel économique extraordinaire que représentait réellement l'advenue de cette

Computer Limited s'était vraiment positionnée sur le marché encore embryonnaire des ordinateurs en Europe (elle fut bientôt rejointe par les britanniques *Ferranti Ltd*, *Elliott Brothers* et l'*English Electric*).

¹⁰⁶ Son père, Thomas J. Watson Sr., qui était âgé de 71 ans à la fin de la deuxième guerre mondiale n'échappa pas à ce processus et fut nommé *Chairman* de la firme en 1949.

nouvelle technologie et, parallèlement, de l'obsolescence programmée des machines électromécaniques, il se battit incessamment pour l'imposer. Conscients de la mutation technologique qui risquait à terme de se produire dans ce secteur industriel, et puisque les charges formulées par le département de la justice américaine visaient plus particulièrement des équipements électromécaniques qu'ils pensaient de toute façon condamnés, Thomas J. Watson Jr. et son équipe persuadèrent finalement Thomas J. Watson Sr., qui s'était favorablement et officiellement déclaré en faveur de l'emploi des composants électroniques dès 1943¹⁰⁷, de consentir à opter pour le règlement à l'amiable du procès instruit à l'encontre de sa firme. Thomas J. Watson Jr. savait ce qu'il risquait, mais, confiant, il semblait également connaître tout le bénéfice qu'il pourrait tirer au final d'une telle manœuvre. Un décret de consentement fut finalement signé par les deux parties adverses en 1956. Applicable exclusivement sur le territoire des Etats-Unis et les contrées placées sous juridiction américaine, cette décision légale comprenait un certain nombre de dispositions économiques contraignantes et de restrictions draconiennes qui visaient à brider le développement de la firme américaine tout en restaurant une réelle situation de compétitivité. Tout ceci n'eut finalement guère d'effets négatifs sur la croissance économique d'I.B.M. qui poursuivit sans discontinuer son essor formidable, mais, à coup sûr, cela accéléra de manière incontestable son engagement dans le secteur des machines électroniques et la recherche fondamentale qui lui était liée de manière nécessaire. En Europe, la situation était quelque peu différente. Comme nous l'avons précisé plus haut, et avant toute chose, l'agrément de nature limitative passé avec le gouvernement américain ne s'y appliquait pas. Ensuite, des procès de ce type y étaient très peu vraisemblables. D'abord parce que la plupart des pays concernés, récemment

¹⁰⁷ Cette prise de position précoce et favorable de Thomas J. Watson Sr. à l'égard de l'électronique mérite cependant d'être quelque peu nuancée. A cette époque régnait un scepticisme affirmé, y compris chez certains des précurseurs du domaine, quant à l'avenir de cette technologie dans le secteur du calcul automatisé. Jérôme Ramunni, in [Ramunni. 1989], p. 48, fait ainsi état des faits suivants : « Dans une note datée du 23 octobre 1943, Caldwell (de la Radio Corporation of America) écrivait qu'en 1939 il était convaincu de la possibilité d'effectuer électroniquement des opérations simples mais que, quant aux calculs complexes, l'idée lui en semblait impraticable pour la raison que les composants électroniques étaient peu fiables et que la fiabilité d'ensemble diminuait à cause du grand nombre de composants nécessaires. Le 6 novembre 1943, Stibitz (le concepteur du Harvard Mark I), remarquait que, à son avis, il fallait attacher peu d'importance au facteur vitesse de calcul et il suggérait une machine mixte, électromécanique et électronique, étant donné le peu de maîtrise des composants électroniques. ». Ce peu de confiance manifesté initialement à l'endroit des premiers composants électroniques semble parfaitement reflété, tout du moins en ce qui concerne I.B.M., par le fait que l'A.S.C.C., un calculateur militaire conçu en partenariat avec Howard Aiken et devenu opérationnel en 1944, était une machine reposant sur l'emploi de composants électromagnétiques et non électroniques. Il faudra d'ailleurs attendre 1951 et l'arrivée de l'U.N.I.V.A.C. pour qu'I.B.M. se sentant réellement menacé, décide enfin de recourir couramment aux composants électroniques pour la construction de ses machines. Précisons enfin qu'Howard Aiken, sollicité au début de l'année 1945 par l'U.S. Navy afin de construire une nouveau calculateur pour le Naval Proving Ground de Dahlgren, Virginie, choisit des composants électromécaniques pour fabriquer cette machine (le Harvard Mark II).

ravagés par la guerre, étaient depuis quelques années entrés dans une phase de reconstruction économique qui ne laissait guère de place au déclenchement de pareilles procédures et ensuite parce que la puissance économique et politique de la concurrence locale dans le domaine des machines à calculer y était très faible comparée à celle qui pouvait caractériser la situation régnant aux Etats-Unis. De plus, pour I.B.M., l'Europe se trouvait en fait très loin d'être une *terra incognita*. Dès la fin de la première guerre mondiale, C.T.R., qui devait devenir I.B.M. en 1924, avait établi des filiales dans la plupart des pays du vieux continent. En 1919, elle avait par exemple fondé en France la société *SIMCO* (C.T.R. avait par ailleurs choisi Paris pour installer ses quartiers généraux européens). Ses produits étaient vendus sous licence au Danemark, en Suède, en Hollande, en Hongrie ou encore en Autriche. Elle était en outre actionnaire majoritaire (à hauteur de quatre-vingt dix pour cent), de la firme allemande *DEHOMAG* (*Deutsche Hollerith Maschinen Gesellschaft mbH*) et possédait des accords de licence et d'exploitation de brevets avec la *British Tabulating Machine Company* (ces accords cessèrent en 1949 et *B.T.M.* devint alors l'un des principaux adversaires commerciaux d'I.B.M. en Europe). Pour I.B.M., il ne s'agissait donc pas de pénétrer des marchés inviolés mais plutôt de s'y réimplanter après la guerre en saisissant les opportunités prometteuses d'un secteur en pleine reconstruction dont les composantes structurelles étaient déjà pour la plupart préexistantes et les habitudes de consommation au moins partiellement connues. C'est dans cette perspective que l'I.B.M. *World Trade Corporation* avait été fondée. La nomination de Thomas J. Watson Jr. au plus haut poste d'I.B.M. au début des années cinquante devait définitivement favoriser le portage des machines reposant sur les technologies électromécaniques ou électromagnétiques vers la toute nouvelle technologie électronique qui avait été développée au cours de la deuxième guerre mondiale. Dans un premier temps, il fut surtout question de remplacer tout ou partie des anciens éléments constitutifs des calculateurs par des dispositifs électroniques assurant les mêmes fonctions avec plus de rapidité et de précision¹⁰⁸. Ensuite, et essentiellement sous l'impulsion de Thomas J. Watson Jr., les premiers *ordinateurs commerciaux* d'I.B.M. firent leur apparition. C'est précisément à partir de ce moment là que le problème de la désignation publique, et donc commerciale, de ces systèmes se fit le plus réellement sentir.

A cette époque, c'est-à-dire de 1952 à 1956, année de sa mort, Thomas J. Watson Sr. occupait le poste de *chairman* au sein de la firme américaine. S'il n'était effectivement plus

¹⁰⁸ La première des machines de bureau électroniques qu'I.B.M. construisit fut le multiplicateur électronique 603 (I.B.M. *603 Electronic Multiplier*). Il fut proposé en septembre 1946 et fut suivi en 1948 par l'I.B.M. *604 Electronic Calculating Punch*. Ces deux machines, à l'instar d'ailleurs de l'I.B.M. C.P.C. étaient destinées aussi bien aux applications scientifiques qu'à celles dépendant du secteur des affaires.

président ou *C.E.O.* du géant industriel, il demeurerait néanmoins extrêmement influent au sein de l'entreprise et son fils ne manquait jamais de le consulter pour la plupart des décisions importantes qu'il était amené à prendre dans l'exercice de ses fonctions. Il convient alors de rappeler que la société I.B.M., dès février 1938, avait été impliquée dans la construction de grands calculateurs militaires (notamment celle du Harvard Mark I développé sept années durant par Howard Aiken et les équipes d'I.B.M. et qui fut la première machine de cette nature jamais produite par cette entreprise.). Thomas J. Watson Sr. fut en conséquence très tôt, et parfaitement, au fait de ces développements sans précédents dans le domaine des instruments de calcul. Il connaissait également l'existence, de manière tout aussi précise, des réalisations concrètes et des percées théoriques auxquelles conduisit finalement l'élaboration de l'*E.N.I.A.C. (Electronic Numerical Integrator and Computer)* à la *Moore School of Electrical Engineering* de l'université de Pennsylvanie. Tout porte ainsi à croire qu'il était, au moins en partie, conscient du rôle que serait amené à jouer un jour l'électronique dans le secteur du calcul automatisé¹⁰⁹. Une chose demeure néanmoins absolument certaine quant au problème précis de terminologie qui nous regarde ici : *la politique de Thomas J. Watson Sr., et par conséquent celle d'I.B.M., consistait alors, et consista encore longtemps, à éviter sciemment et systématiquement d'employer le terme « computer » pour se référer aux nouvelles machines électroniques, que celles-ci soient par ailleurs destinées au domaine de la défense nationale ou qu'elles relèvent plus prosaïquement du secteur commercial. Cette décision, qui avec le recul pourra peut-être sembler curieuse ou exagérément pointilleuse ne résultait bien évidemment pas d'une simple lubie ou d'un caprice de convenance lexicale. Il s'agissait au contraire d'une prise de position commerciale affirmée et rigoureusement maintenue dans une stricte perspective de marketing non seulement à l'échelle nationale, mais également au niveau international. Notons incidemment qu'il est possible de repérer au moins deux précédents tout à fait caractéristiques de cette tendance dans l'histoire d'I.B.M.*

Ainsi lorsqu'en 1928 la firme introduisit de nouvelles cartes à perforations rectangulaires à 80 colonnes pour les tabulateurs et les autres machines de bureau, Thomas J. Watson Sr.

¹⁰⁹ Dans le numéro du 26 septembre 1949 de la revue interne d'I.B.M., *Business Machines*, figurait le compte rendu de réunion suivant : « *Mr. Watson wants electronics used on the accounting machine and on the printer... He wants Mr. Bryce to get out and visit the various colleges, find the most outstanding Professor on electronics and get him for I.B.M. If he gets \$10,000 with the college, we would be willing to pay him as much as \$25,000 and let him keep in touch with his college, going back once a month to give lectures, or perhaps as often as twice a month.* ». Notons cependant qu'il est question dans cette déclaration de l'électronisation d'une (*electric*) *accounting machine* et de celle d'un *printer* (dispositif auxiliaire destiné à imprimer les résultats du calcul). Autrement dit l'effort de modernisation technologique (*technological upgrade*) voulu par Th. J. Watson Sr. devait porter spécifiquement sur les dispositifs électriques de bureau déjà existants dont la location constituait alors la source de revenus principale de la firme. Il n'était donc nullement question à l'époque d'un ordinateur électronique commercial.

insista pour que ces dernières soient commercialisées sous l'appellation de « I.B.M. cards ». Cette opération de pur *marketing* s'avéra être au final un réel succès puisque qu'il n'était pas rare que les utilisateurs de machines *Powers*, à l'époque un des principaux concurrents d'I.B.M., se réfèrent très fréquemment aux cartes à perforations circulaires qu'ils employaient en les appelant des « I.B.M. cards ». Par l'intermédiaire de cet ingénieux procédé de vente, I.B.M. devenait non seulement incontournable dans l'esprit des utilisateurs des machines fabriquées par ses rivaux – avec tous les bénéfices que l'on peut en attendre sur le long terme - mais, en plus, l'entreprise se trouvait en mesure d'affirmer très fortement l'identité spécifique de ses propres produits tout en les différenciant radicalement de ceux de la concurrence. Cette orientation marchande, fondamentalement instauratrice d'identité pour l'entreprise new-yorkaise et par conséquent élément précieux de différenciation vis-à-vis d'une concurrence somme toute nombreuse et virulente, fut poursuivie à la fin des années 30. Avant la seconde guerre mondiale, et toujours sous l'impulsion de Thomas J. Watson Sr., le personnel d'I.B.M. et ses très nombreux clients commencèrent progressivement à se référer aux machines électriques qu'ils concevaient et/ou employaient en usant de l'acronyme *E.A.M.* Le sigle *E.A.M.*, qui signifie *Electric Accounting Machine* était une désignation directement dérivée de l'*Electric Accounting Machine Division* de la firme, laquelle concevait et fabriquait ses machines à calculer électriques de bureau. Le faisceau de motivations qui présida à cette nouvelle mise en place terminologique fut globalement le même que celui qui avait été initié en 1928. Il s'agissait, une fois de plus, de creuser notablement l'écart identitaire qui séparait déjà I.B.M. et ses produits de la concurrence et de son offre. Le principal rival d'I.B.M. était alors *Remington Rand*. Cette entreprise, ainsi que les autres adversaires de la firme de Thomas J. Watson Sr. employaient tous, et continuèrent à employer, des termes génériques tels que *punched-card equipment*, *tabulators* ou *accounting machine* pour désigner leurs matériels respectifs. I.B.M., et par voie de conséquence sa clientèle, était ainsi la seule firme à user d'une appellation spécifiquement définie pour se référer à ses propres équipements, laquelle procédait directement, qui plus est, de la dénomination d'un de ses départements les plus actifs. La seconde guerre mondiale, nous aurons bien sûr l'occasion de revenir sur cela à de nombreuses reprises, stimula la construction des premières grosses machines à calculer électromagnétiques puis électroniques. Ces dispositifs révolutionnaires, on le sait, furent essentiellement conçus en raison de la charge de calculs scientifiques sans cesse croissante en nombre et en complexité (*e.g.* calcul des tables de tir balistiques, cryptanalyse), imposée par

le déclenchement et l'évolution du deuxième conflit mondial. Ils furent donc, et ce dès le départ, nommés *computers*¹¹⁰, puisque, foncièrement, le calcul était ce pour quoi ils avaient été d'emblée pensés et construits. Ces machines qui ouvraient sur un nouvel âge, celui que nous nommerons plus tard « l'ère de l'information », devaient prendre en charge, en les automatisant presque totalement, des travaux de calcul assignés initialement et exclusivement à un personnel spécialement formé, essentiellement féminin, qui les effectuait auparavant au moyen de machines à calculer mécaniques ou électromécaniques, de feuilles de papier et de stylographes. Ces personnes étaient donc, selon les acceptions spécifiques que nous avons dégagées plus haut, des calculateurs, c'est-à-dire, en américain, des *computers* (parler ici d'*human computers*, comme c'est parfois le cas dans la littérature consacrée, s'avèrerait, dans ce contexte, complètement redondant). Les machines que nous nommons *calculateurs* devaient leur être progressivement mais rapidement substitués afin de fiabiliser et d'accélérer, effort de guerre oblige, l'exécution de l'ensemble incessamment grandissant des tâches de calcul toujours plus sophistiquées qui jusqu'alors leur avait été confié. C'est là la raison pour laquelle ces artefacts furent appelés *computers*, reprenant ainsi à leur compte la dénomination qui avait autrefois été utilisée pour désigner leurs prédécesseurs humains moins sûrs et plus lents. Très tôt, et toujours pour des motifs relevant du domaine du *marketing*, Thomas J. Watson Sr. s'opposa avec fermeté à l'emploi de cette appellation qu'il jugeait potentiellement dangereuse pour l'avenir commercial¹¹¹ encore bien incertain de ces machines. En témoigne par exemple le cas de l'I.B.M. *Harvard Mark I*, pourtant une machine électromagnétique construite en vue d'un strict usage militaire, qui fut dévoilé à l'université d'Harvard en août de l'année 1944. Sa dénomination secondaire était I.B.M. A.S.C.C., c'est-à-dire *Automatic Sequence Controlled Calculator*¹¹². Nous pouvons remarquer ici l'utilisation extrêmement précoce du terme *calculator* en lieu et place du mot *computer* auquel d'autres, pourtant, recourraient déjà sans avoir peut-être véritablement mesuré toutes les connotations implicites qu'il pouvait effectivement receler. Notons également que la prise en considération de la seconde désignation choisie pour nommer le Harvard Mark I suffit à invalider les affirmations formulées en 1998 par Paul E. Cerruzi et selon lesquelles : « I.B.M. *deliberately avoided the*

¹¹⁰ Rappelons par exemple qu'E.N.I.A.C. signifie Electronic Numerical Integrator and *Computer* tandis que l'acronyme E.D.V.A.C. vaut pour Electronic Discrete Variable Automatic *Computer*.

¹¹¹ Cette inquiétude concernant par ailleurs tout autant le marché représenté par le secteur civil que ceux, très souvent liés, des domaines militaire et scientifique.

¹¹² A.S.C.C.: calculateur automatique à contrôle séquentiel.

*word « computer », which it felt was closely identified with the U.N.I.V.A.C. and with exotic wartime projects that appeared to have little relevance to business*¹¹³ ».

Certes, ces propos ne sauraient être, tout au moins en partie, qualifiés de complètement inexacts. Mais les deux raisons principales avancées par Mr. Cerruzi pour justifier le fait qu'I.B.M. évitait intentionnellement l'usage du mot *computer* pour qualifier ses machines sont selon nous insuffisantes, et de toute façon bien trop désynchronisées du simple point de vue du déroulement chronologique réel des évènements, pour rendre compte convenablement de ce phénomène particulier. Ainsi, s'il est parfaitement juste de rappeler que le mot *computer* avait été très fortement associé dès les débuts du calcul électronique aux machines employées en temps de guerre par les militaires (ce que Paul Cerruzi nomme les *wartime projects*¹¹⁴), il convient de se souvenir également que l'A.S.C.C., lui aussi un *wartime project*, fut d'emblée appelé *calculator* et non *computer*, et ce à une époque où l'introduction de ces machines dans le domaine tertiaire (celui du *business*) était bien loin d'avoir été formellement évoquée. Le fait que l'A.S.C.C. ait été un calculateur électromagnétique, et non une machine reposant sur l'emploi de la technologie électronique, autorise de surcroît à souligner plus encore l'ancienneté de l'élection par I.B.M. de l'usage du mot *calculator* contre celui de *computer*. C'est là une tendance terminologique dont on peut aisément constater qu'elle sera maintenue bien après la guerre puisque l'I.B.M. 701, un ordinateur commercial introduit sur le marché américain en 1953¹¹⁵, sera également connu sous la désignation plus explicite de *Defense Calculator*. Tout ceci revient en fait à affirmer

¹¹³ In [Cerruzi 1998], p.34.

¹¹⁴ C'était par exemple le cas d'E.N.I.A.C. L'A.S.C.C. n'était pas un calculateur électronique mais une machine électromagnétique.

¹¹⁵ Le contrat fut passé entre I.B.M. et la Navy en janvier 1951, moment où la guerre faisait rage en Corée. Le D.C. fut construit selon les plans de l'I.A.S.C. (numérotation binaire et fonctionnement en parallèle), sous la supervision de John von Neumann, alors conseiller technique et scientifique chez I.B.M. La construction d'une version commerciale de cette machine, principalement destinée à contrer U.N.I.V.A.C., fut rapidement décidée. Il s'agissait de l'I.B.M. 701. Notons que ce système, techniquement, ne différait pas du tout de son modèle militaire, ce qui explique que très fréquemment *Defense Calculator* et I.B.M. 701 ne soient pas véritablement distingués l'un de l'autre. En fait, selon Paul Cerruzi qui rapporte là les propos de Cuthbert C. Hurd, un ancien cadre de la firme, « *the name (i.e. Defense Calculator), helped to ease some of the internal opposition to it since it could be viewed as a special project (like the bomb sight, rifles, etc., IBM had built during World War II) that was not intended to threaten I.B.M.'s main product line.* » In [Cerruzi 1998], p. 35. Ce témoignage nous permet de nous rendre compte qu'à l'intérieur même de l'entreprise new-yorkaise, et en dépit de la menace que représentait pour elle l'U.N.I.V.A.C., il existait une faction influente qui était fermement opposée à l'introduction de calculateurs électroniques conçus pour un usage commercial. Ceci s'explique par le fait que la mise sur le marché de tels dispositifs aurait inmanquablement conduit I.B.M. à concurrencer directement ses propres systèmes électromécaniques ou électriques commerciaux, ce qui revenait ni plus ni moins à mettre en péril sa principale source de revenus financiers. C'est Thomas J. Watson Jr. qui convainquit finalement son père, encore hésitant quant à l'issue qu'il fallait donner à ce problème, de l'impérieuse nécessité dans laquelle se trouvait I.B.M. de se tourner rapidement vers la construction d'ordinateurs électroniques civils malgré la situation d'autoconcurrence que cette orientation risquait d'engendrer.

que dès avant que les premiers calculateurs électroniques ne deviennent opérationnels, les dirigeants d'I.B.M. avaient bel et bien opté pour cette désignation spécifique et que ce n'est en aucun cas après coup, c'est-à-dire au terme de ce conflit mondial, qu'ils l'ont choisie pour se démarquer ou se défaire de l'image trop exclusive et réductrice qui pouvait bien être attachée aux premiers systèmes électroniques, lesquels étaient tous des machines construites en collaboration avec l'armée et utilisées, il est vrai parfois indirectement, par elle. Quant à l'argument reposant sur le fait que le terme *computer* était beaucoup trop lié à l'U.N.I.V.A.C. pour pouvoir être employé par I.B.M., il est parfaitement fondé. Cependant, il ne saurait revêtir le caractère fondateur que semble lui prêter ici Mr. Cerruzi. Le faisceau de décisions qui avait effectivement conduit à l'éviction de l'utilisation du vocable *computer* chez I.B.M. était bien antérieur à la mise sur le marché de la machine de *Remington Rand*. Il résultait finalement d'une économie terminologique quasi institutionnelle qui avait été initiée au sein de cette firme dès la fin des années 20 et qui avait été poursuivie fidèlement pendant et jusqu'après la guerre. Si l'on s'accorde néanmoins à reconnaître, et cela est nécessaire, qu'U.N.I.V.A.C. a joué un rôle d'une certaine importance dans le cadre de cette surprenante « guerre des mots », c'est celui d'une machine dont l'extrême popularité a conduit I.B.M. à accroître considérablement sa capacité de réactivité commerciale (puisqu'elle s'est engagée à partir de là dans la construction de calculateurs électroniques commerciaux), et à renforcer plus encore sa politique de différenciation, en termes d'image de marque, vis-à-vis des produits de la concurrence. Mais aller jusqu'à prétendre, comme le fait de façon plus ou moins explicite cet auteur, qu'U.N.I.V.A.C. a été une des causes essentielles qui ont amené les cadres exécutifs d'I.B.M. à sélectionner le mot *calculator* pour l'opposer au terme *computer* nous semble constituer une interprétation des faits historiques tout à la fois inexacte et excessive. Le sentiment personnel de Thomas J. Watson Sr. était que ce mot ne devrait en aucun cas être utilisé pour désigner un équipement fabriqué par I.B.M. Il jugeait en effet que le vocable *computer* était bien trop lié, au moins des points de vue historique et sémantique, aux individus qui autrefois avaient été massivement employés afin d'exécuter les calculs que l'on remettait désormais aux puissantes machines électroniques. Il avait très bien compris, peut-être même avant tout le monde, la charge émotionnelle qu'était susceptible de véhiculer le mot *computer* - mais non pas le terme *calculator* - vis-à-vis du public et les conséquences négatives que pourrait finalement entraîner, en termes de ventes, l'utilisation irréfléchie de ce vocable. Profondément préoccupé par le fait que le public serait à coup sûr porté à adopter une posture de résistance par rapport à une technologie difficile à comprendre, peut-être effrayante, mais à coup sûr potentiellement menaçante pour l'emploi, il souhaitait vivement

diffuser le message selon lequel les machines électroniques, actuelles ou à venir, fabriquées par I.B.M. n'avaient pas été conçues en vue de priver les gens de leur moyen de subsistance; la vérité était qu'elles avaient plutôt été créées pour les aider à accomplir leur travail en les déchargeant des tâches les plus ingrates auxquelles ils avaient été précédemment contraints.

Constructeur	Désignation 1	Signification Acronyme	Or.	Date
Moore School.	E.N.I.A.C.	Electronic Numerical Integrator and Automatic Computer	USA	1946
I.B.M	E.C.P.	<i>I.B.M.</i> 604 / Electronic Calculating Punch	USA	1948
I.B.M	S.S.E.C.	Selective Sequence Controlled Calculator	USA	1949
E.M.C.C.	B.I.N.A.C.	<i>Binary Automatic Computer</i>	USA	1949
I.B.M.	C.P.C.	<i>Card Programmed calculator</i> ¹¹⁶ .	USA	1949
National Bureau of Standards (N.B.S.)	S.E.A.C.	<i>Standards Eastern Automatic Computer.</i>	USA	1950
N.B.S.	S.W.A.C.	<i>Standards Western Automatic Computer.</i>	USA	1950
E.M.C.C.	U.N.I.V.A.C.	<i>UNiversal Automatic Computer</i>	USA	1951
Fairchild Semiconductor Company	F.C.	Fairchild Computer	USA	1951
Université de l'Illinois	O.R.D.V.A.C.	<i>ORdnance Discrete Variable Automatic Computer</i>	USA	1951
Institute for Advanced Study (I.A.S.)	I.A.S.C.	<i>Institute for Advanced Study Computer</i>	USA	1952
Los Alamos Laboratory	M.A.N.I.A.C.	<i>Mathematical Analyser, Numerical, Integrator And Computer</i>	USA	1952

¹¹⁶ Le *Card Programmed calculator* consistait en fait en une combinaison comprenant un tabulateur, d'abord l'I.B.M. 402, puis le 407, et un multiplicateur / perforateur électronique, le modèle 604. Ce dernier fut plus tard remplacé par le 605.

Qu'est-ce qu'un ordinateur ?

Moore School	E.D.V.A.C.	<i>Electronic Discrete Variable Computer</i>	USA	1952
Université de l'Illinois	I.L.L.I.A.C.	ILLinois Automatic Computer	USA	1952
I.B.M.	D.C.	<i>I.B.M. 701 / Defense Calculator</i>	USA	1953
Bell Labs	T.R.A.D.I.C.	TRANSistorized Digital Computer	USA	1954
Rand Co.	J.H.O.N.N.I.A.C.	<i>JOHN von Neumann's Integrator and Automatic Computer</i>	USA	1954
Université du Wisconsin	W.I.S.C.	Wisconsin Integrally Synchronized Computer	USA	1954
I.B.M.	M.D.C.	<i>I.B.M. 650 / Magnetic Drum Calculator</i>	USA	1954
MIT Lincoln Labs	M.T.C	Memory Test Computer	USA	1954
I.B.M./ U.S. Navy	N.O.R.C.	Naval Ordnance Research Calculator	USA	1954
I.B.M.	E.D.P.M.	<i>I.B.M. 702/Electronic Data Processing Machine.</i>	USA	1955
I.B.M.	604 / E.D.P.M.	<i>I.B.M. Type 604 Electronic Data Processing Machine.</i>	USA	1955
I.B.M.	T.C.	<i>I.B.M. 608 / Transistor Calculator</i>	USA	1957
Burroughs	A.G.C.	Atlas Guidance Computer	USA	1957
I.B.M.	R.A.M.A.C.	<i>I.B.M 305 / Random Access Memory Accounting Machine</i>	USA	1957
Philco Co.	T.R.A.N.S.A.C.	Transistor Automatic Computer	USA	1958
I.B.M.	D.P.S.	<i>I.B.M 7090 / Data Processing System</i>	USA	1959

Tableau 2 : comparatif non exhaustif des appellations employées par I.B.M. et ses principaux concurrents industriels et institutionnels pour désigner leurs ordinateurs (ou leurs gammes d'ordinateurs) les plus

représentatifs, et ce durant la période 1946-1959. On remarquera que cette firme n'employait jamais le terme *computer*, ce que faisait pratiquement toutes les autres, lui préférant systématiquement les mots *calculator*, *data processing machine* ou *system*, parfois assortis d'une qualification numérique.

Comme cela avait déjà été le cas en 1928 et à la fin des années 30, et bien avant que les premiers ordinateurs à usage strictement commercial ne fassent leur apparition (il faudra attendre pour cela 1946), I.B.M. poursuivit par conséquent une politique commerciale dont un des axes dominants était la différenciation « culturelle » et l'affirmation identitaire par rapport aux positions adoptées par la concurrence. I.B.M. ne vendait ou ne louait donc pas, ou plutôt ne vendrait ou ne louerait pas, des *computers*, mais bel et bien des *calculators*. Bien évidemment, cette disposition terminologique spécifique ne devait strictement rien changer quant à la nature structurelle des machines qui de fait demeuraient *fondamentalement* ce qu'elles étaient par essence, c'est-à-dire des machines à calculer électroniques, que l'on choisisse par ailleurs de les nommer ensuite *computers* ou *calculators*. Il nous faut seulement comprendre ici que la finalité première de cette approche nominale consistait non seulement à autoriser la firme américaine à créer, une fois de plus, une différence d'image publique notable entre elle et ses rivaux industriels ou institutionnels¹¹⁷ majeurs, mais qu'elle visait

¹¹⁷ A la fin de la guerre, le principal rival commercial d'I.B.M., était toujours *Remington Rand*. Toutefois, il convient de noter que cette entreprise ne disposait alors d'aucune expérience dans le domaine des calculateurs électroniques. De façon quelque peu étonnante, ce furent en fait les actions entreprises par le gouvernement américain qui devaient constituer à terme une menace réelle pour I.B.M. Dès 1945, des gens tels que Vannevar Bush, président de la *Carnegie Institution*, membre influent de l'*Office of Scientific Research and Development* (O.S.R.D.) et conseiller scientifique en chef du Président Roosevelt, se virent attribuer la mission de préserver la situation de *leadership* technologique auquel les Etats-Unis étaient parvenus pendant le deuxième conflit mondial. Au cours des années d'après-guerre, l'argent fédéral continua ainsi d'être généreusement versé aux laboratoires universitaires et industriels engagés dans des travaux de recherche et de développement qualifiés de sensibles. Etaient tout particulièrement concernés les projets qui concernaient directement l'application de l'électronique au calcul automatisé. Le *National Bureau of Standards*, le *Department of Commerce*, l'*U.S. Army* et l'*U.S. Navy* devaient ainsi financer des projets de recherche sur le calcul électronique menés entre autre à l'Université de Pennsylvanie, à l'*Institute for Advanced Studies* de Princeton, à l'Université d'Harvard ou au M.I.T. Une partie du développement de ces projets devait être menée dans des divisions constituées au sein même des agences gouvernementales, une autre partie devait être conduite par les laboratoires universitaires, mais des contrats de développement devaient également être passés avec des individus ou des institutions provenant de l'extérieur. La nature de ces contrats était telle qu'elle les rendait particulièrement attractifs, y compris pour des personnes ne possédant aucune expérience préalable dans le domaine du calcul automatique. La position d'I.B.M. était donc tout particulièrement délicate au moment même où un procès antitrust allait être ouvert contre elle par le gouvernement américain. Dans ces conditions, il lui était bien entendu impossible d'envisager raisonnablement une participation à ces projets mais il était évident que ses concurrents, y compris les moins expérimentés, ne s'en priveraient pas. En novembre 1946, John McPherson, alors directeur de l'ingénierie chez I.B.M., et Wallace Eckert, directeur du *Watson Scientific Computing Laboratory* (Watson Lab.), écrivirent directement, chose peu commune, à Thomas J. Watson Sr. pour l'avertir de la dangerosité de la situation. Ils terminaient leur lettre ainsi: « *Whereas before the war I.B.M. was the only organization able and willing to carry on large scale development of calculators, such development is now taking place on a large scale.* » (lettre de J.C. McPherson et W.J. Eckert à T.J. Watson Sr., 12 novembre 1946 citée dans [Pugh 1995], pp. 132-133. La suite des événements justifia pleinement leurs inquiétudes puisqu'en 1952, et par un formidable renversement de conjoncture provoqué par l'intarissable manne gouvernementale, *Remington Rand*, devenue entre-temps propriétaire d'*E.R.A.* et de *E.M.C.C.*, était leader dans le domaine des ordinateurs électroniques.

également, et peut-être surtout, à permettre le désamorçage préventif d'une situation de rejet des ordinateurs par un public qui ne manquerait sûrement pas de se sentir acculé par leurs stupéfiantes capacités. Nous ne saurions ici nous empêcher, à titre comparatif, d'évoquer John von Neumann qui, dans le « *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.* ¹¹⁸ » promut l'usage, en même temps que la diffusion du concept de calculateur à programme interne - d'une terminologie directement empruntée au champ de la neurologie. C'est ici une moindre chose que d'affirmer que ce scientifique de génie n'avait guère eu le souci de recourir à une terminologie aussi neutre et potentiellement préventive que celle que Thomas J. Watson Sr. avait précautionneusement choisie pour se référer aux machines construites par sa firme. Au contraire, tout nous porte à croire que John von Neumann, dont on connaît l'intérêt considérable qu'il portait aux sciences neurologiques ¹¹⁹, avait été profondément séduit par la perspective d'utiliser un champ lexical qui permettait, si ce n'est d'identifier, au moins de rapprocher la structure et le fonctionnement du calculateur électronique de ceux du cerveau humain. Témoignent ainsi de cette propension attestée le recours au concept de mémoire (*memory*, également désignée par la seule lettre M), défini dans la deuxième partie de ce travail (2.0 *Main Subdivision of the System*), et la notion centrale d'*element*, qui est à rapprocher avec celle de neurone (il existe ainsi une parenté profonde, sur laquelle nous aurons bien sûr l'occasion de revenir plus tard, entre la pensée de John von Neumann et celle d'Alan Mathison Turing ¹²⁰). Certes, John von Neumann était un scientifique de renommée internationale tandis que Thomas J. Watson Sr. était avant tout un businessman aguerri, c'est-à-dire, avant toutes choses, un vendeur né. Les intérêts et les prises de position de l'un ou de l'autre ne pouvaient que s'inscrire en différence sur bon nombre de problèmes touchant à la diffusion de l'ordinateur dans l'espace public. Les perspectives que nourrissait von Neumann à l'égard de cette question furent d'ailleurs à l'origine d'une crise qui fit éclater le groupe qui avait conçu E.N.I.A.C. A la fin de l'année 1945, un procès âpre et fort long (il dura dix ans), opposa John von Neumann et Herman H. Goldstine, figures emblématiques du « clan des mathématiciens » à Prosper J. Eckert et John Mauchly, ambassadeurs du « clan des ingénieurs ». Ces derniers, qui s'étaient estimés outrageusement spoliés par von Neumann,

¹¹⁸ Ce « brouillon », à l'origine un document à usage interne qui ne fit pas l'objet d'une classification, porte la date du 30 juin 1945.

¹¹⁹ La seule lecture de *L'ordinateur et le cerveau* suffit à s'en convaincre parfaitement (Von Neumann, J., *The Computer and the Brain*, New Haven, Yale University Press, 1958 ; trad. Fr. par P. Engel, *L'ordinateur et le cerveau*, Coll. « Champs », Paris, Flammarion, 1996). Il était par ailleurs tout à fait au courant des travaux de recherche menés par W. McCulloch et de W. Pitts (1943).

¹²⁰ Nous songeons ici bien sûr aux idées que le mathématicien et cryptanalyste anglais exprima dans son texte resté célèbre, « Computing Machinery and Intelligence », (*Mind*, Vol. LIX, n°236, 1950).

entendaient bien désormais protéger par des brevets légaux l'architecture (*design*) décrite dans le *First Draft* (von Neumann en était le seul et unique signataire mais il fut reconnu par la suite que ce rapport synthétisait en fait un ensemble d'idées qui avait été discuté par le groupe de la *Moore School*), tandis que John von Neumann et Herman H. Goldstine étaient résolus à faire en sorte que ce *design* relève du domaine public (la diffusion quasi incontrôlée dont le *First Draft* fit l'objet dans des dizaines de centres de recherche du monde entier confirme complètement cette prise de position¹²¹). En juin 1946, et à la suite de cette scission retentissante, Prosper J. Eckert et John Mauchly quittèrent la *Moore School* et son groupe de recherche pour fonder une entreprise d'abord nommée *Electronic Control Company (E.C.C.)*, puis, à partir de décembre 1947, *Eckert-Mauchly Computer Corporation (E.M.C.C.)*. Leur intention, dès le départ, était de concevoir, de fabriquer et de vendre des ordinateurs destinés à un usage commercial qui reprenaient les caractéristiques techniques d'E.D.V.A.C. A partir de ce moment là, ils n'hésitèrent pas à attaquer systématiquement en justice les concurrents qui proposaient des machines dont l'architecture était basée sur celle d'E.D.V.A.C. Concernant cela, et pour l'instant, une chose mérite vraiment d'attirer notre attention : *E.M.C.C.* fut la première compagnie fondée pour fabriquer et vendre des machines à usage commercial. Elle disposa en fait assez rapidement d'une machine partiellement construite, l'U.N.I.V.A.C.¹²² Une fois encore, et paradoxalement - nous allons bientôt voir pourquoi - ce système fut appelé un *computer* (U.N.I.V.A.C. signifie en effet *UNIVersal Automatic Computer*). Lorsque la *Remington Rand* acquit *E.M.C.C.* en 1950, elle acheva la construction de l'U.N.I.V.A.C et entama avec une réussite certaine sa commercialisation. Pendant quelques six décennies, et par l'entremise de ses tabulateurs, de ses trieurs (*sorters*), de ses calculateurs électromécaniques et des cartes perforées à 80 colonnes que ces dispositifs requerraient tous pour fonctionner, I.B.M. avait régné quasiment sans partage sur le domaine de l'enregistrement et du traitement des données relatives aux affaires, qu'il s'agisse là, indifféremment, des registres de salaires, des inventaires, de la gestion de personnel, des polices d'assurance ou encore des informations issues du recensement de la population. Or, avec U.N.I.V.A.C., et pour la première fois de la courte histoire du calcul automatique

¹²¹ Scott McCartney rapporte à ce sujet les éléments d'information suivants « *Even though Goldstine had declined to classify the report because it was only an internal document, he sent twenty-four copies to academic colleagues of von Neumann, including some in England. Request began coming in for more copies, and soon several hundred were in circulation.* ». In [McCartney 1999], p. 120.

¹²² Ce calculateur avait été initialement appelé E.D.V.A.C. *Type Machine*, mais, en raison des tensions qui régnaient alors entre Eckert, Mauchly et la *Moore School*, ils furent contraints d'abandonner ce nom et choisirent celui d'U.N.I.V.A.C. *E.M.C.C.*, en raison de problèmes financiers insurmontables, ne put terminer la construction d'U.N.I.V.A.C. et c'est *Remington Rand*, qui acheta *E.M.C.C.* en février 1950, qui l'acheva.

électronique, une machine franchissait les limites de son domaine d'utilisation originel et exclusif, c'est-à-dire le calcul scientifique¹²³, pour pénétrer une sphère, celle du commerce, où il ne serait plus seulement question de calcul pur, mais également et surtout de *traitement de données*. S'il était alors toujours question de manipuler de l'information, celle-ci ne relevait plus maintenant du seul domaine privilégié des mathématiques mais se voyait comme multipliée et diversifiée au gré de la définition des applications inédites impliquées par l'ouverture de ce nouveau marché. Les modalités d'utilisation de la machine électronique s'en trouvaient donc du même coup profondément modifiées puisque d'un *modus operandi* qui impliquait la spécification de programmes longs et complexes appliqués par la suite, et pendant des intervalles de temps conséquents, à un nombre relativement peu important de données scientifiques dissemblables, on passait à des programmes plus courts et plus simples conçus pour traiter rapidement un nombre considérable d'informations¹²⁴ similaires les unes aux autres. Ceci ne doit toutefois pas nous conduire à conclure que les machines spécialement destinées aux *business applications* différaient radicalement, du point de vue du *design*, de leurs homologues scientifiques. En vérité, il serait parfaitement erroné d'affirmer que leur apparition au début des années cinquante constitua une rupture ou une révolution véritables au sein de ce *phylum* technique. La distinction susceptible d'être ainsi faite entre les ordinateurs militaires et/ou scientifiques et les machines civiles de l'époque, donc incidemment celle qu'il est permis d'établir entre *computer*, *calculator* et «ordinateur», est en fait très loin d'être aussi nette que ce que l'on serait parfois tenté de penser. Le *Defense Calculator* d'I.B.M., dont nous avons déjà parlé plus haut, constitue à cet égard un exemple tout à fait significatif: s'il fut effectivement conçu pour répondre initialement à des besoins typiquement scientifiques, en l'occurrence ceux de la marine américaine, il ne tarda pas à donner naissance à une lignée commerciale, les machines de type 701¹²⁵, qui, techniquement, héritèrent de toutes les caractéristiques de leur modèle militaire. De façon un peu surprenante, les 19 exemplaires de cette machine, pourtant conçue pour une utilisation commerciale, furent vendus, ou plutôt arrentés, à l'U.S. *Defense Department* et à des firmes aérospatiales liées à l'industrie de l'armement. Les problèmes à la résolution desquels elles furent initialement

¹²³ Nous déjà avons mentionné les calculs liés à la résolution d'équations relevant du domaine de la balistique (établissement de tables de tir et de bombardement) mais il convient d'ajouter à cela des applications attachées aux secteurs de l'aéronautique, de l'hydrodynamique, de la recherche sur l'élasticité des matériaux, de la statistique, de la logistique, de la physique et de la chimie.

¹²⁴ Nous reviendrons plus tard et de manière détaillée sur ce bouleversement.

¹²⁵ L'I.B.M. 701 constitua la réponse de la firme de Thomas J. Watson Jr. à l'U.N.I.V.A.C. de *Remington Rand*. Précisons toutefois qu'avant de décider de la mise en chantier du 701, I.B.M. avait développé un projet de recherche, la *Tape Processing Machine* (T.P.M.), qui à l'instar d'U.N.I.V.A.C., utilisait comme périphérique d'I/O (Input/Output, ou Entrée/Sortie) un dispositif à bande magnétique.

assignées relevaient de la conception d'armes, du calcul des trajectoires des vaisseaux spatiaux et de la cryptanalyse. Ce n'est qu'après coup qu'elles furent utilisées par ces mêmes organismes – sans toutefois subir de modifications matérielles - pour effectuer le même type de tâches que celles qui étaient alors confiées par d'autres corps à l'U.N.I.V.A.C (il s'agissait de résoudre des questions de logistique pour les agences militaires, d'établir des rapports financiers ou actuariels ou de constituer des registres de paiement, ce fut ainsi le cas pour la *North American Aviation*). En 1956, un modèle 701 fut même utilisé par une chaîne télévisée nationale pour prédire les résultats de l'élection présidentielle américaine¹²⁶. Son pronostic final s'avéra correct puisque Dwight D. Eisenhower fut réélu. L'I.B.M. 701, bien qu'annoncé publiquement comme un ordinateur destiné à effectuer des applications commerciales fut par conséquent d'abord employé à la résolution de calculs scientifiques et militaires. La situation de l'U.N.I.V.A.C. différait quelque peu de ce que nous venons d'évoquer au sujet du modèle 701 en ce sens qu'il n'était pas directement dérivé d'un système militaire (bien qu'il ait été conçu à partir des schémas de l'E.D.V.A.C., une machine essentiellement utilisée par l'armée). Cependant, à l'instar de l'I.B.M. 701, il fut quelquefois employé à la résolution de problèmes scientifiques liés à des projets militaires classifiés. La liste suivante répertorie la presque totalité¹²⁷ des agences gouvernementales et des entreprises américaines qui ont utilisé un U.N.I.V.A.C. au cours des années cinquante :

Liste 1 : principaux utilisateurs d'U.N.I.V.A.C. aux Etats-Unis à partir de l'année 1951.

1. *Department of the Air Force, Office of the Air Comptroller. Pentagon, Washington, D.C.*
2. *Department of the Army, Corps of Engineers Army Map Service, Washington, D.C.*
3. *Atomic Energy Commission, New York University, New York.*
4. *Atomic Energy Commission, Lawrence Livermore National Radiation Laboratory, University of California, Livermore, Californie. (U.N.I.V.A.C. 5).*
5. *Department of the Navy, Bureau of Ships, Washington, D.C.*
6. *Remington Rand Inc., UNIVAC Service Bureau, New York.*
7. *General Electric Company, Major Appliance Division, Louisville, Kentucky.*
8. *Metropolitan Life Insurance Co., New York, N.Y.*
9. *Air Force Materiel Command, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, Ohio.*
10. *United States Steel Corp., National Tube Division, Pittsburgh Pennsylvanie.*

¹²⁶ Ceci illustre parfaitement la volonté qui animait *I.B.M* de prouver que son calculateur électronique civil était tout aussi performant que l'U.N.I.V.A.C. Cette mise en scène télévisée dont fit l'objet le modèle 701 avait également pour objectif de mettre un terme à l'embarrassante popularité dont jouissait la machine de *Remington Rand* après qu'elle ait effectué une performance identique durant les élections de 1952.

¹²⁷ Il y en eu en fait 22 mais nous n'avons été en mesure que d'en identifier 19 avec certitude.

11. *E.I. DuPont de Nemours Co.*, Wilmington, Delaware.
12. *Bureau of the Census, Department of Commerce*, Washington D.C.
13. *United States Steel Corp, Gary Works Gary*, Indiana.
14. *Franklin Life Insurance Co.*, Springfield, Illinois.
15. *Westinghouse Electric Co.*, Pittsburgh, Pennsylvanie.
16. *Pacific Mutual Life Insurance Co.*, Los Angeles, Californie.
17. *Sylvania Electrical Products Inc.*, New York, N.Y.
18. *Chesapeake & Camp, Ohio Railway Co.* Cleveland, Ohio.
19. *Commercial Consolidated Edison Co. of N.Y. Inc., Commercial Relations Department*, New York, N.Y.
(Deux machines).

Comme on peut le constater, la grande majorité des utilisateurs d'U.N.I.V.A.C. était sans grande surprise constituée par des entreprises privées ou des agences administratives gouvernementales (numéros 6,7,8,10,11,12,13,14,15,16,17,18 et 19). A côté de cela, on peut également remarquer que certains départements militaires américains s'étaient aussi dotés de cette machine à vocation pourtant commerciale (numéros 1, 2, 5 et 9). Ce fut par exemple le cas de la *Wright-Patterson Air Force Base* dont on sait que le système fut utilisé, entre autres tâches de nature logistiques ou comptables, pour calculer une estimation du budget fiscal devant être alloué aux pièces de rechange pour l'année 1956¹²⁸. L'U.N.I.V.A.C. n°2, installé au Pentagone pour le compte de l'*Air Comptroller* de l'*U.S. Air Force* devait quant à lui être assigné à la résolution de problèmes logistiques relatifs à l'acheminement de troupes armées et de matériel définis dans le cadre du projet S.C.O.O.P. (*Scientific Computation Of Optimum Problems*). En fait la plupart des structures de l'armée qui investirent dans l'U.N.I.V.A.C. employèrent ce dernier pour exécuter des travaux semblables à ceux qui étaient menés dans les entreprises. Mais cet ordinateur ne servit pas uniquement à accomplir des travaux administratifs ou de gestion. On sait ainsi, et ce ne fut pas là un cas isolé, que l'U.N.I.V.A.C. du *Lawrence Livermore Labs* réalisa une série de calculs relatifs à la conception ou au perfectionnement d'armes secrètes¹²⁹. Le fait qu'une machine construite foncièrement pour un usage civil ait été employée de la sorte à des fins militaires qui n'avaient plus rien à voir avec l'intendance ou l'administration nous permet de nous rendre pleinement compte du peu de différence qui existait finalement entre les calculateurs de ce type et les systèmes destinés à l'armée ou aux centres de calculs scientifiques. Qu'il se soit agi de *computers* (une désignation usitée d'abord pour désigner spécifiquement des dispositifs militaires et

¹²⁸ In [Cerruzi 1998], p.31.

¹²⁹ *Ibidem*. Ces calculs étaient très sûrement en rapport avec l'arme atomique puisqu'il s'agissait d'un laboratoire de l'*Atomic Energy Commission*.

scientifiques, puis étendue par la suite aux systèmes civils) ou de *calculators* (un terme utilisé par I.B.M.) les machines demeuraient les mêmes à quelques caractéristiques techniques près. Il est d'ailleurs intéressant de noter que l'U.N.I.V.A.C. n'introduisit que très peu d'innovations techniques par rapport à ses prédécesseurs électroniques. Parmi ces dernières figuraient néanmoins, et pour la première fois, quatre caractéristiques de première importance qui devaient par la suite devenir communes à tous les calculateurs électroniques :

1. L'U.N.I.V.A.C. permettait à la fois le traitement de données numériques et alphanumériques.
2. Il faisait un usage intensif de bits supplémentaires pour exécuter les procédures de vérification d'absence d'erreurs (*checking*) pendant et après l'effectuation du calcul.
3. La mémoire de masse (stockage des données) était supportée par des bandes métalliques magnétisées.
4. Il comportait des circuits, appelés *buffers*, qui autorisaient des transferts de données rapides entre les lignes mémoire à délai mercure et les unités de stockage plus lentes (ici les bandes magnétiques).

Le trait technologique distinctif qui contribua à asseoir définitivement l'extrême popularité de l'U.N.I.V.A.C. auprès des consommateurs était en fait son unité d'entrée/sortie, à savoir le système à bande magnétique dont il était doté en série. Eckert et Mauchly, qui, à la suite du rachat d'*E.M.C.C.* par *Remington Rand*, avaient été maintenus dans leurs fonctions respectives, avaient en effet proposé pour U.N.I.V.A.C., en lieu et place de l'utilisation des cartes perforées comme supports primordiaux d'entrée/sortie, l'usage d'une bande métallique magnétisée censée remplir, plus commodément et plus rapidement¹³⁰, les mêmes fonctions que ses équivalents cartonnés. Ce dispositif, qui fut retenu, permettait par exemple à la machine de *Remington Rand* de lire une séquence de données stockées sur le support magnétique, de la transférer en mémoire, de la modifier, puis de l'écrire ensuite sur la bande

¹³⁰ Ce système inédit autorisait une vitesse de 12800 caractères par seconde, tant en lecture qu'en écriture. Les bandes, d'un demi pouce de largeur, étaient disponibles dans une longueur de 100, 200, 500 ou 1500 pieds avec, respectivement, une densité d'enregistrement correspondant à 20, 50, 120, ou 128 caractères par pouce. Dans les deux cas, la vitesse de déroulement de la bande était de 100 pouces par seconde.

d'où elle avait été extraite ou sur une autre bande également disponible. Le tout pouvait être contrôlé automatiquement par la machine au moyen de programmes spécialement conçus dans ce but. U.N.I.V.A.C., ainsi assorti de son système de stockage magnétique, pouvait très avantageusement remplacer l'équipement de traitement de données classique et les cartes perforées qui avaient jusqu'alors été utilisés dans le domaine commercial. En outre, l'U.N.I.V.A.C. disposait d'une gamme complète de périphériques qui permettait d'assurer une compatibilité ascendante et descendante totale entre l'ancien équipement électromécanique ou électronique et la nouvelle technologie qu'il implémentait¹³¹. On comprend alors quelle menace sérieuse cette machine pouvait représenter pour I.B.M.; celle-ci, bien que sa désignation ne l'indiqua pas, c'est en fait tout le contraire, n'était plus seulement un calculateur (*computer* ou *calculator*), mais bel et bien ce que nous appelons un « ordinateur », c'est-à-dire une machine conçue pour le traitement automatique de l'information (*information automatic processing machine* ou *data processing machine*). Pour les acheteurs, c'était donc le remplacement des cartes perforées – peu commodes à utiliser et fort coûteuses en temps de travail - par les bandes magnétiques qui constituait la véritable révolution. Pour eux, la nature automatique de la machine résidait principalement en cela : elle était capable de scanner rapidement une bobine de bande, de retrouver une séquence de données précise, de la transférer en machine, de la traiter, et de l'enregistrer à nouveau sur le ruban. Il était d'ailleurs assez fréquent que les utilisateurs de cette machine parlent d'elle comme d'un « cerveau électronique » puisque qu'elle semblait « savoir¹³² » où trouver automatiquement, pour les extraire, les données requises en déroulant ou en rembobinant la bande jusqu'à l'emplacement exact où elles étaient stockées. *Remington Rand* ne s'y trompa d'ailleurs pas puisque bon nombre de publicités de l'époque vantant les mérites de ce système s'y référaient comme à une *Tape Machine* (machine à bande). Jusqu'à l'arrivée de l'U.N.I.V.A.C., I.B.M. avait été incontestablement le leader dans le domaine extraordinairement lucratif du traitement de données commerciales, de la même manière qu'il était encore le principal industriel dans le secteur du calcul électronique, et cela bien qu'il ne disposât pas d'un système tel que celui que proposait *Remington Rand*. Mais la conjoncture était en passe de basculer et pour I.B.M. le

¹³¹ Des dispositifs de ce type étaient absolument nécessaires puisque la totalité des données enregistrées dont disposaient au départ les organismes cités l'avaient été sur des cartes perforées. Notons par exemple l'existence de deux ingénieurs convertisseurs dont l'un permettait le transfert des données à partir de cartes perforées vers les bandes magnétiques (*Card-to-Tape-Converter*, en entrée), et l'autre l'exportation des informations enregistrées sur bande vers des cartes perforées (*Tape-to-Card-Converter*, en sortie). Ces systèmes permettaient en outre d'assurer une parfaite transmissibilité de l'information entre les services équipés d'U.N.I.V.A.C. et ceux qui ne l'étaient pas.

¹³² Nous pourrions interpréter cela comme l'occurrence - précoce - d'une forme d'intentionnalité prêtée par le public à la machine et ce au sens «dennettien» du terme, c'est-à-dire instrumental.

pire restait à venir : le 31 mars 1951, le premier U.N.I.V.A.C. fut livré au *U.S. Census Bureau*. Quarante-trois modèles de cet ordinateur furent livrés par la suite, soit à des agences gouvernementales, soit à des industriels. Ceci contribua progressivement à faire de *Remington Rand* la première compagnie mondiale dans le secteur de la fabrication et de la vente d'ordinateurs. Durant l'année 1952 eurent lieu aux Etats-Unis des élections présidentielles qui opposèrent Dwight D. Eisenhower à Adlai Stevenson. Les dirigeants de la chaîne télévisée C.B.S. avaient pris les dispositions nécessaires afin qu'un U.N.I.V.A.C., en fait la cinquième unité de cette série de machines¹³³, calcule l'issue du suffrage en se basant sur un certain pourcentage (7%) des premiers votes exprimés. Pour d'évidentes raisons de logistique, la machine ne fut pas installée sur le plateau du studio de New York. En lieu et place du véritable U.N.I.V.A.C., un panneau de contrôle factice truffé de lampes clignotantes y fut assemblé. A 20 heures et 30 minutes, instant où les résultats des premiers scrutins commençaient à être connus, la machine prédit une victoire écrasante d'Eisenhower sur son malheureux adversaire. S'ensuivit alors une discussion entre les responsables de la chaîne C.B.S., les responsables des élections et les *informaticiens*. Compte tenu de l'écart de voix réellement important qui avait été pronostiqué par l'ordinateur, la décision fut prise de ne pas prendre le risque d'annoncer un tel résultat. Des ajustements dans les constantes du programme furent effectuées et, une fois relancé, l'ordinateur prévit une victoire sans concessions en faveur d'Eisenhower. La machine fut encore vérifiée, des corrections supplémentaires furent apportées au programme et il s'ensuivit une prédiction plus modeste, laquelle était néanmoins toujours favorable à Eisenhower. C'est ce résultat qui fut finalement annoncé à l'antenne à 21 heures 15 minutes. Lorsque la totalité des scrutins fut enfin dépouillée, il s'avéra que la première prédiction de l'U.N.I.V.A.C. était presque exacte... Bien que la gestion de cet événement ait constitué un demi-échec pour les gens de *Remington Rand* et de *C.B.S.* - les hommes n'avaient pas eu confiance dans la fiabilité de leur propre machine - l'impact qu'il eut sur le public américain fut absolument considérable. Ainsi, pendant les quelques années qui suivirent cette consultation électorale, le nom d'U.N.I.V.A.C. devint synonyme du mot *computer*¹³⁴ !

Nous avons déjà longuement évoqué le souci et le soin que portait tout particulièrement Thomas J. Watson Sr. aux choix qu'il convenait de faire quant à la désignation des instruments de calcul, qu'ils aient été électroniques ou non, commercialisés

¹³³ Pour l'anecdote, précisons qu'il s'agissait de la machine du *Lawrence Livermore National Radiation Laboratory*.

¹³⁴ A la manière dont des marques déposées telles que *Frigidaire* et *Thermos* ont pu être utilisées – elles le sont encore du reste - pour désigner de façon générique les bouteilles isolantes ou les réfrigérateurs.

par I.B.M. Pour des raisons jugées primordiales d'image publique et de *marketing*, il commença, très tôt, à exiger ainsi que les nouveaux systèmes de calcul produits par sa firme soient nommés des *calculators* et non des *computers*. Dans un contexte socio-économique marqué par l'irrépressible montée en puissance qu'avait entamé et finalement achevé *Remington Rand* dans le domaine du calcul électronique, et ce jusqu'à venir menacer directement la suprématie industrielle d'*I.B.M* et dépasser cette firme, en termes de popularité, avec l'*U.N.I.V.A.C.*, Thomas J. Watson Sr. et ses deux fils se devaient plus que jamais de maintenir la politique efficace de différenciation et de prudence à laquelle ils avaient toujours été fidèles. En 1951, la commercialisation d'*U.N.I.V.A.C.* avait inauguré l'ouverture d'un nouvel espace de diffusion pour les calculateurs électroniques. Ils ne seraient désormais plus uniquement employés aux travaux scientifiques ou d'ingénierie pour lesquels ils avaient été originellement fabriqués mais se verraient, pour la première fois et plus largement, affectés à des tâches impliquant le traitement de données qui ne seraient plus de nature exclusivement mathématique. L'introduction en 1952 de l'*I.B.M. 701*¹³⁵, officiellement, et pour la première fois, désignée comme une *Electronic Data Processing Machine*¹³⁶ c'est-à-dire une machine électronique pour le traitement des données, reflète de manière absolument certaine la prise de conscience, et donc la prise en compte, de cette nouvelle donne par I.B.M. Face à la menace commerciale grandissante que représentait la machine de *Remington Rand* et aux bouleversements qu'elle introduisait dans la sphère du calcul électronique, les dirigeants de cette firme avaient ainsi su faire preuve d'une certaine réactivité. Ils se devaient désormais d'étendre leurs efforts à l'étranger et plus particulièrement à l'Europe, sûrement une des clés de la domination économique de demain. C'est précisément dans cette conjoncture techno-économique sans précédents, et pour répondre aux problèmes qu'elle impliquait à l'échelle internationale, que le terme *ordinateur*, ou plus exactement sa nouvelle acception, fut créée en France en 1955.

¹³⁵ Le modèle 701 E.D.P.M. fut annoncé par I.B.M. au mois de mai 1952, mais les premières livraisons (hors I.B.M. qui reçut une unité 701 en décembre 52), de ce matériel ne devaient pas commencer avant le début de l'année 1953, soit quelques deux années après que le premier *U.N.I.V.A.C.* ait été effectivement livré au *Bureau of Census* de Washington D.C. (en mars 1951). Durant cet intervalle de temps, I.B.M. n'eut rien à proposer à sa clientèle qui fut véritablement équivalent à l'*U.N.I.V.A.C.* Seule l'incapacité de *Remington Rand* à fabriquer plus de machines et à fournir une assistance de qualité à sa clientèle déjà existante empêcha I.B.M. de perdre plus de clients.

¹³⁶ L'expression fut inventée par James W. Birkenstock, manager général des ventes d'I.B.M. en 1946. Nous ne manquerons pas de remarquer l'évidente parenté de cette expression avec celle, plus ancienne, d'*Electric Accounting Machine*, à laquelle la firme avait recouru pour nommer ses équipements de bureau électrifiés. Une certaine forme de continuité terminologique était donc maintenue entre les anciens systèmes (par exemples les types 603 et 604) et les récentes machines électroniques (I.B.M. E.D.P.M 701 et 702).

1.1.4. Reprise et actualisation du mot « ordinateur ».

Nous avons démontré plus haut que la langue anglaise distinguait clairement, et cela dès à partir du milieu du XVII^e siècle, entre les termes *computer* et *calculator*. Le mot *computer* désignait ainsi une personne qui calculait au moyen d'un instrument alors que le substantif *calculator* était utilisé pour signifier précisément ce dispositif. Nous avons également établi que le français n'autorisait pas une telle discrimination, le mot «calculateur» valant à la fois pour la personne *et* le système technique¹³⁷ employés, conjointement ou non, à l'effectuation d'un calcul. Dans ces conditions particulières, et au moment même où aux Etats-Unis une nouvelle bataille économique venait de s'engager entre *Remington Rand* et *I.B.M.* pour la conquête du marché nouvellement ouvert des machines électroniques destinées au traitement de données commerciales, on comprend sans peine dans quel genre d'embarras ne manquèrent pas de se trouver les dirigeants de cette dernière face aux choix qu'il fallait rapidement et impérativement faire concernant les désignations des nouvelles machines destinées à l'export européen. La France (et les pays européens francophones) constituait à ce titre un cas de figure tout à fait original. En effet, il s'avère que l'emploi d'un terme équivalent à *computer* y était d'emblée exclu et ce pour deux raisons essentielles : d'abord, et très simplement, parce qu'il n'en existait pas de correspondance en français (en dehors bien sûr du terme «calculateur », lequel était aussi la traduction de *calculator*). Ensuite, et quand bien même un tel mot aurait été effectivement disponible pour cet usage particulier, la ligne de conduite d'*I.B.M.* en matière de terminologie marchande avait toujours consisté à veiller à ce que le substantif *computer*, et conséquemment les mots qui pourraient lui être sémantiquement équivalents dans une langue étrangère - ne soit jamais usité pour désigner un de ses produits. Cette possibilité ayant été d'emblée écartée, il demeurait à côté de cela deux possibilités lexicales également envisageables, l'une comme l'autre susceptibles de faire l'objet d'une opération de traduction peu coûteuse en termes de temps et de moyens. Il s'agissait alors soit de transcrire en français le vocable *calculator*, qu'*I.B.M.* avait largement utilisé et utilisait encore aux Etats-Unis, ou bien de trouver un équivalent hexagonal pour la dénomination *Electronic Data Processing Machine* qui venait d'être publiquement introduite dans le courant du mois de mai de l'année 1952¹³⁸. Cette dernière option, pourtant, n'allait pas sans poser un certain nombre de problèmes. Bien entendu, cette appellation pouvait se prêter sans grandes difficultés à l'exercice d'une transposition en français. On obtenait dans ce cas,

¹³⁷ A condition et à condition seulement que ce dernier autorise une mécanisation du calcul, même partielle.

¹³⁸ Rappelons que 1952 est l'année où fut publiquement annoncé l'*I.B.M. Type 701 E.D.P.M...*

et à quelques variations mineures près, la traduction suivante : machine électronique destinée au traitement des données. Bien que celle-ci soit absolument correcte, et par conséquent tout à fait recevable du strict point de vue des exigences syntaxiques et grammaticales de la langue, il faut cependant concéder qu'elle était empesée, moins « compacte » que son égal américain, peu fonctionnelle dans la perspective d'un usage courant, et à coup sûr très difficilement mémorisable. La définition d'une désignation spécifiquement recherchée pour provoquer une réaction positive dans l'esprit du public français et celui de ses consommateurs éventuels vis-à-vis des nouvelles machines d'I.B.M. – rappelons ici, s'il est encore besoin, que cette démarche avait été entreprise dans le cadre d'un vaste processus de *marketing* – éliminait également la possibilité de recourir, comme c'était le cas aux Etats-Unis, à un acronyme. En respectant, et c'était là quelque chose d'absolument nécessaire du point de vue de l'argumentaire de vente, la conformation de l'appellation française originelle, c'est-à-dire machine électronique destinée au traitement des données, il aurait fallu construire un sigle tel que M.E.D.A.T.D.D., lequel, il faut bien l'accorder, ne semble exhiber aucune des vertus mnémoriques que l'on est en droit d'attendre habituellement d'un expédient de ce type. Non seulement une telle dénomination aurait été excessivement difficile à diffuser auprès du public, mais elle n'aurait en aucun cas permis d'atteindre efficacement les objectifs capitaux pour lesquels elle avait initialement élaborée, à savoir : 1°) autoriser le public français à identifier rapidement, sûrement, et de manière simple et pratique les récentes machines d'I.B.M. ; 2°) identifier sans ambiguïté possible ces systèmes comme étant des *Electronic Data Processing Machine* conçues pour le traitement de données alphanumériques dans un cadre civil, et non des calculateurs scientifiques ou militaires ; 3°) permettre de souligner et de renforcer l'écart identitaire qui particularisait déjà I.B.M. par rapport à ses concurrents et 4°) tirer parti du fait que *Remington Rand*, le principal adversaire d'I.B.M. à cette époque, continuait à nommer ses machines électroniques pour le traitement des données des *computers*¹³⁹, terme alors associé exclusivement aux appareils dédiés aux usages militaires et scientifiques. Ainsi, ni la traduction littérale d'*Electronic Data Processing Machine* en français, ni le ou les sigles qui étaient susceptibles d'en être immédiatement dérivés ne se révélèrent adéquats pour satisfaire les desseins particuliers que nourrissait I.B.M. Restait alors l'option que constituait la transcription du mot *calculator* en langue française, laquelle finalement ne s'avéra pas plus recevable que les autres possibilités qui avaient été autrement

¹³⁹ La machine de *Remington Rand* fut commercialisée en France sous le sigle U.N.I.V.A.C., lequel comprenait bien sûr le terme *computer* (le « C » d'U.N.I.V.A.C.). Entre autres acheteurs, la firme américaine devait compter l'Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (I.N.S.E.R.M.), qui se porta acquéreur d'un U.N.I.V.A.C. 1107 en 1968. Ce système fut partagé avec l'Institut Gustave Roussy. (I.G.R.).

examinées. *A priori*, ce terme présentait pourtant toutes les garanties propres à faire de lui le « candidat » idéal que recherchait l'entreprise américaine. C'était un vocable officiellement consacré, dont le choix de l'emploi avait été décidé aux plus hauts échelons hiérarchiques de la corporation, et qui avait donc fait l'objet d'une très large utilisation par I.B.M. comme alternative au mot *computer* (ce dernier ayant été estimé commercialement risqué par Thomas J. Watson Sr.). En outre, il possédait un équivalent direct en français : « calculateur ». Tout, par conséquent, semblait concourir à l'élection de ce terme, ou tout du moins à celle de sa traduction en français, pour désigner les machines d'I.B.M. Ce ne fut pourtant pas le cas. Malgré les avantages notoires et indéniables que pouvait comporter ce mot, il était dans notre langue simultanément porteur d'une contrepartie négative qui conduisit en définitive à son rejet. D'abord, le terme « calculateur » était foncièrement inadapté pour véhiculer directement et simplement l'idée, absolument essentielle du point de vue commercial, selon laquelle les nouvelles machines d'I.B.M. avaient été conçues dans l'optique de traiter des données qui ne ressortissaient plus uniquement du domaine scientifique ou militaire, c'est-à-dire des informations d'essence mathématique impliquées par la résolution de problèmes particuliers, très fréquemment classifiés, mais dans tous les cas extrêmement complexes. Elles étaient tout au contraire destinées aux banques, aux assurances, aux grandes compagnies industrielles ou aux organismes de transport, ..., bref à un usage civil relevant essentiellement du secteur économique tertiaire de nos sociétés. Ensuite, comme nous l'avons précédemment noté, le concept de « calculateur » est dangereusement ambivalent puisqu'il admet en compréhension à la fois l'idée de « celui qui calcule » en même temps que celle de l'instrument qui sert au calcul. L'élire, ç'aurait donc été se retrouver inscrit dans une problématique quasi similaire à celle qui avait antérieurement conduit Thomas J. Watson Sr. à rejeter définitivement le terme *computer* et à lui préférer celui de *calculator*, à la différence près qu'ici, en lieu et place d'une alternative concevable, on ne disposait que d'un seul et même terme qui condensait en son sein les différentes composantes de la difficulté. On comprend donc à la lumière de ces explications que le terme « calculateur » ne pouvait décidément pas satisfaire les exigences d'I.B.M. D'une part il était impropre à manifester directement la spécificité des nouvelles machines pour la représentation desquelles il aurait pu être choisi et, d'autre part, il réintroduisait sous une nouvelle guise et en la cristallisant littéralement la difficulté conceptuelle autrefois soulevée aux Etats-Unis par la question de l'utilisation stratégique des substantifs *computer* ou *calculator*. Les termes « calculateur », « computer », ainsi que la peu commode désignation « machine électronique destinée au traitement des données » ayant été écartés pour les raisons que nous venons d'examiner, ne restait désormais à I.B.M. que la

solution d'un démarche consistant à forger pour l'occasion un terme – ou un sens original destiné à un terme existant - *ad hoc* afin de représenter adéquatement sa gamme de systèmes E.D.P.M, c'est-à-dire en prenant minutieusement en compte la série de contraintes que nous avons identifiée.

Le mot « ordinateur », à la différence de ce que l'on peut lire parfois¹⁴⁰, n'a pas été créé en 1955. Etymologiquement il procède en fait du latin *ordīnātōr*, qui signifie « celui qui met en ordre, qui règle » ou encore l'«ordonnateur¹⁴¹ ». Cette notion générale de mise en ordre, de disposition régulière des choses et des êtres est également présente dans les termes parents *ordīnārīus* (« rangé par ordre¹⁴² »), *ordīnare* (« action de mettre en ordre, d'ordonner, de disposer, d'arranger, de répartir de manière réglée¹⁴³ »), ou encore *ordīnātīvus* (« qui marque l'ordre, la succession¹⁴⁴ »). L'idée générale dont sont porteurs ces différents mots est donc celle de l'instauration d'un certain ordre ou d'une distribution réglée là où auparavant il n'y avait pas du tout, ou seulement très peu, d'harmonie ou de cohésion. L'*ordīnātōr* est donc celui qui transforme une diversité indistincte ou confuse, une collection de minéraux ou une troupe militaire au repos par exemple, en un ensemble agencé de manière logique où la succession des éléments constitutifs ne se donne plus à voir sous la modalité de la dispersion mais sous celle de l'organisation. Etre un *ordīnātōr*, un ordinateur, c'est donc être fondamentalement une instance qui méthodiquement introduit de l'ordre, c'est-à-dire un certain nombre de rapports, de règles ou de relations quantitatives et/ou qualitatives, dans une variété indéterminée préexistante. Ceci est confirmé plus sûrement encore lorsque l'on sait qu'*ordīnātōr* provient d'*ordo*, terme qui en latin signifie rang, rangée, ligne (précisons que les multiples figures de l'ordre ne se réduisent pas à la seule disposition sérielle mais que celle-ci en constitue néanmoins une des composantes primordiales. Qu'est-ce donc après tout qu'une tortue romaine, sinon une succession rapprochée et coordonnée de lignes ou de rangs, selon la manière dont on se place pour l'observer ?). Quiconque aujourd'hui se munit d'un dictionnaire de français courant découvrira fréquemment à l'entrée « ordinateur », et parfois même uniquement, une définition similaire à celle-ci. : « ...*machine automatique de*

¹⁴⁰ Sur Internet, il existe un très grand nombre de sites consacrés à l'histoire générale de l'informatique et des ordinateurs. Malheureusement, et lorsqu'il en est seulement fait mention, les conditions dans lesquelles le mot *ordinateur* a été introduit dans le domaine des calculateurs électroniques sont très fréquemment rapportées de manière erronée : on peut ainsi très souvent lire que ce terme a été créé par Jacques Perret. Il convient donc de faire montre d'une très grande prudence quant à l'utilisation que l'on peut faire des informations contenues dans certaines de ces pages.

¹⁴¹ F. Gaffiot, *Dictionnaire Latin Français*, Paris, Hachette, 1934, p.1090.

¹⁴² *Ibidem*.

¹⁴³ *Ibidem*.

¹⁴⁴ *Ibidem*.

*traitement de l'information obéissant à des programmes formés par des suites arithmétiques et logiques*¹⁴⁵».

Passons sur les qualités et les défauts propres à cette détermination particulière et remarquons immédiatement qu'au regard de ceci tout semble indiquer aujourd'hui que nous sommes finalement passés de manière relativement abrupte de l'acception du mot latin *ordīnātōr* au sens contemporain du terme « ordinateur », qui sert à désigner essentiellement une machine électronique destinée au triage, à l'arrangement, au réarrangement, à la modification, bref à l'ordonnancement ou au traitement de données. Cela revient à affirmer que si la fin ou l'orientation ordinatrice a sans conteste été maintenue dans la signification actuelle de ce terme, l'agent qui procède à une telle distribution ou organisation ne relève cependant plus aujourd'hui du domaine de l'humain mais, plus spécifiquement, de celui du machinal. Pourtant croire cela se serait manquer, et donc perdre, une des dimensions les plus essentielles et indispensables du mot « ordinateur » sans la considération de laquelle il deviendrait tout à fait inenvisageable de prétendre sérieusement saisir la portée véritable de ce terme, fut-ce, et peut-être même surtout, dans son sens le plus actuel. Remarquons alors que le latin *ordīnātiō* (action de mettre en ordre, disposition, arrangement), a donné en français le mot ordination. Ce mot désigne de façon générique - bien que cette signification soit de nos jours trop facilement omise - un acte sacramentel au cours duquel un chrétien reçoit des mains d'un évêque le sacrement¹⁴⁶ de l'ordre durant une cérémonie religieuse. Il s'agit donc là d'un geste liturgique qui vise à sanctifier¹⁴⁷ le croyant, c'est-à-dire à le rendre saint. Cette sanctification, par conséquent, instaure (baptême, mariage ou ordination) ou restaure (pénitence) un ordre moral et spirituel (grâce sanctifiante et caractère dans le cas du sacrement de l'ordre ou ordination) qui n'a jamais été avant ou qui a été perdu, parfois en raison des péchés commis. Or celui-là même qui procède à la cérémonie d'ordination se nomme non seulement un « ordinant », mais également un « ordinateur » (*ordīnātōr*), tandis que celui qui se prépare ou se présente pour rentrer dans les ordres s'appelle ordinand. L'ordinateur (ordinant) est ainsi l'*individu* qui confère les ordres sacrés. Il est une cause ordinatrice, une instance qui, au nom de la règle religieuse, met de l'ordre dans « l'âme » des croyants ou les consacre cérémonieusement afin de leur permettre effectivement d'entrer en religion. Voici une acception peut-être inattendue du mot « ordinateur », tant elle est oubliée aujourd'hui, qui,

¹⁴⁵ Eveno B. et al. *Le Petit Larousse Grand Format 2000*, Paris, Larousse, 1999, p.721.

¹⁴⁶ Pour les Eglises catholiques et orientales, il existe sept sacrements : l'extrême-onction, l'eucharistie, le mariage, l'ordre, la confirmation, le baptême et la pénitence. Les Eglises protestantes n'en reconnaissent que deux : le baptême et l'eucharistie.

¹⁴⁷ Par extension, « sanctifier » signifie aussi célébrer selon la loi chrétienne.

semble-t-il, nous écarte d'une façon frappante des machines électroniques pour la détermination desquelles il est presque exclusivement employé maintenant. Nous amenant à délaisser radicalement le champ lexical du calcul automatisé, elle nous fait directement pénétrer dans celui du cérémonial religieux. Surprenante bifurcation sémantique que celle-ci en vérité puisque rien, *a priori*, ne semble permettre d'identifier aisément une contiguïté ou une continuité quelconques entre ces deux champs – en l'occurrence le Sacré et le calcul électronique - dont l'hétérogénéité et l'exclusivité mutuelles ne sauraient raisonnablement être mises en doute. S'agit-il là alors d'un pur accident ? D'une coïncidence fortuite comme celles que nous réserve parfois l'étude d'un mot familier dont on ne soupçonnait pas jusqu'alors les métamorphoses et les adjonctions de sens, quelquefois perdus, qu'il avait pu subir tout au long de son existence ? Ce n'est bien sûr pas le cas. Pour se trouver en mesure d'identifier ce lien, il convient d'abord et avant tout de se souvenir que l'acception liturgique du terme « ordinateur » était bien antérieure à celle visant une machine électronique utilisée pour le traitement de données. Ensuite, rappelons-nous qu'à la racine commune de ces termes aux significations pourtant différentes, on trouve une notion originaire partagée : celle de mise en ordre. A partir de ce point, et pour enfin apporter une réponse à notre interrogation, il nous faut nous référer au courrier qu'écrivit le 16 avril 1955 le professeur Jacques Perret à la compagnie I.B.M. France :

« Que diriez-vous d'ordinateur ? C'est un mot correctement formé, qui se trouve même dans le Littré comme adjectif désignant Dieu qui met de l'ordre dans le monde. Un mot de ce genre a l'avantage de donner aisément un verbe ordiner, un nom d'action ordination. L'inconvénient est que ordination désigne une cérémonie religieuse ; mais les deux champs de signification (religion et comptabilité) sont si éloignés et la cérémonie d'ordination connue, je crois, de si peu de personnes que l'inconvénient est peut-être mineur. D'ailleurs votre machine serait ordinateur (et non ordination) et ce mot est tout à fait sorti de l'usage théologique¹⁴⁸ ».

Ainsi donc, et c'est ce que révèle et souligne indubitablement cet extrait, non seulement le mot *ordinateur* participait initialement du domaine du liturgique, mais il

¹⁴⁸ Courrier daté du 16 avril 1955, adressé par le Professeur Jacques Perret, Université de la Sorbonne, à la compagnie I.B.M. France. Cet extrait de la lettre de Mr. Perret a été cité par Pierre Deveze du *Centre de Sociologie des pratiques et des représentations politiques de l'Université Paris 7 - Denis Diderot*, lors de la conférence « Intelligence... Vous avez dit intelligence ? », donnée en 1998 à l'occasion du séminaire *Ecrit, Image, Oral et Nouvelles Technologies*. Malgré notre insistance auprès des sociétés I.B.M. France et I.B.M. U.S.A., il ne nous a malheureusement pas été possible d'en obtenir l'intégralité.

appartenait plus originairement encore, et à titre adjectival cette fois, à celui du *θεός* (Dieu étant défini dans le *Littré* comme celui « qui met de l'ordre dans le monde », ou encore, comme c'est le cas dans le *Dictionnaire technique et critique de la Philosophie* d'André Lalande, en tant que « principe suprême de l'ordre dans le monde¹⁴⁹ »). Conformément à cela, et selon l'approche privilégiée par Mr. Perret, Dieu peut par conséquent être dit *grand ordinateur* ou *ordinateur absolu* du *κόσμος* puisque, après avoir créé le monde *ex nihilo*, il y instaure et y maintient continûment de l'ordre. A partir de ces éléments, nous pouvons désormais comprendre pleinement les raisons qui amenèrent I.B.M. à sélectionner finalement le mot « ordinateur » pour identifier ses machines en France. D'abord, et c'est le premier argument avancé par le Professeur Perret, le terme est « correctement formé ». Autrement dit, des points de vue syntaxique et grammatical, il est absolument inattaquable (sa rectitude étant par ailleurs attestée par sa seule présence dans le *Littré*). Ensuite, il renvoie à Dieu en tant que c'est lui qui met de l'ordre dans le monde. Cette séquence du discours, relativement concise, se contente finalement de restituer la fameuse définition du *Littré*. Cependant elle nous apprend, nous l'avons mentionné rapidement plus haut, une chose tout à fait notable : le terme « ordinateur », lorsqu'il était employé pour évoquer Dieu, l'était sous forme adjectivale. Bien entendu il ne faut pas manquer de noter qu'il existait également sous une forme nominale dans le lexique liturgique. Mais après s'être ainsi emparé de cette acception du mot directement liée au divin, I.B.M. l'a substantivée et cette substantivation, en plus de constituer un facteur de différenciation terminologique évident, lui a permis, au moins implicitement et de façon figurée, de conserver et de « transférer » en quelque sorte à ses machines cet attribut de Dieu qu'était la capacité d'instaurer en permanence un ordre parfait. Le calculateur électronique, déjà qualifiée à juste titre de machine universelle, se trouvait par là même doté en quelque sorte d'un des prédicats les plus remarquables de la divinité. Mr. Perret s'attache par la suite à souligner le fait qu'à partir du mot « ordinateur », un certain nombre d'autres termes susceptibles d'être utiles au domaine du calcul électronique pourraient être facilement dérivés. Il évoque alors les vocables « ordiner » (un verbe) et « ordination » (« un nom d'action »). S'il émet quelques réserves prudentes quant à la possibilité d'utiliser ce dernier – à partir du moment où « ordinateur » sert à désigner des machines à calculer, le mot « ordination » tombe sous l'influence simultanée de deux champs de significations, ceux de la religion et de la comptabilité (traitement de données) – il n'en interdit toutefois pas l'usage, le sens liturgique d'« ordination » s'étant, selon lui, quasiment perdu. De toute façon ajoute-t-il

¹⁴⁹ Lalande, A., *Vocabulaire technique et critique de la Philosophie*, 16^e édition, Paris, P.U.F., 1988, p. 230.

de façon définitive, le mot devant servir à désigner la machine d'I.B.M. sera « ordinateur » (et non pas « ordination »). L'histoire lui donnera raison et tort à la fois puisque « ordinateur », avec les heureuses conséquences que l'on sait, sera effectivement choisi par I.B.M. tandis qu'« ordination » et « ordiner » retomberont peu ou prou dans l'oubli duquel Jacques Perret les avait momentanément soustraits.

Dans tous les cas de figure, la firme de New-York et sa filiale française ne pouvaient que se réjouir de l'ingénieuse proposition qu'avait formulée le latiniste. Non seulement celle-ci permettait de contourner l'ensemble des obstacles délicats de traduction et de diffusion publique qui avaient pu être soulevés par des mots tels que *calculator* ou des expressions comme *Electronic Data Processing Machine* – sans même évoquer ici *computer* – mais en plus elle cristallisait autour d'elle en les manifestant explicitement toutes les caractéristiques techniques essentielles qui faisaient de la série 700 des machines d'I.B.M. des systèmes réellement inédits, à savoir des machines pour le traitement des données. D'un point de vue strictement publicitaire le terme constituait également une aubaine puisqu'il était facilement mémorisable par le public et permettait d'identifier immédiatement et certainement les systèmes I.B.M., sa nouvelle acception ayant été spécifiquement créée pour eux. Dernière chose et non des moindres, le vocable « ordinateur » avait aussi été utilisé pour parler de l'incommensurable et inexhaustible pouvoir organisateur de Dieu. Comme l'écrit non sans humour Pierre Devezé, l'ordinateur « *allait mettre de l'ordre dans le monde capitaliste, tout comme Dieu se proposait de mettre de l'ordre en ce bas-monde* ». Gageons qu'on ne saurait en effet rêver meilleur patronage pour introduire la nouvelle désignation d'une machine...

Nous nous sommes efforcés, dans cette section, d'explicitier la provenance originaires et la signification actuelle des vocables *calculator*, *computer*, et « ordinateur ». En même temps que nous nous sommes attachés à mettre en lumière leur dimension proprement racinaire, nous avons souligné leurs différences, exprimé et analysé leurs rapports sémantiques problématiques, puis nous avons tenté d'expliquer les raisons, diverses et nombreuses, pour lesquelles ils avaient pu être effectivement sélectionnés ou écartés, voire même, comme ce fut le cas pour le substantif « ordinateur », repris et sémantiquement modifiés afin de satisfaire spécifiquement aux exigences commerciales d'un constructeur de calculateurs électroniques d'envergure mondiale, *i.e.* I.B.M. En effectuant ce travail, nous avons été conduits à introduire des termes ou des expressions, tels qu'« information » ou « machine universelle de Turing », qu'il nous appartient maintenant d'examiner dans le détail. La partie suivante sera ainsi consacrée à l'examen de la notion d'« information ».

1.2. La notion d'« information ».

1.2.1. Introduction.

Nous nous interrogerons ici sur la portée et les enjeux impliqués par la notion d'« information ». Celle-ci devant être premièrement comprise et examinée dans son sens courant, celui-là même que nous lui prêtons habituellement dans le cours de nos existences quotidiennes, puis au sens mathématique, c'est-à-dire « shannonien » du terme. A l'instar de certains des concepts que nous avons précédemment examinés (e.g. « calculateur » ou « ordinateur »), remarquons que la notion d'« information », et après tout cela est bien peu surprenant, semble au premier regard aller parfaitement de soi pourvu toutefois que l'on se satisfasse pleinement de la saisir et de la comprendre de la manière dont elle se présente le plus ordinairement et le plus fréquemment à nous. Après tout, ne sommes-nous pas accoutumés par la force des choses à voir ce terme utilisé, et avec une insistance médiatique qui semble aujourd'hui bien loin de tendre vers l'épuisement, pour qualifier de façon prétendument adéquate nos propres sociétés occidentales ? N'entend-on ainsi pas dire très souvent que nous sommes entrés de plain-pied dans l'« ère de l'information » ? Ne nous martèle-t-on pas à longueur de temps que nos communautés, désormais presque systématiquement pensées en termes de coextension « symbiotique » avec leurs infrastructures de communication, constituent ce qu'il est dorénavant largement convenu d'appeler une « société de l'information » ? Que, par conséquent et plus que toute autre chose, c'est le recours presque obligé à cette instance conceptuelle, l'« information », sorte d'*ultima ratio* post-industrielle publicisée et plébiscitée en permanence, qui paraît aujourd'hui le mieux autoriser la définition et l'expression d'un discours, de nos jours plus souvent issu de la sphère du profane que de celle du scientifique d'ailleurs, permettant de rendre compte des êtres, des structures et des dynamiques multiples et entremêlées fondamentalement constitutives de la trame et de la texture mêmes de l'espace dans lequel nous avons à vivre avec les autres. En somme, voici que l'« information », concept quantitatif originellement issu du champ de l'ingénierie électrique et au demeurant fort énigmatique, s'est vue progressivement promue depuis quelques décennies, et après avoir « traversé » en les transformant nombre de domaines scientifiques dissemblables sous les influences puissantes et conjuguées de la cybernétique, de la logique et de l'informatique, au rang de notion centrale, voire quasi universelle, dans l'espace conceptuel public contemporain. En vertu de ce pouvoir générique et unificateur inouï qu'on a pu effectivement lui supposer, elle

autoriserait ainsi une saisie satisfaisante de la presque totalité des dimensions d'un monde, le nôtre, lequel se donne pourtant fondamentalement à nous sous les catégories instables et parfois vertigineuses du fragmenté, de l'éclaté, du dédaléen ou du fractal. C'est bien d'une nouvelle manière de s'établir dans l'être et de penser à la fois l'entière et l'hétérogénéité du phénoménal dont il s'agit là. D'une nouvelle vision du monde qui toute entière se trouve soutenue et articulée par le concept d'«information» et comme matériellement fixée et mise en œuvre dans et par les automates chargés de traiter, de stocker ou de communiquer celle-ci. Bien évidemment, il nous faut immédiatement nuancer le caractère quelque peu affirmatif de ces quelques allégations: on connaît l'ampleur et la virulence des polémiques épistémologiques¹⁵⁰ que ne manqua pas de susciter l'importation, dans la décennie qui suivit sa publication, des concepts nodaux et/ou des différents théorèmes de la *Théorie mathématique de la communication*¹⁵¹ de Claude Edwood Shannon dans des disciplines aussi peu coutumières des recherches relatives à l'acheminement d'un signal codé et modulé de façon optimale que pouvaient l'être effectivement l'esthétique ou la psychologie. Le caractère pour le moins fluctuant, indéterminé, des délinéaments et du contenu définitionnels de la

¹⁵⁰ Précisons que nous n'aborderons pas ici les rapports fort complexes qu'ont pu entretenir, jusqu'à une certaine époque, les notions d'entropie boltzmanienne, c'est-à-dire d'entropie thermodynamique, et d'entropie au sens shannonien, c'est à dire d'entropie informationnelle (autrement nommée néguentropie ou «intropie»). La prise en considération de cet épisode scientifique, animé s'il en fut, déborderait largement le cadre de ce travail tout aussi sûrement, concédons-le par souci d'honnêteté intellectuelle, que nos très modestes compétences en matière de physique mathématique. Contentons-nous donc de dire qu'une liaison d'équivalence dépassant la «simple» isomorphie formelle fut postulée, notamment par L. Brillouin, entre l'entropie thermodynamique (S), donc l'énergie, et l'entropie informationnelle (H), c'est-à-dire l'information. A partir de cette identité non seulement formelle mais également terminologique, certains (entre autres Brillouin, Weaver, Stonier ou Jordan) furent amenés à prêter à la théorie de l'information une signification profonde dont d'autres (parmi lesquels Popper, Thom, Feyerabend, ou encore Mandelbrot) s'empressèrent de contester la validité. Ce sont les travaux de R. Landauer et de C. Bennett menés en informatique théorique, lesquels démontraient que l'effacement d'une mémoire d'ordinateur impliquait un coût thermodynamique et une irréversibilité physique tandis que d'autres opérations (copie) étaient énergétiquement «gratuites», qui mirent un terme à cette controverse. Concernant cette question, le lecteur intéressé, mais avisé, pourra consulter avec très grand profit [Parrochia 1994].

¹⁵¹ Concernant ce travail fondamental de Claude E. Shannon, qui est daté de 1948, il nous faut ici souligner deux éléments qui nous sont apparus essentiels : d'abord, et comme cela avait pu être le cas pour le « *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.* » de John von Neumann, il s'agissait initialement, et avant qu'il ne fasse lui aussi le tour du monde et ne soit dûment édité dans un ouvrage cosigné par Warren Weaver, d'un article d'ingénierie pure destiné à une publication technique interne au sein de la firme *Bell*. Ensuite, et nous rapportons là les propos d'Emmanuel Dion, « ... assez bizarrement, les deux termes « théorie de l'information » et « théorie de la communication » sont indifféremment employés pour désigner exactement la même chose, à savoir le travail fondateur de Shannon et ses nombreux développements. Shannon lui-même préférait « théorie de la communication » mais l'usage a consacré « théorie de l'information ». » In [Dion, E., 1997], p. 11, note 1. Ainsi donc, il s'avère que les expressions « théorie de la communication » et « théorie de l'information » sont usuellement confondues, cette dernière appellation ayant finalement supplanté la première. Pourtant, et quant on connaît l'intensité et la durée des controverses épistémologiques et scientifiques que souleva notamment «l'acclimatation» et l'emploi du concept d'«information» dans des disciplines souvent fort éloignées les unes des autres, on ne peut que s'interroger sur la convenance et la portée de ce curieux mouvement terminologique où l'on constate au final qu'une notion quantitative cruciale (celle d'«information»), spécifiquement définie pour les exigences d'une théorie du signal, s'est vue progressivement substituée, au cœur même de la dénomination originale de celle-ci, à la notion de «communication», laquelle spécifiait pourtant parfaitement le champ d'application exclusif de cette théorie.

notion furent ainsi pointés¹⁵² en même temps que la très grande spécificité du formalisme¹⁵³ dans lequel avait été exprimées les formules mathématiques fondamentales constituant l'axe princeps de cette théorie, afin de limiter ou même de remettre en cause l'applicabilité et l'efficacité réelle de cette dernière dans des domaines d'étude pour lesquels elle n'avait pas été originellement élaborée. En outre, ce qu'il est convenu de communément nommer la théorie de l'information, qui rappelons-le encore visait initialement et exclusivement à améliorer la performance de dispositifs techniques de transmission – elle était à ce titre uniquement un instrument d'ingénierie et C. E. Shannon n'a par ailleurs jamais ambitionné sérieusement qu'elle fut autre chose – faisait délibérément et de façon conjointe l'économie théorique de l'origine, de la finalité et de la signification intrinsèque du message transporté. La question ontologique du foyer original à partir duquel ce dernier était pour ainsi dire secrété et émis, celle du centre où il était en définitive recueilli, mais également, et par nécessaire voie de conséquence, celle portant sur son éventuelle valeur significative *pour quelqu'un* en amont et en aval de la procédure de transfert proprement dite s'étaient donc vues intentionnellement livrées et abandonnées, et ce dès le commencement, à la profondeur de l'impensé. Cette théorie de nature mathématique, dont l'une des caractéristiques principales, et non des moindres, consiste ainsi à évacuer sciemment et totalement sujets et signification semble donc d'office établir et légitimer une approche que nous qualifierons d'inconciliable, voire même de radicalement antinomique, avec le ou les objets d'étude des sciences humaines, s'attacherait-on même à ne les considérer que du seul point de vue de leur possible modélisation. Dans les faits, tout nous porte à penser finalement que la théorie de l'information a finalement été la victime d'un effet de « mode scientifique » plus ou moins passager qu'elle avait elle-même occasionné. Ses concepts étaient en effet séduisants par bien des aspects : non seulement ils autorisaient des « figures rhétoriques » qui pouvaient s'avérer du plus bel effet mais, en plus de cela, ces derniers pouvaient conférer à une discipline en manque de reconnaissance scientifique une espèce de cautionnement mathématique qu'elle ne pouvait bien entendu qu'appeler de tous ses vœux. Quant à ses opérateurs¹⁵⁴ et théorèmes primordiaux, bien que définis dans un cadre formel particulier et en vue d'applications très caractéristiques, ils étaient finalement d'une portée si générique et d'une puissance opérationnelle telle que ces dernières permettaient aisément leur détournement et leur

¹⁵² En 1965, lors du Colloque de Royaumont consacré à la théorie de l'information, A. Lwoff devait ainsi déclarer : « *Ce que j'ai entendu m'a beaucoup instruit, mais ce que je ne comprends pas, c'est le sens du mot "information"* ». In [Dion 1997], p. 38.

¹⁵³ Léo Apostel est cité à ce titre dans [D. Parrochia 1994], p. 46

¹⁵⁴ Notamment l'opérateur logarithmique.

utilisation, à d'autres fins, par des chercheurs issus de champs disciplinaires extérieurs. Quoiqu'il en ait été, et quels que puissent être les jugements que l'on sera aujourd'hui en mesure de porter rétrospectivement sur la pertinence et la légitimité qu'il y avait ou non à recourir ainsi aux notions et/ou aux formules de la théorie de Claude E. Shannon dans des domaines qui lui étaient pleinement étrangers, une chose mérite véritablement d'attirer ici notre attention : en dépit de la résistance opiniâtre que purent à l'époque opposer certains épistémologues et mathématiciens, et parmi les plus brillants, à la propagation incontrôlée de la théorie de l'information, celle-ci, ou ses avatars, s'est malgré tout répandue avec une vigueur étonnante à la fois dans la sphère scientifique et dans celle de la société civile. Si dans la première ce que nous conviendrons de nommer le « ressac théorique » ne s'est guère fait attendre longtemps, dans la seconde, il semble bien en aller tout autrement. Nous vivons désormais dans un monde où tout, ou presque tout, paraît être réductible, à un niveau ou un autre – et nous n'évoquons pas là seulement les figures du discours scientifique - à des explications formulées en termes d'«information». Nos sociétés sont presque absolument quadrillées, pour ne pas dire totalement irriguées, par de gigantesques treillis informationnels (*inter alia* les fameuses « autoroutes de l'information »), dont la réalité physique nous est à peine perceptible et qui véhiculent d'un continent à l'autre et de manière ininterrompue des kyrielles de flux électroniques ou optiques multiplexés porteurs de Gigabytes¹⁵⁵ de données devenues absolument essentielles à la simple stabilité de la plupart de leurs activités économiques. Nous nous trouvons en permanence, et de plus en plus, sollicités (harcelés ?), par toutes sortes de stimulations auditives ou visuelles qui charrient et imposent de façon très fréquemment répétitive des messages divers et variés dont l'intérêt véritable pour leurs destinataires, c'est-à-dire nous, est bien loin d'être toujours avéré (le message publicitaire en est un exemple flagrant). Bref l'«information» est partout, se faisant de plus en plus envahissante au fur et à mesure que les terminaux divers et variés destinés à son émission ou à sa réception deviennent financièrement accessibles (e-téléviseurs, téléphones cellulaires intégrant le protocole W.A.P¹⁵⁶, ordinateurs, webcams, etc.), tandis que, d'un autre côté, tout semble inexorablement voué à devoir être pensé comme étant de nature fondamentalement informationnelle. L'«information» serait alors ubiquitaire et tout, en raison dernière, lui serait simplifiable... Ainsi, et concernant cela, il convient bel et bien de parler aujourd'hui, mais ce n'est pas une nouveauté, d'un « paradigme informationnel du monde » ou, pour emprunter

¹⁵⁵ Un gigabyte équivaut à un milliard de bytes (ou octets), soit 8.10^9 bits.

¹⁵⁶ W.A.P.: *Wireless Application Protocol*.

une expression employée ailleurs par Daniel Parrochia¹⁵⁷, d'une nouvelle « version du réel », laquelle trouverait forcément son embasement, son centre de gravité, dans la notion même d'«information». La mise en place planétaire – relativement récente - des nouvelles réticularités techniques intercommunicantes (où il est permis de comprendre l'Internet, les réseaux téléphoniques cellulaires, la télévision satellitaire, le *Global Positioning System* et toutes les technologies que l'on range habituellement sous le sigle N.T.I.C.¹⁵⁸) et la diffusion massive dans le grand public de l'outil informatique qui en est absolument indissociable ont sans nul doute possible joué un rôle éminemment catalytique dans la survenue, l'installation, et l'acceptation progressive mais inéluctable de ce phénomène « exponentiellement » invasif par les hommes. Précisons cependant que la considération exclusive de l'ensemble formé de ces corridors informationnels, aussi nombreux, diversifiés, interconnectés et indispensables soient-ils, ne suffit toutefois pas à rendre compte entièrement de l'étonnante vitesse de propagation, de l'emprise et de la persistance de ce schème interprétatif général. La cybernétique et l'informatique des années cinquante et soixante, sans parler des nombreuses interprétations et autres appropriations extradisciplinaires¹⁵⁹ plus ou moins heureuses dont ont pu faire l'objet *The Mathematical Theory of Communication* de Claude Elwood Shannon ou les concepts fondamentaux qu'elle introduisait, avaient en effet préalablement préparé le terrain et les esprits « pour » que cette nouvelle conception du monde s'établisse aussi sûrement et fermement. Voici donc là considéré un phénomène sociétal confondant procédant foncièrement des ordres logico-mathématique et technique qui, de façon obvie, se manifeste avec une amplitude assurément considérable et que tout nous porte d'emblée à inscrire, eut égard précisément au constat inéluctable que cette magnitude exceptionnelle nous pousse à faire, dans un rapport de correspondance, si ce n'est d'équivalence, avec une autre révolution, industrielle cette fois, qui survint en Europe deux siècle plus tôt et qui s'appuyait elle sur la notion d'«énergie». Précisons que nous ne nous engagerons pas ici, malgré l'intérêt épistémologique décisif qu'une pareille démarche peut indubitablement receler, dans une analyse des rapports ou un examen des foyers de proximité et de dissemblance, à coup sûr

¹⁵⁷ In [Parrochia, 1994], p. 17.

¹⁵⁸ N.T.I.C. : Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication.

¹⁵⁹ Comme le rappelle D. Parrochia, « *Dans la décennie qui suivit sa formulation, la théorie de l'information suscita de nombreux espoirs en biologie et dans les sciences humaines... Des psychologues aux esthéticiens, des linguistes aux spécialistes du génome, tous virent dans cette théorie une manière d'unifier une réalité multiplement clivée par les champs disciplinaires.* » *Ibidem*, p. 45. Ces quelques exemples cités par M. Parrochia suffisent à prendre toute la mesure de l'impact qu'eut effectivement «la théorie de l'information» sur les tenants de disciplines dont l'objet d'étude, c'est le moins que l'on puisse dire, était bien éloigné de considérations spécifiquement liées au codage et à la transmission optimale d'un signal dans un canal de communication. La notion d'«information», sa très grande généricité et sa puissance unificatrice supposées furent à l'origine de cet engouement scientifique multidisciplinaire.

riches, multiples et composés, pouvant être effectivement mis en lumière dès lors que l'on s'attache à considérer les paradigmes énergétique et informationnel d'un point de vue comparatif et critique. Ceci nous conduirait en effet inmanquablement à déborder, et largement, les limites du cadre de ce travail. Nous consacrerons donc les sections suivantes à l'étude de la notion d'«information», laquelle constitue, comme nous l'avons précédemment dit, l'embasement conceptuel sur lequel repose de manière privilégiée la conception informationnelle du monde. Nous nous efforcerons tout d'abord de saisir les différents aspects que peut revêtir le concept d'«information» en procédant à l'examen détaillé de ses définitions les plus courantes et en en clarifiant, lorsque cela sera possible, économie interne, différences et similitudes. Nous étudierons ensuite, en l'illustrant, le fonctionnement du schéma communicationnel défini par Claude Edwood Shannon dans sa théorie de la communication. Ceci nous autorisera à déterminer de façon plus précise le sens mathématique, quantitatif, de la notion d'«information» telle qu'elle fut effectivement spécifiée et mise en œuvre par le célèbre ingénieur des laboratoires *Bell*. Enfin, et c'est là le sens de ce terme qui nous concernera évidemment le plus, nous tenterons de comprendre ce qu'il faut entendre spécifiquement par « information » dès lors que ce mot se voit employé dans le domaine de l'informatique.

1.2.2. Information – sens commun.

Vouloir examiner la notion d'«information» constitue en fait un exercice quelque peu délicat. On est ainsi conduits à osciller en permanence entre deux pôles disjoints mais réciproquement liés, étrangement interférents, dont le passage de l'un à l'autre, s'il existe, n'a au fond rien de véritablement évident. D'un côté, la nature et la définition du concept d'«information» tel qu'il fut déterminé par C. Shannon ne sont pas aussi aisément intelligibles que ce que l'on serait peut-être tentés de croire en première approche ; de l'autre, sa simple évocation au sens le plus trivial qui soit suffit nous à entraîner invariablement vers la mention quasi obligée de truismes consacrés tels que « société de l'information », « ère de l'information » ou encore « révolution de l'information ». Ce sont là, bien sûr, des expressions attendues maintes fois répétées et tout autant entendues dont la vacuité informative, et c'est bien là peut-être tout le paradoxe de la situation, n'a d'égale que la fréquence d'occurrence que nous nous permettrons de juger bien trop élevée. Si d'emblée elles échouent à nous enseigner quoi que ce soit qui puisse se révéler être d'une importance véritable concernant ce qu'est l'«information» en tant que telle, force nous est faite de

reconnaître tout au moins qu'elles possèdent indéniablement la qualité incidente de refléter avec une certaine netteté à la fois l'actualité et l'universalité, l'importance et le caractère incontournable que celle-ci peut bien avoir présentement dans nos sociétés. Le simple fait que de pareilles formules, à la limite de l'incantatoire tant elles sont vides de sens, existent et qu'elles soient répétées, voire psalmodiées, comme elles le sont couramment dans les *media* qui ne manquent pas d'en faire à la fois bon marché et leurs choux gras, suffit à attester de l'autorité actuelle de cette notion. Plus que comme de simples effets de surface désespérément creux, circulaires et rebattus, ceci nous incite donc plutôt à les considérer et à les appréhender comme les indices linguistiques certains, mais désormais banalisés, dépersonnalisés, d'une lame de fond formidablement transformatrice qui trouva son impulsion liminaire dans la cybernétique, l'informatique et la théorie de la communication des années quarante et cinquante et qui devait bouleverser la société humaine à un point tel qu'aujourd'hui elle n'en finit plus de se penser et de penser la presque totalité de l'ordre phénoménal sous les catégories désormais hégémoniques de l'«information» ou de l'«informationnel». Nous nous proposons donc d'étudier maintenant la notion d'«information» telle qu'elle peut être diversement rencontrée dans le cadre de ses acceptions les plus triviales, c'est-à-dire celles-là même auxquelles tout un chacun peut avoir fréquemment affaire dans l'espace social et dont on néglige peut-être la valeur véritable.

Que peut-on comprendre, communément ou intuitivement, lorsque l'on prononce ou lorsque l'on entend dire le mot « information » ? En langue française, ce terme admet au moins cinq sens différents.

1) On parlera d'«information» pour signifier l'action qui consiste à informer quelqu'un - l'information des lecteurs ou des téléspectateurs - ou le fait de s'informer sur quelque chose

2) Le terme désigne aussi la révélation que l'on peut obtenir de quelqu'un sur quelqu'un d'autre ou sur quelque chose. On pourra également, peut-être même de façon non intentionnelle, obtenir une « information » (cette fois au sens de « renseignement ») en écoutant une personne parler ou encore à l'occasion de la consultation d'un quelconque *medium* (en écoutant la radio, en regardant, justement, les « informations » à la télévision, en lisant la presse, en se connectant sur Internet, etc.). Remarquons que cette signification particulière du mot peut également impliquer, et ce sous certaines modalités spécifiques, l'irruption d'une violence inouïe dont le déroulement effectif peut être tout autant savamment

réglé que les résultats auxquels elle permet de parvenir peuvent être finalement régulateurs. Si dans la très grande majorité des cas l'information recherchée peut être facilement découverte ou sa « transmission » être librement consentie (par exemple dans le cas de la confession, que celle-ci soit d'ordre religieux, public, ou plus simplement amical), il est d'autres circonstances, quelquefois insoutenables, où celle-ci se trouve être littéralement extirpée ou arrachée de l'esprit de celui qui la possède. Le corps peut être alors méthodiquement mutilé (torture) et l'esprit tourmenté de façon indicible (torture psychologique et chantage) en vue de l'obtention d'une information jugée essentielle (dans un contexte belliqueux ou une situation politique instable par exemple) mais que son infortuné détenteur refuse obstinément de céder. Dans une pareille conjoncture, l'information, ici entendue en un sens que l'on conviendra de nommer « policier » à défaut d'un terme plus approprié, constitue indéniablement un opérateur de régulation sociale d'une importance considérable puisque sa possession, en même temps qu'elle confère à celui qui la détient un avantage certain sur son adversaire (qu'il soit politique, économique, militaire ou individuel), l'autorise non seulement à maintenir sa propre stabilité organisationnelle mais également à mettre en place des opérations de fragilisation souvent insidieuses destinées à miner – parfois au sens militaire du terme - celle de son antagoniste¹⁶⁰ moins bien renseigné.

3) Le troisième sens courant qu'il nous est permis de découvrir au mot « information » nous réinscrit dans le domaine de l'informatique ; l'information sera alors définie comme un « *élément de sens susceptible d'être codé pour être conservé, traité ou communiqué*¹⁶¹ ». Nous aurons bien sur l'occasion de revenir plus amplement sur cette acception particulière.

4) La quatrième signification qu'est susceptible de revêtir ce terme est celle que lui a prêté Claude E. Shannon dans sa théorie de l'information. Il faut alors la comprendre comme une mesure quantitative, donc objective, destinée à évaluer précisément l'incertitude d'un message donné en fonction de la probabilité de chaque signal le composant. L'information

¹⁶⁰ C'est, entre autres choses, le rôle de l'espionnage, autrement appelé, et c'est là un indicateur précieux, «renseignement». Remarquons également que ce type d'activités, qui relèvent le plus généralement des secteurs militaires, politiques ou industriels n'implique pas uniquement des procédures d'acquisition forcée de l'information. La propagation délibérée et ciblée d'informations faussées, incomplètes ou forgées de toutes pièces constitue également une arme de choix dans l'arsenal des espions. Observons par ailleurs qu'en anglais ou en américain, «renseignement» se dit *information* mais également *intelligence*, un terme que nous retrouvons dans des sigles tels que M.I.6 (*Military Intelligence 6*) ou C.I.A. (*Central Intelligence Agency*), lesquels servent à désigner les célèbres agences de services secrets britanniques et américaines. Nous retrouvons bien là le sens «policier» du terme «information».

¹⁶¹ Eveno B. et al., *Le Petit Larousse Grand Format 2000*, Paris, Larousse, 1999, p.546. On reconnaîtra là sans grande peine les trois divisions majeures («acquisition», «mémoire» et «exploitation») caractéristiques de la «science des données», si justement distinguées et analysées par François Dagognet dans [Dagognet 1979].

peut donc être ici comprise, mais nous reviendrons là dessus également, comme une fonction croissante de la réduction d'incertitude qu'elle apporte.

5) Enfin, et c'est là la dernière portée significative du terme « information » que nous serons en mesure de distinguer ici, utilisé dans le champ juridique cette fois il permet de désigner « *l'ensemble des actes d'instructions qui ont pour objet de faire la preuve d'une infraction et d'en connaître les auteurs.*¹⁶² ».

Une chose, immédiatement, nous apparaît manifeste dès lors que l'on considère, isolément ou comparativement, ces acceptions distinctes du mot « information ». Dans tous les cas de figure, hormis celui où il est spécifiquement question de l'information shannonienne (sens n°4), nous nous trouvons en mesure de repérer – de façon directe ou indirecte d'ailleurs - la mention de sujets actants, de subjectivités agissantes, tantôt « émettrices », tantôt « réceptrices », pour lesquels l'information concernée, quelle que puisse être par ailleurs sa nature ou sa définition particulière, fait sens de manière incontestable. Dans toutes ces définitions donc, hors celle que nous venons tout juste de discriminer, il n'est pas d'information sans sujet(s) pas plus qu'il n'en est sans signification pour un ou des sujets. Le cas de l'information au sens informatique du terme (définition n°3), ne fait pas exception à cela puisque celle-ci se trouve précisément comprise dans cette perspective comme un « *élément de sens susceptible d'être codé pour être conservé, traité ou communiqué* ». Or ces éléments de sens dont il est ici question, même s'ils se trouvent codés, retenus ou transportés par des automates digitaux électroniques, ne se trouvent pas inscrits pour ainsi dire gratuitement au cœur des machines et des immenses réseaux dont celles-ci sont désormais très souvent parties intégrantes. Ils ont été au contraire élaborés, recueillis, et codés par des programmeurs, des gestionnaires de banques de données, ou plus simplement, par de simples utilisateurs de systèmes, afin d'être, au final, disponibles et utilisables par d'autres individus. Ici, comme ailleurs, il est également question d'un type d'information qui fait sens pour des sujets. En plus de cela, nous pouvons aussi discerner, au cœur même de l'économie dynamique des différentes configurations ou dispositions intersubjectives qu'induisent ces définitions, la présence et l'opération de véritables « jeux de polarisation » de l'information (conçue ici comme étant significative), qui tour à tour portent de manière exclusive ou non sur l'un ou l'autre des acteurs humains participant de cette structure informationnelle et sont foncièrement articulés par les notions de « gain » ou d'« avantage ». Ces orientations du sens,

¹⁶² *Ibidem.*

ces translations de la signification qui font que celle-ci circule d'un acteur de la chaîne à l'autre, ou qu'elle est simultanément partagée par eux, s'avèrent en fait fondamentalement constitutives de ces définitions. Ce sont elles qui, précisément, font ou forment le sens des différentes significations du mot « information ». La première et la deuxième définition du terme « information » que nous avons signalées plus haut permettent de préciser cela. Dans ces deux cas, et bien que leurs déploiements respectifs diffèrent sensiblement par la suite, nous avons affaire à une combinaison triptyque qui peut être décomposée comme suit : nous trouvons tout d'abord un émetteur (E), le « donneur » ou la source d'information, qui peut indifféremment être un individu ou un groupe d'individus agissant pour leur compte ou encore pour celui d'une organisation quelconque, puis une information à transmettre (I), c'est-à-dire ici un message porteur d'une signification, et enfin un récepteur (R), qui est le « demandeur » ou la cible de l'information (comme précédemment, il peut s'agir d'un individu ou d'une assemblée d'individus). Le schéma tripartite convenant à la description générique des processus qui s'opèrent dans ces deux cas de figure particuliers est alors, tout du moins en première approche, le suivant : 1) $E(I) \rightarrow R$. 2) $E \rightarrow I \rightarrow R$. 3) $E \rightarrow R(I)$ (ou encore : 1) $E(I) \rightarrow R$. 2) $E(I) \rightarrow I \rightarrow R$. 3) $E(I) \rightarrow R(I)$ si I est dupliquée). Bien que relativement satisfaisant d'un point de vue global, non détaillé, il est cependant impuissant à en rendre précisément compte à un niveau plus fin. Dès lors que l'on examine plus avant ces deux situations où il y a effectivement circulation d'information(s), on se trouve en effet à même de repérer une rupture de l'équilibre et de l'orientation parfaitement déterminés que pouvait laisser entrevoir d'emblée ce diagramme. Cette dislocation d'une stabilité et d'une linéarité qui ne sont en fait qu'illusoire ouvre en réalité sur un véritable régime d'oscillation du centrage de la signification I sur E ou R, où les opérateurs de balancement et de contre-balancement de I sont la demande ou l'absence de demande d'information de R, le profit qu'il peut tirer de l'acquisition de cette information, ainsi que l'avantage qu'il peut y avoir ou non pour E à délivrer cette information. La première des significations du mot « information », où il s'agit d'informer quelqu'un ou de s'informer sur quelque chose, correspond, *inter alia*, à une situation de recherche d'information ou à l'information telle qu'elle peut être comprise au sens journalistique. Dans ce cas, de deux choses l'une : ou bien R est effectivement, pour une raison ou une autre, demandeur d'information, ou bien il ne l'est pas. S'il l'est, alors il est permis de considérer que la signification I de cette information est initialement focalisée ou centrée sur son détenteur, c'est-à-dire le donneur E, sans pour autant d'ailleurs que celui-ci en tire nécessairement un quelconque bénéfice. C'est R, le demandeur, qui effectue en fait volontairement la démarche consistant à aller collecter à la source l'information dont il a

besoin, cette action n'impliquant pas automatiquement pour lui un déplacement physique. R tire bien entendu un certain profit de l'obtention de cette information qu'il détient désormais au même titre que E (sinon pour quelle raison chercherait-il à l'acquérir ?). On peut alors considérer que la « prééminence informationnelle » dont pouvait jouir E avant que R ne possède I est, non pas supprimée, mais, en un certain sens, sinon affaiblie, du moins maintenue en l'état qui préexistait au transfert puisque I se trouve dorénavant décentrée, ou plutôt « multi centrée », en se voyant dupliquée et distribuée de la sorte entre E et R. C'est peut être là en fait cette situation particulière, et nous suivons ici peu ou prou les analyses de René Thom¹⁶³, où l'on observe une recherche motivée d'information et où le don de celle-ci est finalement consenti gracieusement par un tiers, qui nous permettra de saisir de façon adéquate le sens le plus pur, et en cela le plus légitime, du terme « information ». Dans le cas contraire, celui précisément où une telle demande et un tel avantage à posséder une information ne peuvent être clairement identifiés du côté du récepteur, c'est alors du côté de l'émetteur que le profit à divulguer une information détenue exclusivement doit être découvert. En dépit de l'absence d'une sollicitation explicitement formulée par un récepteur (individu ou groupe d'individus), l'émetteur propage ici – généralement de façon massive et « aveugle » - une information ou plusieurs informations ciblées (centrées) sur un ensemble de récepteurs potentiels. A partir du moment où une information n'a pas fait l'objet d'une recherche déterminée, c'est-à-dire dès lors qu'elle n'a pas été spécifiquement demandée par un agent récepteur, et qu'elle fait malgré tout l'objet d'une diffusion à grande échelle, elle est susceptible de se voir soupçonnée d'avoir été avant cela spécialement sélectionnée, transformée, voire même purement et simplement manipulée par l'émetteur en fonction de ses seuls intérêts (qui peuvent par exemple être d'ordre politique ou mercantile). Dans une pareille conjoncture, activité et avantage à posséder et surtout à distribuer l'information sont concurremment et unilatéralement centrées sur l'émetteur. Le récepteur peut ici être qualifié de totalement passif puisqu'il ne fait finalement que recevoir – à la manière d'une antenne - une information prescrite qu'il ne cherchait ni n'attendait et dont la possession effective ne signifie pas forcément pour lui l'obtention d'un avantage véritable. En ce sens le récepteur se trouve d'une certaine façon effacé de la chaîne de l'information. Il ne compte plus ou, s'il a toujours un rôle d'une quelconque importance à remplir au cœur de cette structure, il y apparaît de façon floue, indéterminée, indifférente, cette présence toute relative étant seulement commandée par le seul intérêt de l'émetteur. Notons incidemment que ce

¹⁶³ Cité in [Parrochia 1994], pp. 47, 48, 49,50.

phénomène est encore plus patent dans le cas du message publicitaire où l'information, totalement formatée et commandée en vue de répondre à des intérêts commerciaux particuliers, se trouve circulairement martelée à destination non plus de récepteurs individuels distincts, mais de profils de récepteurs statistiquement évalués afin de déclencher chez les individus constituant ces classes certains comportements consuméristes. On peut alors s'interroger sur la nature véritable de tels messages. Pis, on peut même se demander s'ils sont réellement susceptibles de pouvoir encore être définis comme étant des informations. Tout nous porte à croire que, s'ils le sont toujours, c'est d'une façon dévoyée, faussée, pervertie. D'une manière générale, et là encore nous emprunterons à R. Thom quelques-unes de ses conclusions, il nous apparaît qu'à partir du moment où l'on ne se trouve pas en mesure d'identifier clairement et conjointement dans une situation donnée un demandeur d'information (donc une demande et un récepteur), un diffuseur d'information (émetteur) supposé transmettre celle-ci de bon gré, ainsi qu'un certain avantage pour le demandeur à posséder cette information, tout usage de ce terme, fut-il ordinaire, doit être considéré comme étant suspect, à moins peut-être, comme c'est le cas dans la théorie de la communication, qu'il ne fasse l'objet d'une définition spécifique en vue d'être utilisé dans un domaine restreint. Remarquons aussi que le fait qu'il y ait fréquemment suppression d'un des pôles de la chaîne informationnelle n'implique pas forcément qu'il s'agisse toujours de celle du récepteur. Dans le cas de la torture (évoqué dans le cadre de la définition n°2), c'est le détenteur de l'information, celui sur lequel elle est initialement et exclusivement centrée, autrement dit l'émetteur, qui finalement se voit biffé, supprimé, parfois même au sens propre, dans et par le processus d'acquisition de l'information. Ici, encore une fois, l'utilisation de ce terme nous paraît être totalement illégitime: bien qu'un émetteur (la victime) et un récepteur-demandeur (le bourreau) puissent être effectivement distingués dans ces circonstances particulières et que l'avantage à obtenir une information puisse incontestablement être situé du côté de ce dernier, la transmission de celle-ci est en fait très loin d'être librement consentie (le fait, pour un émetteur, de transmettre une information de bon gré à un récepteur qui en fait la demande, rappelons-le, constitue une des conditions *sine qua non* déterminant le bon usage de ce terme). S'il est évidemment de l'intérêt du récepteur d'obtenir une information, et le plus rapidement possible encore, le seul avantage que possède ici la victime consiste justement à ne pas donner celle-ci. Dans ces conditions pour le moins extrêmes, nous doutons sincèrement qu'un renseignement extorqué de manière brutale puisse être appelé, autrement que par abus de sens, une information.

L'examen de quelques-unes des significations courantes du mot « information » nous a permis de mettre en lumière certains éléments ou constantes remarquables. En premier lieu, nous avons été en mesure de déterminer que, sur les cinq définitions effectivement citées, seule celle relative à l'acception shannonienne du terme « information » n'impliquait – en tout cas de façon directe - ni sens, ni subjectivité(s) pour ou par laquelle ce sens aurait été donné. Dans tous les autres cas, sans exception, le concept d'information est « sémantisé ». L'étude détaillée que nous avons ensuite menée en nous appuyant premièrement sur une situation particulière, celle qui consiste précisément à s'informer, nous a finalement conduits à repérer et à dégager une structure ou combinaison quadripartite – celle impliquant un récepteur, une demande d'information formulée par ce récepteur, un gain que confère à ce récepteur l'acquisition d'une information, et un émetteur ou donneur qui, librement, consent à délivrer celle-ci au demandeur – dont nous croyons, à la suite de R. Thom, qu'elle correspond au sens véritable du terme « information ». En conséquence, nous avons finalement avancé que toutes les significations et les emplois du mot « information » qui pourraient être rencontrés par ailleurs et qui ne répondraient pas exactement aux contraintes et à l'économie constitutives de cette matrice originale devraient être considérées avec une certaine circonspection puisqu'il y aurait tout lieu de suspecter là ni plus ni moins qu'un abus de sens. Dans tous les cas, cette figure « quaternaire » nous a enseigné une chose précieuse: que l'on comprenne le terme « information » en son sens véritable, avéré, ou qu'on le considère au contraire lorsqu'il est employé d'une manière que nous qualifierons de dénaturée, toute la dynamique informationnelle observable qui détermine au final le sens que ce terme est susceptible de revêtir semble partir et aboutir, en un mot se jouer, dans le ou les rapports qu'entretiennent l'une à l'autre les extrémités, les pôles du système, mais également dans ceux qu'ils peuvent bien avoir à la composante sémantique de l'information demandée ou donnée. En d'autres termes l'économie de cette « mécanique » informationnelle est fondamentalement fonction des places relatives occupées par l'émetteur et par le récepteur, tout autant qu'elle dépend essentiellement de la nature de leur(s) connexion(s) relationnelles et de leurs motivations propres. C'est dire finalement si le mitan, l'espace intermédiaire, l'entre-deux où l'information se déploie et circule du donneur au demandeur, n'ont quasiment pas droit de cité dans la très grande majorité des situations que nous avons évoquées ici et demeurent comme tels complètement indéterminés. Or le milieu, le canal de diffusion de l'information – et ses perturbations – forment très précisément, et par un renversement de perspective un peu étonnant, l'objet d'étude de la théorie de la communication, laquelle, nous l'avons déjà dit et allons le voir encore incessamment, ne s'embarrasse en fait ni des « subjectivités polaires »

dont nous venons de discourir, ni de leurs rapports, et encore moins de la signification éventuelle de l'information qui peut bien être transmise.

1.2.3. La théorie de la communication et l' « information » au sens shannonien.

Dans un petit ouvrage consacré il y a quelques années à la théorie de l'information, Emmanuel Dion écrivait :

« ... le principal effort de la théorie de l'information consiste surtout à étudier avec précision la capacité de transport [d'un] canal ... et, à cette fin, elle utilise une définition quantifiée de la notion d'information. ¹⁶⁴». Il ajoutait en outre à la suite de ceci que *« dans la théorie de Shannon, c'est d'une façon purement mathématisée qu'une information désigne, par définition, un ou plusieurs évènements parmi un ensemble fini d'évènements possibles. Toutes les mesures informationnelles qui sont calculées ensuite sont issues des probabilités qui caractérisent cet ensemble d'évènements. ¹⁶⁵ ».*

Ceci nous amène à formuler quelques observations préliminaires. Tout d'abord, il est patent que la théorie de l'information centre principalement son faisceau d'analyses mathématiques sur l'étude, en vue d'optimisation, des caractéristiques techniques d'un milieu (le canal) où un signal codé, de type analogique ou numérique, est émis par une source (l'émetteur) à destination d'une cible (le récepteur) sachant que ce signal est fortement susceptible de se voir perturbé pour diverses raisons dans les phases de codage, de décodage, et encore dans celle du transport (où il peut être bruité). Dans cette perspective singulière l'information est pensée de manière exclusivement quantitative. Autrement dit, elle est ici appréhendée comme totalement « dé-sémantisée » ou, plutôt, elle est conçue comme étant « asémantique », proprement dépourvue de signification. Sa seule et unique fonction consiste alors à permettre la production de mesures spécifiques. Si dans ce cadre théorique elle a encore effectivement quelque chose à voir avec un message pouvant être signifiant, l'information ne concerne désormais plus le sens ou la signification de ce message (événement), mais bel et bien la mesure de sa probabilité d'apparition au sein d'un groupe ou d'une classe constitués d'évènements du même type. La formule mathématique $H = - \sum_i p_i \log_2 p_i$ définit ainsi « la quantité d'information associée à un événement comme inversement

¹⁶⁴ In [Dion 1997], pp. 53-54.

¹⁶⁵ *Ibidem*, p.54.

*proportionnelle à la probabilité de cet événement.*¹⁶⁶ ». Ceci signifie donc, par exemple, que si dans un ensemble fini d'évènements parfaitement équiprobables l'un ou l'autre de ces évènements se produit, il ne sera que très faiblement porteur d'information puisqu'il avait, en vertu même de cette équiprobabilité, autant de chances de se produire que n'importe lequel des autres évènements. En revanche, si cet événement est hautement improbable, et qu'il survient, l'information qu'il « contiendra » sera alors bien plus importante. En fait, on l'aura compris, l'information correspond ici à une mesure de réduction d'incertitude portant sur le comportement des éléments d'un groupe d'évènements donné. Le surgissement d'un événement très incertain réduira par conséquent cette dernière de façon appréciable tandis que celui d'un événement peu surprenant (au sens de très probable) ne la réduira que plus modérément. Contrairement aux situations précédentes, où il s'agissait d'analyser la notion d'« information » en s'arrêtant à l'examen de ses acceptions les plus ordinaires, il nous est apparu qu'il demeure relativement peu aisé de rendre compte ou de faire saisir *ex abrupto* celle-ci telle qu'elle a pu être mathématiquement déterminée dans le cadre de la théorie de Shannon. Dans cette optique particulière, elle se trouve en effet étroitement prise dans un treillis notionnel duquel elle n'est que très difficilement dissociable. Dans un premier temps nous nous efforcerons en conséquence de l'appréhender

1.2.4. Etude du fonctionnement du paradigme communicationnel shannonien.

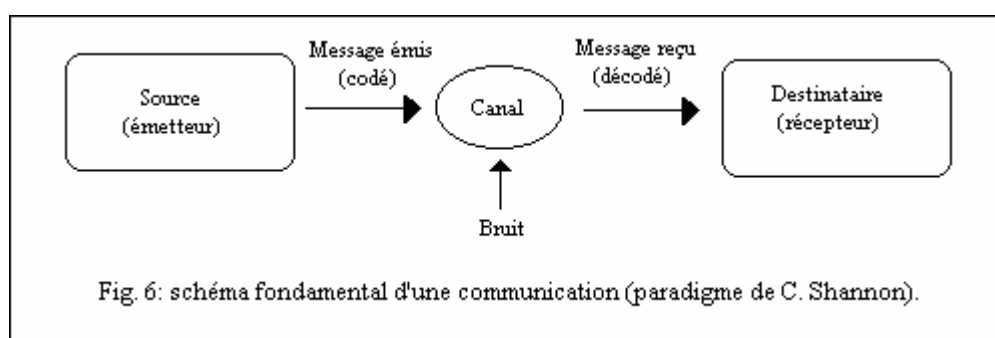
Au cours de la septième conférence Macy, C. E. Shannon avait également défini l'information inhérente à un processus comme :

«...ce qui reste invariant sous tous les encodages ou traductions inversibles qui peuvent être appliqués aux messages par le processus. En d'autres termes, on définit

¹⁶⁶ In [Parrochia 1994], p. 26. En fait, comme le rappelle E.Dion, l'idée de quantité d'information, dont la formule est $I = -\log p$, (p désignant ici la probabilité d'apparition de l'évènement informatif), est plutôt statique. Elle permet de mesurer une situation finalisée, parachevée, où l'évènement en question est effectivement advenu. Le formule mentionnée ci-dessus ($H = -\sum_i p_i \log p_i$, où p_i désigne la probabilité de la classe i) correspond à celle de l'entropie informationnelle, qui, elle, permet d'apprécier le potentiel informationnel d'une situation avant qu'un évènement n'y survienne. Dès lors que l'on se trouve en mesure d'estimer à la fois ce potentiel informationnel et la situation finalisée, il est possible d'étudier l'intégralité de la chaîne communicationnelle et d'effectuer des évaluations et des comparaisons de performance entre diverses sortes de récepteurs, de canaux et d'émetteurs.

l'information comme la classe d'équivalence de toutes les traductions inversibles obtenues à partir d'un processus inversible donné¹⁶⁷».

Les notions qui doivent ici impérativement attirer notre attention sont celles de « traduction » (ou d'« encodage »), d'« inversibilité » et d'« invariance » puisque ce sont celles-là même que convoque en premier lieu l'auteur de la théorie mathématique de la communication afin de former une détermination précise du concept qui en constitue fondamentalement l'axe maître, à savoir bien entendu l'information. La séquence ou chaîne communicationnelle théorisée par Shannon est bien connue. Rappelons cependant qu'elle est composée: 1) d'un opérateur (nommé « source » ou « émetteur » et dont la nature demeure indéterminée) placé en amont de la séquence susdite et qui va sélectionner, coder (ou encoder) puis envoyer un message. 2) d'un code autorisant une transformation (réversible) de ce message sous forme de signal transmissible par un dispositif de communication donné. 3) d'un message spécifique (possiblement, mais ce n'est pas exclusif, une séquence symbolique significative initialement exprimée dans l'alphabet d'une langue naturelle) devant être sélectionné, codé et transmis par l'émetteur, puis reçu et décodé par le récepteur. 4) d'un canal de transmission quelconque (de type hertzien, téléphonique, optique,...) destiné à l'acheminement de ce message codé. 5) d'un opérateur terminal (nommé « destinataire » ou « récepteur » et lui aussi indéterminé) qui va recevoir, décoder, puis finalement « retrouver » la forme première, et éventuellement le sens, du message original.



Clairement, ce que Shannon entend par « traduction » ou « encodage » (les deux termes sont ici pensés comme étant équivalents), correspond précisément aux opérations de codage et de décodage (soit le processus d'inversion de l'encodage) effectuées successivement par les deux correspondants situés aux extrémités de la chaîne communicationnelle. Il s'agit d'abord d'altérer totalement, sans cependant modifier ou perdre

¹⁶⁷ Cité par P. Lévy dans [Lévy 1987], pp. 115-116.

l'«information» dont elle est porteuse, la forme première d'une suite symbolique donnée (qui peut être signifiante) afin d'en autoriser la transmission via un moyen de communication quelconque. Le processus de codage est précisément cette opération de traduction biunivoque (donc « inversible ») qui permet normalement de passer, sans introduire de distorsion, d'une structure symbolique S éventuellement signifiante à une autre structure symbolique exactement correspondante du point de vue informationnel, S' , laquelle ne saurait pourtant être isomorphe à S puisqu'elle se trouve précisément définie dans un second ensemble de signes, généralement restreint¹⁶⁸ et distinct du premier, le code, optimisé pour être utilisé sur un *medium* de transmission particulier. Pour le dire autrement, si l'«encodage» (ou « traduction ») modifie effectivement la forme du message originel afin d'en autoriser finalement le transfert, il n'en bouleverse ou n'en détruit pas l'essence informationnelle. Coder ou encoder une séquence ou un message signifiants revient donc à trans-former ces derniers en vue de manipulation¹⁶⁹ : on donc passe généralement d'une structure directement intelligible à un agencement purement formel qui ne l'est plus, mais que son expression épurée, logique, rend maîtrisable et donc transmissible. L'opération inverse, le décodage, permet de restituer (après réception du message), la forme originale de celui-ci à partir de la combinaison formelle obtenue lors de la phase de codage. Codage et décodage, nous le verrons, sont deux concepts absolument fondamentaux en informatique. Quant à l'«information» contenue dans le message elle est précisément cela, qui, malgré les transformations et les procédures d'encodage et de décodage qui lui sont successivement appliquées, demeure invariablement. La forme du message, l'ensemble ou les ensembles de symboles dans lesquels il se trouve tour à tour exprimé, varie considérablement avec le temps, c'est là un fait aisément constatable, mais son contenu informationnel demeure malgré tout ceci inchangé : il est absolument le même à l'*input*, durant l'intervalle temporel variable que peut durer le transfert le long du canal de transmission (à condition que celui-ci ne soit pas exagérément bruité), et à l'*output*. Autrement dit, et comme l'écrit Pierre Lévy, « *l'information est donc ce qui est laissé invariant par une série d'opérations réversibles*¹⁷⁰ ».

¹⁶⁸ Le code Morse, à l'instar du code binaire («1» et «0»), ne comporte ainsi que deux signes fondamentaux : le point (sonorités brèves) et le trait (sonorités longues).

¹⁶⁹ Dans le cas de la théorie de l'information, ce codage a pour finalité essentielle de permettre le transfert optimal du message. C'est en ce sens que nous entendons ici le terme «manipulation». En informatique, le spectre des manipulations autorisées est plus large : il peut s'agir de coder une information (image, son, texte) en vue de simplement la stocker ou de la transférer (d'une machine à une autre), mais également d'effectuer dessus des opérations de transformation (comme ce peut être le cas en infographie, en musique assistée par ordinateur, ou avec un traitement de texte). L'usage veut également que le programmeur soit appelé «codeur» tandis que le terme consacré pour désigner un programme est «code».

¹⁷⁰ [Lévy 1987], p. 116.

Elle constitue ce qui dans le message et ses différents avatars codés persiste, de manière inaltérable et imperceptible, en deçà ou au delà des effets discernables, des symboles et des formes, induits par les différentes procédures d'encodage, de décodage ou de transformation qu'il est susceptible de subir à l'alternat. Il est possible de comprendre à partir de là que la communication telle qu'elle avait été pensée originalement par C. Shannon dans le cadre de sa théorie, ne constituait ni plus ni moins qu'une figure particulière du calcul: une série d'opérations (code) destinées à permettre la transmission d'un message, réduit à une pure forme logique, par l'entremise d'un canal de communication quelconque étant donnée, il suffit, une fois ledit message reçu, d'en transposer le sens d'apparition et de fonctionnement pour parvenir à retrouver les données initiales du message. Cette théorie constituait donc fondamentalement un schème opérationnel et calculatoire. Son approche était intrinsèquement objective tandis que ses seuls et uniques objets étaient fondamentalement constitués par la quantification ou la mesure de l'«information» ainsi que par l'étude (simulation, prévision, optimisation, correction d'erreur), de la capacité de transmission d'un signal sur un canal de communication particulier. C'est dire finalement qu'elle se faisait, à dessein, complètement oublieuse de la question du sujet (en reléguant ce dernier au statut idéal de « pur » émetteur ou de « pur » récepteur ou destinataire), et de celles de la compréhension et de la finalité du message qui devait être transféré (donc inventé ou sélectionné puis exprimé par quelqu'un en vue de produire un certain effet dans un certain contexte) et reçu (c'est-à-dire interprété par quelqu'un afin d'être compris et de voir cet effet finalement réalisé dans un environnement précis). Dans ce cadre théorique déterminé et strictement centré sur la question du transfert optimisé (via des procédures de codage et de décodage opérées sur la base d'un corpus fini de symboles monosémiques) du message à transmettre, l'homme (et du coup la finalité du message, sa signification même) pouvait être appréhendé comme un composant superfétatoire et, comme tel, pouvait se voir neutralisé, voire même à la limite remplacé, peut-être avec un certain bénéfice, par des systèmes terminaux automatisés. Pour le dire autrement, le célèbre triptyque « émetteur → canal → récepteur » correspondant au paradigme communicationnel shannonien pouvait se voir totalement « déshumanisé » et pour ainsi dire vidé de toute signification et, cependant, continuer à opérer parfaitement¹⁷¹, c'est-à-dire demeurer un instrument d'analyse et d'optimisation tout à fait efficace.

¹⁷¹ Et pourtant, comme l'écrit Raymond Ruyer, in [Ruyer 1954], p.116, « *il est absurde de supposer qu'il n'existe dans le monde que de purs transmetteurs* ». Nous ajouterons à cela qu'il est tout aussi absurde d'imaginer qu'il n'y existe que de purs récepteurs. Le message devant être transmis (et par là sa finalité et sa signification propres) n'est en effet ni créé, ni sélectionné *ex nihilo*. Remarquons également que l'information,

1.2.5. L'information quantifiée: mesure de la réduction d'incertitude.

Nous avons précédemment vu que, dans le cadre de la théorie mathématique de la communication, autrement et d'ailleurs plus fréquemment nommée « théorie de l'information », l'information, donc, était définie de façon quantitative. Dire cela, en même temps d'ailleurs que multiplier en les exhibant successivement les définitions, les explications ou les formules énigmatiques établissant de manière plus ou moins lapidaire sa nature mathématique ne permet en rien de mieux comprendre ce qu'elle peut bien être dans cette optique particulière. Le recours à quelques exemples typiques nous permettra, nous l'espérons, de clarifier et de circonscrire le sens et la portée de cette notion.

Soit alors l'exemple¹⁷² suivant : un bibliothécaire doit retrouver, dans une vaste bibliothèque, un ouvrage spécifique. L'ensemble des livres contenus dans la bibliothèque représente alors dans ce cas de figure l'ensemble des événements possibles, lesquels sont *a priori* équiprobables (si $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ représentent les éléments (livres-événements) de la classe P (bibliothèque ou ensemble des événements possibles), alors le fait qu'ils soient équiprobables signifie que les chances d'obtenir (trouver) indifféremment P_1, P_2, \dots, P_n sont égales). Malheureusement pour notre bibliothécaire, non seulement cette bibliothèque ne dispose d'aucun système de classement des livres mais en plus de cela ceux-ci ont été, au fur et à mesure de leur acquisition, disposés en vrac sur les étagères. D'abord, il ne dispose donc d'aucun moyen méthodique efficace et immédiatement disponible pour retrouver rapidement le livre qui lui a été demandé. Il se trouve néanmoins en possession des informations suivantes : le titre de l'ouvrage est « Alice au pays des merveilles », et sa couverture est verte (le livre représente l'événement défini par l'information détenue). Dans ces circonstances particulières, et contrairement à ce que l'on serait peut être tentés de penser intuitivement, le fait de connaître exactement l'intitulé du livre recherché n'est en fait guère utile. S'il n'y avait eu seulement que quelques œuvres à vérifier, cette information aurait effectivement pu être intéressante. En examinant le titre de chacun des ouvrages rangés sur les étagères il serait nécessairement et assez tôt parvenu à identifier celui qui l'intéressait (même si ce dernier doit être, par un mauvais tour du hasard, le dernier élément de l'ensemble examiné). Ceci ne vaut

comprise ici comme une mesure de la réduction d'incertitude que fournit l'apparition d'un événement au sein d'un environnement donné, ne fait sens précisément que parce qu'il existe quelqu'un, en l'occurrence un observateur, pour qui il y a effectivement réduction d'incertitude. En conséquence, l'absence de prise en compte théorique des composantes subjectives de la chaîne communicationnel shannonienne nous paraît relever d'une démarche logique pour le moins abusive.

¹⁷² Cet exemple, ainsi d'ailleurs que les principales lignes d'analyse qu'il permet de mettre en œuvre, sont en grande partie tirés de [Dion 1997], pp. 54-55.

évidemment plus si la bibliothèque comprend un nombre d'ouvrage important (disons par exemple 1000), le temps moyen consacré à la recherche d'un élément déterminé croissant d'autant plus que ce nombre est élevé. En revanche, le fait de savoir que la couverture du livre est verte peut être décisif. Bien sûr dans le cas - très improbable cependant - où la très grande majorité, voire la totalité des ouvrages de la bibliothèque, posséderait une couverture verte, cette information ne servirait quasiment à rien et notre infortuné bibliothécaire se verrait condamné à examiner un à un chacun d'entre eux pour enfin trouver celui qu'il cherche (le temps de recherche pourra alors être très court si ce livre se situe en tête du groupe examiné et très long s'il se trouve en queue). Par contre si les couvertures de ces ouvrages sont globalement multicolores, cette information possède une grande valeur. Si, sur mille ouvrages disponibles, il n'en existe qu'une trentaine dont la couverture est verte, le temps de recherche est considérablement réduit et l'information est extrêmement utile. S'il n'en existe que deux, elle l'est bien sûr encore plus. C'est alors que le fait de connaître le titre du livre devient véritablement profitable. Ce qu'il convient de retenir ici, au delà du cas particulier examiné, c'est qu'une information (définissant un ou des événements possibles dans un ensemble d'événements possibles) peut ou non posséder une certaine valeur pour celui qui la détient. Cette valeur représente la réduction d'incertitude qu'apporte cette information concernant un ensemble d'événements possibles donné. En fait, l'information au sens mathématique « *est une fonction croissante de la réduction d'incertitude qu'elle apporte.*¹⁷³ ». Si L , le nombre total d'ouvrages que comporte la bibliothèque, vaut 1000, et que l , le nombre d'ouvrages à couverture verte, vaut 500, (un livre sur deux possède une couverture verte), alors l'incertitude est réduite de moitié ($L/l = 1000/500 = 2$). Dans ce cas on dira que l'unité d'information vaut 1 bit puisque le bit (également appelé « Hartley », « logon » ou « Shannon »), représente une réduction de la moitié de l'incertitude sur un problème donné ($\log_2 2 = 1$). Si l vaut 100, alors l'incertitude est réduite de 9 dixièmes. Le fait de savoir que « l'ouvrage recherché est recouvert en vert » est donc plus utile lorsque qu'un ouvrage sur dix possède une telle couverture que lorsque c'est le cas pour un ouvrage sur deux. Il ressort par conséquent de cela que plus le résultat de L/l est grand, plus la réduction de l'incertitude apportée par l'information détenue est importante : il y a moins d'événements possibles après l'information que ce qu'il y en avait avant. Afin de définir mathématiquement l'information I , et en lieu et place de faire simplement équivaloir I au quotient L/l ($I = L / l$), Shannon a défini

¹⁷³ In [Dion 1997], p. 55.

cette égalité comme suit : $I = \log_2 (L / I)$ ¹⁷⁴. En définissant l'exemple que nous venons de brièvement examiner, nous avons pris le soin de préciser que tous les événements qui y étaient effectivement possibles étaient équiprobables. *A priori*, la probabilité ou la chance qu'un quelconque livre p « sorte » était donc ici équivalente à celle de n'importe quel autre. Dans la réalité, la possibilité qu'une telle configuration stéréotypique survienne est très faible, les probabilités permettant de caractériser une quelconque situation S étant très souvent distribuées de façon fort inégale sur les éléments ou sur les sous-classes d'éléments de S. Dans de pareils cas de figure, c'est la formule - $\sum_i p_i \log_2 p_i$ qui permet de calculer la quantité d'information déterminant une situation. Afin d'illustrer cela, supposons maintenant l'exemple suivant¹⁷⁵ : nous disposons, sans plus de précisions, d'une urne opaque dont on sait seulement qu'elle contient 500 boules (situation de départ). Imaginons maintenant que nous souhaitions être à même de d'identifier absolument, c'est-à-dire sans risque de nous tromper, une boule et une seule parmi le demi-millier que compte ce réceptacle. Pour classer ou discriminer précisément cette boule, et compte tenu du fait que jusqu'ici le seul renseignement dont nous disposions est leur nombre exact, nous devons posséder une information I telle que I ait pour valeur ($\log_2 500$) bits. C'est alors que l'on apprend que ces boules sont de deux sortes : elles sont soit rouges, soit bleues. En outre, et simultanément, nous sommes avertis du fait que le nombre des boules bleues est de 100 tandis que celui des boules rouges est de 400. Connaissant cela, nous pouvons en conclure que pour discriminer une boule rouge parmi les 100 existantes, il faudra alors disposer d'une information égale à ($\log_2 100$) bits. De la même manière, pour distinguer une boule bleue, il nous faudra détenir une information dont la valeur devra être égale à ($\log_2 400$) bits. Les boules rouges représentant un cinquième de la totalité des boules contenues dans l'urne et les bleues en représentant nécessairement les quatre cinquièmes restants, si nous plongeons la main dans ce récipient, nous avons donc 100 chances sur 500 (1/5) d'en retirer une boule rouge et 400 sur

¹⁷⁴ Le choix de l'opérateur logarithmique et celui de la base deux s'expliquent comme suit : grâce au logarithme, il est possible de transformer un produit (multiplication) en une somme (addition). Dès lors que l'on dispose, dans un problème donné, de deux informations indépendantes (la réalisation de l'un n'influence pas celle de l'autre), respectivement de valeur informative I_1 et I_2 (déjà évaluées), la quantité d'information I qu'apportent ensemble ces deux informations vaut, en vertu précisément de la présence de cet opérateur, I_1+I_2 . En ce qui concerne la base deux, Shannon avait posé par convention que lorsque la réduction d'incertitude dans un problème serait exactement divisée par 2 par l'apport d'une information, autrement dit lorsque l'on aurait affaire à une situation dichotomique, celle-ci serait égale à 1 ($I = 1$). Or, en vertu de la formule $\log_a a = 1$, le logarithme en base deux est le seul cas où l'on obtienne effectivement ce résultat puisque $\log_2 2 = 1$. Dans l'hypothèse où une information n'apporterait strictement aucune réduction d'incertitude, c'est-à-dire dans le cas où par exemple $L / I = 1$, on aurait donc $\log_2 1 = 0$ (puisque par définition $\log_a 1 = 0$). Le cas limite inférieur (absence totale de réduction d'information) et le cas unitaire (incertitude divisée par deux) sont donc ici parfaitement définis.

¹⁷⁵ Cet exemple a été en grande partie repris à partir d'une illustration figurant dans [Serres, Farouki et al., 1997], article « Entropie », pp. 326-327.

500 (4/5) d'en extraire une bleue. Compte tenu des probabilités portant sur ces deux sous-classes distinctes d'éléments, la quantité d'information dont il nous faut maintenant disposer pour discriminer une boule quelconque dans cet ensemble partitionné considéré dans sa totalité pourra être évaluée comme suit par application de la formule $-\sum_i p_i \log_2 p_i : (P_r \times \log_2 N_r) + (P_b \times \log_2 N_b)$, où P_r et P_b désignent respectivement les probabilités qu'une boule rouge ou une boule bleue soient tirées au hasard et N_r et N_b désignent respectivement les nombres de boules rouges et de boules bleues. Dans le cas qui nous intéresse ici on a donc $I = ((1/5 \times \log_2 100) + (4/5 \times \log_2 400))$ bits. La question se pose alors de savoir quelle est la valeur du gain informationnel que nous a permis d'obtenir la détention de l'information selon laquelle les boules peuvent être de deux couleurs, par rapport à la situation précédente où la seule information disponible était le nombre total de boules. La valeur de cette information initiale était, nous l'avons vu, égale à $(P_t \times \log_2 N_t)$ bits, où P_t désigne les probabilités qu'une boule quelconque soit tirée au hasard et N_t le nombre total de boules. Ceci revient à écrire $(5/5 \times \log_2 500)$ bits ou, en simplifiant, $(\log_2 500)$ bits. Le gain apporté par la seconde information sera donc égal à $I_1 - I_2$ bits, (I_1 étant égal à la valeur informationnelle du renseignement « le nombre total de boules contenues dans l'urne est de 500 » et I_2 à celle de « il existe des boules rouges et bleues, 100 boules sont rouges, toutes les autres sont bleues »). Au final, on aura donc : $I_1 - I_2 = (P_t \times \log_2 N_t) - [(P_r \times \log_2 N_r) + (P_b \times \log_2 N_b)]$, soit $(5/5 \times \log_2 500) - [(1/5 \times \log_2 100) + (4/5 \times \log_2 400)]$.

Le calcul permettant de mesurer le gain d'information qu'apporte I_1 par rapport à I_2 est le suivant :

On pose (quantité d'information de I_1) – (quantité d'information de I_2), soit :

$$\begin{aligned} & (5/5 \times (\log_2 500)) - [(1/5 \times (\log_2 100)) + (4/5 \times (\log_2 400))] = \\ & [(1/5 \times (\log_2 500)) + (4/5 \times (\log_2 500))] - [(1/5 \times (\log_2 100)) + (4/5 \times (\log_2 400))] = \\ & 1/5 [(\log_2 (500)) - (\log_2 (100))] + 4/5 [(\log_2 (500)) - (\log_2 (400))] = \\ & -1/5 [(\log_2 (100)) - (\log_2 (500))] - 4/5 [(\log_2 (400)) - (\log_2 (500))] \end{aligned}$$

Sachant que $(\log_n a - \log_n b) = \log_n (a / b)$, on a alors :

$$- 1/5 [\log_2 (100/500)] - 4/5 [\log_2 (400/500)] =$$

$$- [(1/5 \times \log_2 (100/500)) + (4/5 \times \log_2 (400/500))] =$$

$$- [1/5 \times \log_2 (1/5) + (4/5 \times (\log_2 (4/5))].$$

Ainsi, connaissant I_1 et I_2 , on peut estimer que la valeur du gain ou de la quantité d'information apportée par la connaissance de I_2 par rapport à la seule connaissance de I_1 est égale à $- [1/5 \times \log_2 (1/5) + (4/5 \times (\log_2 (4/5))]$ bits.

On aura donc pu comprendre, ou tout au moins intuitivement saisir, au travers de cet exemple, quelle était la nature du concept d'«information» tel qu'il a été défini par Claude Shannon dans sa théorie. C'est là de façon absolument évidente une information qui est pensée sans liaisons aucunes à la sphère de la signification. Elle donc n'a rien de commun, tout au moins de façon immédiate, avec ce que l'on entend couramment par le terme « information », c'est-à-dire un renseignement ou un message émis par quelqu'un ou véhiculé par l'entremise d'un *medium* quelconque qui nous apprend quelque chose de significatif (donc qui est porteur d'une « charge » sémantique), sur quelque chose ou quelqu'un. L'information shannonienne sert au contraire à quantifier, sur un ensemble composé d'un certain nombre d'événement possibles, le gain informationnel qu'apporte le surgissement d'un événement qu'elle définit. Oscillant étrangement entre probabilité et imprévisibilité, en deçà ou au-delà des formes que, justement, elle in-forme et qui en quelque sorte la cristallisent, elle représente ainsi une mesure de la réduction d'incertitude qu'elle apporte et ne fait précisément sens, pour un observateur, qu'en une guise purement mathématique, qu'en tant qu'elle est, par essence, quantification. Peut-être est-ce Gilbert Simondon qui, dans son magnifique ouvrage intitulé *Du mode d'existence des objets techniques*, a su le mieux capter et exprimer ce qu'était l'information. Il écrit ainsi :

« L'information est ainsi à mi-chemin entre le hasard pur et la régularité absolue. On peut dire que la forme, conçue comme régularité absolue, tant spatiale que temporelle, n'est pas une information mais une condition d'information ; elle est ce qui accueille l'information, l'a priori qui reçoit l'information. La forme a une fonction de sélectivité. Mais l'information n'est pas de la forme, ni un ensemble de formes, elle est la variabilité des formes, l'apport d'une variation par rapport à une forme...¹⁷⁶ ».

¹⁷⁶ In [Simondon 1989], p. 137. Egalement cité par Jean-Pierre Dupuy dans [Dupuy 1999], p.130.

L'informatique est bien évidemment extrêmement redevable à la théorie mathématique de la communication formulée maintenant il y a plus d'une cinquantaine d'années par Claude E. Shannon. Tout d'abord, elle a repris à son compte, en en élargissant la signification et en la popularisant, la notion de *bit*. En informatique, le bit représente « *l'unité d'information élémentaire* ¹⁷⁷ ». Le langage machine, qui est parfois confondu avec l'assembleur¹⁷⁸, fait exclusivement appel à l'arithmétique binaire pour manipuler des objets (numériques ou symboliques), représentés en machine par des ensembles constitués de 8 bits appelés octets ou *bytes*. En fonction de leurs capacités, de la manière dont ils ont été spécifiquement conçus, les ordinateurs représentent ainsi l'information sous forme d'ensemble d'octets (généralement des « paquets » de bytes correspondant à 2^3 , 2^4 , 2^5 , ou, maintenant, 2^6 bits). Ensuite, toutes les unités (C.P.U., mémoire principale, mémoires secondaires, périphériques), que comporte normalement un ordinateur échangent en permanence de l'information les unes avec les autres (sous formes de signaux électriques de faible voltage représentant des données, des adresses, des commandes ou des tops de synchronisation), via des bus (concernant les chemins de données de l'unité centrale, qui permettent l'échange de données entre registres généraux, registre d'entrée, registre de sortie et unité arithmétique et logique, on parle normalement de *data path*). On se retrouve donc là, comme c'est du reste également le cas avec les réseaux informatiques, face des problèmes d'optimisation de transmission de signaux par l'entremise de canaux à capacité variable et limitée, dont la résolution échoit à la théorie de la communication. Celle-ci trouve donc bien sa place au cœur même de l'univers informatique, même si le sens (symbolique) qu'y revêt désormais couramment le terme « information » diffère considérablement, nous allons le voir maintenant, de celui, purement mathématique, qui avait été originellement assigné à ce mot par Claude Shannon.

¹⁷⁷ In [Tanenbaum, 2001], p. 54.

¹⁷⁸ L'assembleur est un langage de très bas niveau (c'est-à-dire très proche du langage machine qu'est l'arithmétique binaire), dont les instructions, peu nombreuses et appelées mnémoniques, utilisent des valeurs codées en hexadécimal. Ces instructions peuvent être très rapidement exécutées par la machine puisqu'elles sont immédiatement traduites en binaire.

1.2.6. De la représentation de l'information en machine.

Les ordinateurs peuvent être définis de manière générale comme étant « *des machines à calculer numériques, à conduite entièrement automatique, permettant d'effectuer des opérations arithmétiques ou algébriques (calculs divers, recherche des solutions d'un système d'équations, etc.) et de traiter des informations non mathématiques*¹⁷⁹ ». Nous nous intéresserons plus tard à ce que peut effectivement signifier cette dimension à la fois numérique et automatique qui permet de caractériser ainsi les ordinateurs digitaux. Pour l'heure, ce sont le ou les types d'informations, le genre de données, pouvant être traités par ces dispositifs, et tout ce que cela peut impliquer par ailleurs, qui doivent faire l'objet de notre attention immédiate. D'après les quelques éléments qui se trouvent effectivement spécifiés dans cette définition synthétique, il est tout d'abord permis de comprendre que l'ordinateur peut d'emblée être appréhendé comme un instrument qui permet de réaliser (automatiquement) certaines manipulations sur des êtres – des informations – de nature mathématique. Autrement dit, les ordinateurs sont des machines à calculer, des systèmes mécaniques extrêmement élaborés, destinés avant tout à accomplir des calculs. Ainsi le terme « calcul » devra, tout du moins dans un premier temps, être entendu en son acception courante. Par conséquent, nous restreindrons pour l'instant la portée de ce mot à son sens purement mathématique. Par calcul, on entendra donc un ensemble d'opérations arithmétiques parfaitement réglées au moyen d'un certain nombre de règles combinatoires très exactement déterminées, qui, lorsqu'elles sont méthodiquement mises en oeuvre, c'est-à-dire lorsqu'elles sont appliquées avec rigueur à des êtres mathématiques (des nombres par exemple), permettent d'obtenir un résultat, à savoir un être mathématique, qui lui aussi se trouve précisément déterminé. A partir du moment où ces règles sont entièrement définies et qu'ainsi elles peuvent être, elles et les entités mathématiques dont elles gouvernent la combinatoire, adéquatement représentées par certains dispositifs physiques, des bascules électromécaniques ou des éléments transistorisés par exemple, il devient alors possible de mécaniser et d'automatiser complètement les procédures de calcul. Or, fondamentalement, c'est très précisément sur ce principe, cette correspondance essentielle, qu'est basée toute l'économie interne de l'ordinateur. En cela donc, il n'est rien de plus qu'une machine toute entière tendue vers la résolution de problèmes mathématiques et dont le degré de perfection, la puissance

¹⁷⁹ Raoul Mortier et Al., *Dictionnaire Encyclopédique Quillet*, Librairie Aristide Quillet, Paris, 1934, Vol. N~PQ, p.4779.

opérateur, la rapidité, ont été conduits jusqu'à un point extrême. Pourtant, aujourd'hui, rares sont les utilisateurs de cette machine – et ils se comptent littéralement par centaines de millions - qui l'emploient exclusivement pour effectuer des travaux de nature mathématique. De nos jours, la formidable puissance de l'ordinateur sera ainsi plus fréquemment et plus volontiers mobilisée pour l'accomplissement de tâches telles que le traitement de texte, la conception graphique, la composition musicale, ou bien encore le divertissement culturel ou ludique. On concèdera aisément qu'avec l'apparition et la multiplication d'applications de ce type, on s'est progressivement éloignés de la vocation première de l'ordinateur qui, foncièrement, était et demeure toujours l'effectuation de calculs. En effet, ici, il ne s'agit plus seulement de calculer le résultat d'expressions ou d'ensembles de formules mathématiques, autrement dit il ne s'agit plus exclusivement de résoudre des problèmes arithmétiques, mais il est plutôt question de traiter des informations qui, justement, ne participent pas (en tout cas directement), de l'ordre mathématique. Cet enrichissement remarquable des compétences fonctionnelles de la machine informatique, ce débordement de ses capacités de traitement déjà prodigieuses vers des objets participant des sphères graphique, textuelle, musicale, ou ludique impliquent inévitablement que nous procédions, tout du moins en ce qui la concerne, à une redéfinition circonstanciée de la notion de calcul. Par calcul, désormais, on n'entendra plus exclusivement les seules opérations propres au domaine arithmétique, comme peuvent l'être par exemple la soustraction ou la division, mais également des opérations telles que la composition, la déformation, la copie, le tri, la permutation, la coupure, l'insertion, le classement, le collage, la tabulation, la traduction, la codification ou encore la transcodification. Peut-être s'étonnera-t-on ici du fait que l'on se permette d'élargir à ce point l'influence ou la portée de cette notion à des opérations qui, il est vrai, ne paraissent pas immédiatement posséder grand chose de commun avec ce que l'on entend habituellement par le terme « calcul ». Normalement, chacun s'accordera à admettre qu'il calcule, qu'il réalise un calcul, lorsqu'il effectue une opération d'addition ou de multiplication, fut-elle extrêmement élémentaire. Mais qu'en est-il exactement lorsque ce qui doit être accompli n'est plus une opération au sens que nous prêtons usuellement à ce terme mais une procédure d'un autre genre ? Un classement par exemple. Avons-nous véritablement l'impression de réaliser un calcul lorsque nous ordonnons une liste selon l'ordre alphabétique ? Sommes-nous vraiment tentés d'affirmer que nous calculons quand, dans un groupe de mots, nous nous employons à y faire figurer ceux qui débutent par la lettre E avant ceux qui commencent par la lettre F ? Si, toujours dans un ensemble constitué de vocables, nous cherchons à distinguer ceux qui ne possèdent que deux syllabes de tous les autres, est-ce là un calcul que nous faisons ? Certes

nous serons contraints et forcés, à un moment donné, de procéder au comptage du nombre de syllabes qui composent chacun de ces termes afin de les classer convenablement mais, dans l'ensemble, oserons-nous prétendre qu'une action comme celle-ci puisse être véritablement définie comme un calcul ? Et encore : quand nous effectuons un agrandissement (de format 30 x 30 ou 30 x 45 par exemple), à partir d'une photographie de moindres dimensions, peut-on dire que nous calculons ? Qu'en est-il lorsque nous rédigeons un courrier ou un manuscrit ? Quand nous achevons la rédaction d'un paragraphe et qu'ensuite nous allons à la ligne ? Quand nous débutons une phrase par une lettre majuscule et que nous en poursuivons l'écriture avec des minuscules ? Quand nous donnons tout son rythme à la parole écrite en usant des signes de ponctuation ? Nous pourrions ainsi multiplier *ad nauseum* des exemples de ce type et il y a fort à parier qu'à chaque fois, si nous nous hasardons à poser la question « est-ce là un calcul ? », la réponse qui nous sera donnée, assurément, sera toujours non. Pourtant c'est là précisément le genre de tâches que les logiciels communément installés sur les mémoires auxiliaires de nos ordinateurs, de nos *calculateurs* digitaux à mémoire interne, nous permettent de réaliser au quotidien. Ceci ne manquera sûrement pas de nous surprendre dans la mesure où semble s'installer ici un écart réel, une différence profonde, voire une opposition marquée, entre la manière dont nous nous représentons pour ainsi dire intuitivement la nature de ces tâches relativement triviales - elles ne participent nullement de l'ordre du calcul - et le fait qu'elles puissent effectivement faire l'objet d'un traitement machinal, autrement dit qu'elles puissent toutes être ramenées à un calcul, à une expression algorithmique, bref, par un jeu de traduction, à un programme informatique. Se pose alors la question de savoir comment nous pouvons rendre compte de la possibilité de cette réductibilité. Comment, pour exprimer ceci autrement, nous est-il permis d'expliquer que des processus somme toute ordinaires dont nous peinons tout à fait à découvrir ou à reconnaître la dimension arithmétique, puissent pourtant faire l'objet d'une formulation qui leur permettent d'être effectués par une machine avec une rapidité et une précision que jamais nous ne serons en mesure d'atteindre par nos propres moyens ? Afin d'apporter quelques éléments de réponse à cette interrogation, certaines choses doivent tout d'abord être éclaircies. Pour commencer, il est nécessaire pour nous de bien prendre conscience du fait que lorsque nous effectuons une tâche comme un classement ou un triage par exemple, nous agissons, ainsi que le remarque justement Pierre Lévy, « de façon directe et globale¹⁸⁰ ». Autrement dit, et normalement, lorsque nous nous livrons à une activité de ce genre, nous l'appréhendons et la menons

¹⁸⁰ [Lévy, 1992], pp. 72-73.

jusqu'à son terme comme une totalité, une globalité, et ne la saisissons jamais d'une façon qui serait analytique. Ces processus, le cas échéant et en fonction de leur nature, pourront bien entendu impliquer, à un moment donné ou un autre, que les objets sur lesquels ils portent soient effectivement saisis de façon analytique (ce peut être effectivement le cas lorsque l'on est amené à compter le nombre de syllabes des mots composant une liste), mais eux-mêmes ne le seront pas, ou alors ils ne le seront que rarement. La plupart du temps, en effet, on ne cherchera jamais à les détailler, à les décomposer et l'on se contentera plutôt de les effectuer d'un trait, sans introduire de rupture, sans les réfléchir, jusqu'à ce que l'on parvienne enfin au résultat escompté. Or toutes ces procédures, quelles qu'elles puissent être par ailleurs du point de vue individuel, sont fondamentalement, à un degré ou à un autre, des opérations composées. Si l'on souhaite par exemple procéder au classement alphabétique d'une liste faite de termes alphanumériques, il est nécessaire que l'on effectue successivement et de manière ordonnée un certain nombre d'actions relativement simples et qui dépendent étroitement les unes des autres : on repérera tout d'abord la lettre par laquelle chacune de ces séquences débute puis on effectuera un premier classement. Une fois celui-ci effectivement réalisé, on passera ensuite à la deuxième lettre, puis à la troisième, et ainsi de suite jusqu'à ce que la totalité de la série soit ordonnée selon le critère de distribution initialement spécifié. Si d'aventure il s'avère que la liste devant être ordonnée est particulièrement longue, on commencera par la diviser en plusieurs sous-groupes de termes à peu près égaux que l'on classera ensuite selon la méthode indiquée ci-dessus. Une fois tous ces classements partiels accomplis, il suffira, pour enfin voir la totalité de la liste convenablement ordonnée, de recomposer progressivement l'ensemble préalablement fragmenté en s'appuyant précisément sur les organisations intermédiaires qui ont été définies pour chacun de ces sous-ensembles. Quel que puisse être le cas de figure effectivement envisagé, c'est de toute façon l'ensemble de ces étapes élémentaires qui constitue proprement la tâche de classement. Et c'est justement cette collection d'actions à la fois simples et distinctes que nous effectuons de manière séquentielle qu'habituellement nous percevons comme un tout, une unité. Quelquefois même, avec l'habitude - et ceci contribue considérablement à renforcer la perception holistique que nous avons de ce genre d'activités - nous bouleversons l'ordre dans lequel ces actions élémentaires dont elles sont composées doivent normalement être effectuées puisqu'il nous arrive sans même y songer d'en accomplir plusieurs concurremment. Comment, à partir de là, pourrions-nous effectivement les comprendre comme une espèce de calcul ? Comment pourrions-nous imaginer qu'elles puissent se voir réduites à des formules mathématiques susceptibles ensuite d'être exprimées de façon programmatique ? C'est en fait

L'impression quasi systématique de globalité que suscite en nous l'effectuation ordinaire de ce type d'activité qui nous conduit ici à nous méprendre. Nous avons évoqué ceci plus haut, des tâches telles qu'un classement ou un triage peuvent être décomposées en sous-tâches beaucoup plus simples. Celles-ci, à leur tour, pourront éventuellement faire l'objet d'un processus de dissociation qui conduira au final à l'identification et à la définition d'un certain nombre d'actions beaucoup plus élémentaires. Cette procédure de réduction pourra être ainsi poursuivie jusqu'à ce que l'on parvienne enfin à un ensemble d'opérations qui ne peuvent être simplifiées davantage. A partir de ce point on peut aisément comprendre que c'est la répétition ordonnée et méthodique de ces actions très simples – que nous ne percevons que rarement en tant que telles - sur les objets sur lesquels on souhaite opérer qui nous permet de réaliser des tâches en apparence aussi complexes que le tri ou le classement. Or c'est là très exactement la manière dont fonctionnent les ordinateurs. Les multiples circuits électroniques dont ils sont composés ne permettent en fait de réaliser que des opérations logiques et arithmétiques extrêmement élémentaires. Ce sont la combinaison et l'itération de ces dernières qui, foncièrement, autorisent la machine à effectuer des tâches, des calculs par exemple, très compliquées. Alors certes, tant qu'il est question de traiter des objets mathématiques, d'effectuer des calculs, il ne nous sera guère difficile d'accepter cela. Après tout les ordinateurs sont des calculateurs et le calcul d'une expression mathématique complexe peut être méthodiquement réduit à celui de ses composants, étant entendu par ailleurs que celle-ci peut initialement être traduite en base binaire. Mais qu'en est-il exactement lorsque ces objets ne participent plus de l'ordre mathématique ? Qu'advient-il quand ce sont des lettres, des mots, des phrases, des images ou des séquences sonores que nous manipulons grâce à la machine ? Comment, finalement, une machine qui fut originellement conçue pour opérer sur des quantités peut-elle ainsi traiter des objets participant de l'ordre qualitatif ? Deux choses, qui sont intimement liées, doivent impérativement être prises en compte si l'on prétend apporter une réponse à ces questions. Elles touchent à la manière dont les informations sont représentées en machine et à la façon dont des objets tels que les lettres ou les caractères spéciaux, mais également les images ou le son, peuvent être effectivement codés afin que soit rendu possible leur traitement informatique. Quand nous rédigeons une lettre au moyen d'un logiciel de traitement de texte ou quand nous modifions une image afin d'en améliorer le contraste ou la luminosité, l'ordinateur n'a pas accès à des mots ou à des paragraphes. Il n'opère pas davantage sur des teintes, des contrastes ou des formes. Tout ce à quoi il peut jamais avoir accès se réduit en fait à des suites de données numériques binaires sur lequel il se trouve en mesure d'effectuer des

opérations arithmétiques ou logiques fort élémentaires. En dehors de cela, il est absolument incapable de traiter quoi que ce soit d'autre. Pour comprendre comment tout ceci est possible, il est nécessaire que nous nous livrions maintenant à l'étude détaillée de la façon dont les données – qu'elles soient ou non numériques au départ - sont représentées en machine.

L'ordinateur est un réceptacle machinal multi niveaux aux strates et aux imbrications nombreuses, où viennent converger pour être traités, transformés et/ou stockés toutes sortes d'objets hétérogènes. Sa complexe structure matérielle et sa prodigieuse rapidité se trouvent offertes aux longues suites d'instructions conjuguées composant usuellement les programmes informatiques, ainsi qu'aux structures de données sur lesquelles ces dernières viendront, le moment venu, effectuer les opérations logico-mathématiques spécifiques auxquelles elles correspondent. Ce sont alors le nombre, l'image, fixe ou animée, le texte, ou bien encore le son qui sont appelés à investir les différentes unités interconnectées et très précisément synchronisées qui composent l'artéfact informatique. L'économie interne de ce dernier s'appuyant intégralement et exclusivement sur une électromécanique ou une électronique à deux états, c'est-à-dire finalement sur des combinaisons de bits de longueur variable dont chacun des éléments constitutifs ne peut jamais prendre qu'une seule valeur parmi deux effectivement permises, le recours à un appareillage complet de conversion analogique → numérique s'avère absolument indispensable pour autoriser ces phénomènes, qui tous sont de nature continue, à être représentés en machine sous la seule et unique forme qu'elle tolère, c'est-à-dire l'expression digitale. Au chapitre prochain – que nous consacrerons à l'histoire des calculateurs et des ordinateurs – nous reviendrons de façon bien plus détaillée sur les différences essentielles qui permettent de faire le départ entre les formes numérique et analogique puisque certaines machines à calculer, telles les analyseurs différentiels construits par Vannevar Bush dans les années 30, étaient des systèmes entièrement analogiques. Pour l'heure, contentons-nous ici de rappeler qu'un signal est dit analogique s'il transcrit de façon continue, ininterrompue, et par l'intermédiaire d'une relation de proportionnalité, le message dont il constitue le support. Dans le domaine acoustique par exemple, les enregistrements analogiques possèdent cette propriété spécifique de conserver le son sous sa forme originale, c'est-à-dire celle d'un signal modulé. De tels enregistrements convertissent ainsi les ondes acoustiques en signaux obéissant précisément à la même loi de variation que ces ondes sonores. Il existe bien entendu nombre de supports (mécaniques ou magnétiques), permettant de réaliser un stockage analogique des données mais il en est néanmoins certains, tels les disques en vinyle ou les bandes de magnétophones qui nous sont – nous ne dirons pas nous furent - particulièrement familiers. De manière générale, les ordinateurs sont incapables de

manipuler directement ce type d'objets. Pour leur permettre de traiter un signal sonore, vidéographique, ou bien encore une image, il est nécessaire de recourir au processus de numérisation (on parlera encore ici de digitalisation). La numérisation consiste en la mise en œuvre d'une chaîne dite de conversion analogique/digitale, laquelle comprend différentes étapes et opérations effectuées à l'alternat et a pour fin la transformation, par encodage numérique, d'un objet réel en une chaîne (plus ou moins longue selon le type dudit objet) de chiffres exprimés en base 2. Nous nous contenterons ici de décrire le processus de numérisation dans ses grandes lignes. Dans tous les cas, c'est-à-dire quelle que soit la nature de l'objet auquel on envisage de faire subir cette opération, il s'agit tout d'abord de procéder à une *acquisition* d'informations par l'entremise de capteurs adaptés. Dans le cas d'une image, on emploiera des capteurs optiques, ceux d'un scanner par exemple. Le mécanisme d'un tel dispositif comprend de très nombreuses cellules photoélectriques capables de transformer l'énergie lumineuse renvoyée par chaque zone élémentaire composant cette image en un signal électrique d'intensité correspondante. Sur la base des données recueillies lors de cette procédure d'acquisition, c'est-à-dire sur la base du signal analogique dont nous venons de parler, on procèdera alors aux opérations d'*échantillonnage* et de *quantification*.

L'échantillonnage est une action qui consiste à réaliser des mesures périodiques sur le signal analogique recueilli grâce aux capteurs de l'appareil employé durant la phase d'acquisition. On effectue ces mesures à intervalles réguliers, afin de capturer une série de valeurs représentatives de la structure du signal traité. La fréquence d'échantillonnage joue donc un rôle excessivement important ici puisque c'est elle qui décidera au final de la précision et de la qualité de la numérisation du signal analogique. A ce titre elle doit être soigneusement déterminée. Une fréquence d'échantillonnage particulièrement faible engendrera un nombre trop peu élevé de points de capture pour qu'il soit possible de former à partir de ces derniers une représentation numérique à même de restituer fidèlement le signal analogique présenté en entrée du système. Les événements informationnels occurring entre deux prises d'échantillons sont en effet purement et simplement ignorés. Aussi si la durée de temps séparant la réalisation des prélèvements est trop importante, les valeurs saisies sur le signal seront en nombre insuffisant pour en rendre la structure et donc, en permettre la numérisation d'une façon qui soit satisfaisante (et utile). Dans ce cas et pour simplifier, on dira qu'il ne sera possible d'obtenir qu'une image digitale pauvre à partir d'un signal analogique (éventuellement) riche. A l'inverse si la fréquence d'échantillonnage est haute – autrement dit si les points de capture sont nombreux - on se trouvera bel et bien en mesure de composer une représentation digitale remarquablement fidèle du signal analogique de départ.

En contrepartie toutefois, il sera nécessaire de disposer d'une importante puissance de calcul (puisque le nombre d'opérations effectuées sur le signal source puis les points de capture sera très élevé), et d'un espace de stockage conséquent (puisque le nombre d'informations devant être enregistrées temporairement et définitivement sera lui aussi plus important). A moins de posséder un ordinateur puissant, le temps nécessaire au traitement de toutes ces informations se verra lui aussi majoré. Dans la pratique et pour obtenir un codage judicieux c'est au théorème de Nyquist-Shannon - lequel stipule que la fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être égale ou supérieure à 2 fois la fréquence maximale contenue dans ce signal – que l'on se réfère pour fixer la valeur correspondant à la périodicité de réalisation des captures. Cela permet de conserver au mieux les éléments pertinents du signal, tout en ignorant le bruit.

Une deuxième opération capitale ici est la quantification. Pour la résumer, cette dernière consiste à affecter une valeur numérique finie à chaque échantillon capturé sur le signal analogique source. La qualité de la numérisation dépendra ici du nombre de bits spécifiquement réservés à la quantification des échantillons. A la différence d'un signal numérique qui est type discret (fini), un signal analogique est de nature continue. Représentable au moyen d'une courbe, son amplitude varie dans le temps. A tout instant donc, une mesure réalisée sur un signal continu correspondra à une grandeur physique, c'est-à-dire à un nombre *réel*. Or la puissance de traitement et surtout la mémoire des ordinateurs ne sont pas des ressources disponibles infiniment. Comme lors de la procédure d'échantillonnage, il s'agira alors ici de choisir un nombre de bits parfaitement adapté à la représentation de ces grandeurs physiques. Si l'on choisit de quantifier les échantillons sur 4 bits par exemple, la troncature des grandeurs physiques caractéristiques du signal analogique source sera insuffisamment précise et la représentation digitale de ce dernier ne pourra être en conséquence que de piètre qualité. Dans ce cas précis cependant le temps nécessaire au traitement du signal numérique ainsi que l'espace mémoire requis pour son enregistrement seront faibles. Pour obtenir une numérisation de qualité, on augmentera le nombre de bits alloué à la quantification des échantillons de sorte à accroître la précision des approximations des valeurs réelles devant être représentées en machine. On pourra alors coder le signal sur 16, 32, 64, 128, voire 256 bits sachant : 1°) que la qualité de la numérisation variera en fonction du nombre de bits utilisés pour la quantification du signal et 2°) que les coûts informatiques relatifs au temps de traitement du signal et à son enregistrement seront également fonction de la grandeur de ce nombre. Selon les circonstances il sera par conséquent nécessaire de trouver un compromis adéquat entre ces différentes variables pour obtenir une numérisation de

qualité, sans que cela nuise pour autant aux performances du système informatique utilisé pour la réaliser. Une fois le signal analogique numérisé – c'est-à-dire une fois les échantillons le représentant réduits à une série plus ou moins développée de valeurs binaires – l'ordinateur se trouvera en mesure de le traiter. Tandis que par le biais d'un logiciel approprié, l'utilisateur modifiera le contraste d'une photographie ou bien qu'il appliquera un filtre déformant¹⁸¹ à une image ou à une séquence musicale, la machine, elle, manipulera les suites de « 1 » et de « 0 » correspondant à la représentation numérique de l'objet traité ainsi qu'aux opérations informatiques qu'on aura choisi de lui fait subir.

En ce qui concerne le codage des caractères alphanumériques et le traitement informatique du texte et des nombres, la procédure employée est moins lourde. Depuis le début des années soixante, l'industrie informatique s'est en effet dotée de normes spécifiques afin de fixer des jeux de caractères multilingues reconnaissables par une majorité d'ordinateurs. Des tables établissant une correspondance entre : 1°) les caractères alphabétiques, les signes de ponctuation et les chiffres les plus couramment employés et 2°) des séquences binaires codées sur 8 bits ou plus, ont été définies dans le but de représenter lettres et nombres. Dans un premier temps, cet effort émanera essentiellement des constructeurs d'ordinateurs. Le standard E.B.C.D.I. (pour *Extended Binary Coded Decimal Interchange Code*) sera ainsi le fait d'I.B.M. tandis que la norme *Radix-50* sera développée par la *Digital Equipment Corporation*. Les normes propriétaires peinant à s'établir – et pour cause elles étaient par trop dépendantes des spécificités des machines des fabricants les ayant élaborées - l'industrie s'est peu à peu dotée de normes réellement capables d'assurer l'interopérabilité des plateformes. Les codes A.S.C.I.I. (pour *American Standard Code for Information Interchange*) et ceux des normes I.S.O. 8859, I.S.O. 10646 et *Unicode* (toutes des versions étendues de l'A.S.C.I.I.), sont sans aucun doute les plus employés à ce jour. Ici encore, l'ordinateur ne manipule ni chiffres ni lettres mais des séquences de valeurs binaires correspondant à des objets faisant sens pour l'utilisateur. En machine une chaîne alphanumérique telle que « I.B.M. » sera ainsi représentée au moyen des valeurs suivantes: « 1001001 0101110 1000010 0101110 1001101 0101110 ». Toutes les opérations possiblement réalisables sur un pareil objet, comme la permutation des lettres, la transformation des caractères majuscules en caractères minuscules, ou bien encore le passage, pour chaque lettre, au caractère qui le suit immédiatement dans l'alphabet, seront accomplies par l'ordinateur en manipulant et en transformant ces séquences de chiffres binaires.

¹⁸¹Par exemple un algorithme de traitement conçu pour provoquer un effet visuel ou sonore spécifique.

Reproduire cette suite alphanumérique – « I.B.M. » - reviendra par exemple à générer une copie conforme de la suite binaire la représentant (grâce à l'opération copier/coller par exemple). Et il en ira exactement de même avec une image, une pièce musicale, un film, etc.

Qu'il soit ou non nécessaire de procéder au préalable à leur acquisition, *tous* les objets sur lesquels un ordinateur est susceptible de travailler se réduisent fondamentalement à des séries binaires. A leur tour ces séries bivalentes sont prises en charge par les complexes entrelacs d'éléments transistorisés micrométriques qui, au cœur de l'ordinateur, autorisent leur conservation ou instancient les lois et les opérateurs de la logique et des mathématiques. Nous allons à présent voir de quelle façon ces lois sont justement matérialisées en machine et comment on les met en œuvre pour traiter des objets informatiques tels que ceux dont il vient d'être question.

1.3. Logique binaire, circuits d'ordinateurs et machine universelle de Turing.

1.3.1 Quelques éléments d'histoire concernant l'arithmétique binaire : du Yi-King de l'Empereur chinois Fohy à l'arithmétique binaire de G.W. Leibniz.

Francis Bacon (1561-1626), philosophe et chancelier d'Angleterre sous Jacques I^{er}, avait déjà en son époque, et ce afin d'assurer une certaine confidentialité aux messages diplomatiques devant être transporté d'un territoire à un autre par porteur, inventé un code binaire, le premier qui ait jamais été produit et connu en occident. Ce code, en fait un chiffre par substitution¹⁸², consistait à se saisir séparément de chacun des symboles alphanumériques composant un message donné et à les remplacer, respectivement, par une séquence également alphanumérique qui était sélectionnée dans un répertoire ne comprenant que des quintuplés d'un très type particulier. En l'occurrence il pouvait s'agir soit d'une suite de «A», soit d'une suite de «B», soit alors de compositions mêlées construites à partir de ces deux seules lettres (ainsi à la lettre «A» aurait pu correspondre la séquence «AAAAA», à «B», la série «AAAAB», ..., et ainsi de suite jusqu'à la lettre «Z»). Il serait bien entendu exagéré de prétendre que ce code préfigurait exactement ce que serait plus tard l'arithmétique binaire. En effet, il ne s'agissait nullement ici de calculer un résultat numérique, mais bel et bien de parvenir à dissimuler, au moins momentanément, le sens d'un message que seul son véritable destinataire, également muni de ce code, devait être en mesure de retrouver sans véritable difficulté. Toutefois on ne doit pas manquer de repérer, dans le code de Bacon, à la fois l'introduction remarquable de la structure dyadique (le «A» et le «B» qui, à la différence du «1» et du «0» ne peuvent se voir différenciés l'un de l'autre que par leur forme et non, simultanément, par une paire de valeurs - de type présence / absence ou vrai / faux - qui leur seraient spécifiquement associées) et l'extraordinaire puissance de représentation (ici mise en œuvre sous la forme d'une entreprise de brouillage), offerte à son utilisateur par les multiples

¹⁸² Dans le domaine de l'écriture secrète, ou cryptographie, on peut distinguer deux genres majeurs qui sont la substitution et la transposition. Dans le cas de la transposition, l'opération de dissimulation du message consiste à changer la position de chacune des lettres qui y apparaissent sans en modifier l'identité (e.g. «TURING» deviendrait, arbitrairement, «GUTNIR»). La substitution, elle, altère l'identité mais garde la position des lettres. Dans le cas où l'on change les mots, on parlera de code tandis que dans celui où ce sont les lettres qui font ainsi l'objet d'une substitution, on parlera alors de chiffre.

combinaisons de cinq symboles formées de ces deux éléments élémentaires. Ainsi, n'importe quel message de longueur indifférente étant donné, ce dernier pourra toujours être transcrit - codé- en une suite correspondante et inversible de n quintuplets (le message source comprenant alors n symboles alphanumériques). La puissance de ce code, somme toute relativement simple, réside ainsi dans la combinatoire autorisée des deux symboles élémentaires dont il fait strictement usage. S'il ne s'agit pas ici encore d'un calcul (aucune opération, au sens arithmétique du terme, n'est jamais effectuée dans le codage d'un message pas plus du reste que dans le décodage de celui-ci), on découvre néanmoins, ou plutôt l'on pressent, dans ce processus sommaire de codage d'essence binaire, tout le pouvoir, toute la force d'une combinatoire fondamentalement axée sur la répétition et l'alternance mélangées ou non d'éléments symboliques extraits d'un répertoire extrêmement pauvre. C'est en fait la possibilité même de cette combinatoire qui fait littéralement exploser les limites, et donc qui augmente de manière monumentale la portée représentative, de cette structuration duelle élémentaire. Restait donc à étendre le pouvoir de cette combinatoire, ou, tout du moins, celui de ses principes fondamentaux, au delà du domaine secret du chiffrement des messages diplomatiques ou militaires. C'est à Godfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716) que reviendra le privilège de présenter pour la première fois d'une manière formelle l'arithmétique binaire devant une assemblée savante (il devait en l'occurrence s'agir de l'Académie des Sciences de Paris en 1702¹⁸³). Philosophe, mathématicien et mécanicien hors de pair, Leibniz avait été l'auteur, quelques années avant cet événement, d'un manuscrit de six pages rédigé en latin et intitulé *De progressio Dyadica (Rechnung mit Null und Einz*, c'est-à-dire compter avec des zéros et des uns). En fait, et comme ne manque pas de le souligner Daniel Parrochia¹⁸⁴, le philosophe de Leipzig avait déjà envisagé les combinaisons dyadiques dans sa *Dissertatio de Arte Combinatoria*, publiée en 1666. Leibniz avait ainsi découvert :

¹⁸³ Dans ses *Mémoires à l'Académie des Sciences de Paris*, datées de 1703, G.W. Leibniz s'emploie à présenter l'arithmétique binaire et ses lois fondamentales. Il y souligne également les vertus et les inconvénients propres (*i.e.* : l'usage du calcul binaire ne saurait remplacer celui de la numération décimale dans la vie courante tant serait malcommode la manipulation des longues séquences de 0 et de 1 alternés qu'il engendre nécessairement. De ce point de vue, purement pragmatique, l'emploi de la base dix, qui implique des séquences numériques «abrégées», s'avère bien plus pratique et économique que celui de l'arithmétique binaire, lourde et extrêmement redondante). Dans le cadre de ce travail, le célèbre philosophe fait par ailleurs état de la surprenante parenté existant entre l'arithmétique binaire et «*le mystère des lignes d'un ancien Roi et Philosophe nommé Fohy*», autrement dit il rend compte du lien pour le moins étonnant existant effectivement entre ce nouveau type de calcul et l'économie des figures linéaires (trigrammes) propres au Yi-King.

¹⁸⁴ In [Parrochia 1992], p.96.

l'« existence d'une arithmétique possible reposant cette fois-ci sur la progression la plus simple de toutes : celle qui va de deux en deux. Il suffit alors d'utiliser les deux premiers symboles numériques, 0 et 1, dont tous les autres résulteront par combinatoire.¹⁸⁵ ».

La progression s'effectuant de deux en deux, il devenait alors possible de représenter selon ce schéma, c'est-à-dire par une séquence plus ou moins développée reposant sur une telle alternance de 0 et de 1, n'importe quel nombre entier donné en base dix (en fait ce nombre peut être initialement exprimé dans n'importe quelle base numérique). Le tableau n° 3, ci-dessous, présente ce processus de conversion – de la valeur décimale à la valeur binaire et inversement - pour les vingt premiers entiers naturels (à partir de 1).

Tableau 3 : expressions binaires de vingt valeurs décimales successives (nombres entiers de 1 à 20).

Valeur décimale.	Valeur binaire	Valeur décimale	Valeur binaire
1	1	11	1011
2	10	12	1100
3	11	13	1101
4	100	14	1110
5	101	15	1111
6	110	16	10000
7	111	17	10001
8	1000	18	10010
9	1001	19	10011
10	1010	20	10100

Quelques douze années après qu'il soit entré au service des Ducs de Brunswick-Lünebourg, Leibniz rencontra, lors d'un séjour dans la ville de Rome, le père jésuite Philippe Grimaldi, alors attaché à la cour de Chine. Fin mathématicien, le père Grimaldi avait pu avoir accès, grâce aux privilèges attachés à sa charge, à un corpus de documents chinois extrêmement anciens, parmi lesquels figurait un traité de nature essentiellement divinatoire, le Yi-King, dont la rédaction fut attribuée à l'empereur chinois Fohy (ou encore Fou-hi et Fo-hi) quelques trois mille ans avant Jésus-Christ. Le Yi-King, ou Livre des transformations (également nommé Livre des mutations), était ainsi basé sur l'incessante lutte de deux

¹⁸⁵ *Ibidem*, p.91.

principes universels¹⁸⁶ par essence opposés: l'un était un principe mâle, le Yang, (représenté graphiquement par une ligne horizontale continue), tandis que l'autre était un principe femelle, le Yin, (représenté par une ligne horizontale dont la partie médiane était vide). Les structures élémentaires divinatoires du Yi-King, symboliquement associées aux éléments naturels fondamentaux¹⁸⁷, permettant de rendre compte, c'est-à-dire d'interpréter, tous les changements survenus (cachés), ou susceptibles de se produire dans le monde étaient formées au moyen de la combinaison de trois bâtonnets horizontaux superposés les uns au dessus des autres. De tels agencements (que Leibniz nomme dans ses *Mémoires* « figures linéaires »), sont appelés « trigrammes ». Etant donné qu'il y avait deux principes cosmiques fondamentaux, le Yin et le Yang, et que chacun des trigrammes, comme le préfixe de ce substantif l'indique parfaitement, comportaient trois bâtonnets, leur nombre total s'élevait donc à 2^3 , soit huit trigrammes. Des configurations plus complexes, appelées « hexagrammes », et au nombre cette fois-ci de 64 ($2^3 \times 2^3 = 2^6 = 64$), pouvaient également être obtenues en liant l'un à l'autre deux trigrammes. Cette possibilité combinatoire supplémentaire (en plus de celle consistant à unir, dans un trigramme, trois bâtonnets identiques ou non), permettait bien entendu d'étendre significativement la portée ou la puissance interprétative d'un pareil système. Dans un article publié en 1996, Claude Reyraud précise en outre que : «... ces deux signes de base [les bâtonnets pleins et les bâtonnets évidés en leur centre] ne constituaient pas seulement l'alphabet de la philosophie de Fohy. Ils étaient aussi utilisés pour effectuer des calculs. Calculs binaires où le Yang était noté par le chiffre 1 et le Yin par 0.¹⁸⁸ ».

¹⁸⁶ Le caractère Yin se compose de *Yin* (qui désigne la présence de nuages, donc un ciel couvert) et de *Fou* (le versant de la colline). Le Yang se compose quant à lui de *Yang* (qui désigne à la fois le soleil haut sur l'horizon et son action) et, également, de *Fou*. Les deux versants (Yin Fou et Yang Fou), indiquent donc respectivement les versants ombrageux et ensoleillé de la colline. Par extension, ils symbolisent également l'opposition universelle – mais également la complémentarité universelle - entre l'ombre et la lumière, le dualisme pouvant exister entre sphère terrestre et sphère céleste, ou encore celui de la masculinité et de la féminité. L'un et l'autre de ces principes n'existent et ne se maintiennent qu'en vertu de leur opposition et de leur complémentarité nécessaires. Leur alternance, leurs «fluctuations», constituent proprement le rythme et l'ordre du monde.

¹⁸⁷ Ces associations sont bien plus complexes que cette proposition ne le laisse immédiatement entendre : *K'ien* (trois traits continus superposés), est la perfection active, symbole du ciel, du Sud, de l'énergie productrice (perfection active) de l'été, du mâle, du père, du soleil, et du rond. *K'ouen* (trois traits interrompus en leurs milieux) représente la perfection passive et correspond à la terre, à la mère, au Nord, à l'hiver, à la réceptivité (perfection passive), à la femelle, à la lune. Les autres trigrammes sont : *Tch'en* (l'ébranlement, le tonnerre, le Nord-Est, l'apparition du printemps), *Siu'an* (la douceur, le vent, le bois, le Sud-Ouest, la fin de l'été), *K'an* (l'abîme, l'eau, la lune, l'Ouest, l'automne), *Li* (le feu, le soleil, l'Est, le printemps), *Ken* (l'arrêt, la montagne, le Nord-Est, le début de l'hiver), et, enfin, *T'ouei* (la vapeur, le marais, le Sud-Est, le début de l'été). La table de Wen-Wang, très proche du système de Fohy, voit les lignes continues ou interrompues respectivement remplacées par des briquettes pleines ou vides. Les associations que nous venons de citer y diffèrent sensiblement, mais le fonctionnement logique de ces deux systèmes demeure fondamentalement le même. Dans tous les cas, on est à même de saisir toute l'ampleur de la puissance interprétative que peuvent fournir les combinaisons (diagrammes, trigrammes, hexagrammes, huittrigrammes ou *pakoua*) permises par ces deux éléments fondamentaux si richement significatifs

¹⁸⁸ In [Reyraud 1996], pp.22-27.

Ainsi, d'un ordre purement divinatoire qui avait pour finalité essentielle la prévision et l'interprétation d'événements, était-il donc possible de passer à celui du calcul binaire. Les « lignes de clairvoyance », se voyant assigner en fonction de leur type spécifique une valeur numérique et une seule (Yang (bâtonnet plein) → 1 ; Yin (bâtonnet interrompu) → 0) se trouvaient ainsi détachés du règne de la divination, signifiant (ou « sur-signifiant ») entre tous, pour entrer dans celui, transparent, désambigué, du numérique et du calculatoire purs. La figure suivante permet de comprendre comment ces symboles graphiques pouvaient être utilisés afin de représenter les nombres selon une modalité binaire. Afin de retrouver une valeur binaire, au moins telle que nous sommes accoutumés à la voir figurée, il convient de préciser deux choses. Tout d'abord, et dans ce cas précis, les trigrammes doivent être lus de haut en bas. Ainsi, par exemple, le quatrième trigramme (bâtonnet plein – bâtonnet plein – bâtonnet tronqué) devra dans un premier temps être numériquement retranscrit de la sorte : «110». Il conviendra ensuite, lorsque cela sera nécessaire¹⁸⁹, d'inverser l'ordre d'apparition de chacun des constituants élémentaires de ce triplet : «110» deviendra donc «011», valeur binaire qui, une fois exprimée en base dix, donne bien l'entier naturel 3.

Noms :	Trigrammes :	Soit :		Valeurs binaires :	Valeurs décimales :
<i>K'ouen</i>	☰ ☰	000		000	0
<i>Ken</i>	☷ ☷	100		001	1
<i>Kan</i>	☵ ☵	010		010	2
<i>S'uan</i>	☱ ☱	110	→	011	3
<i>Tek'en</i>	☶ ☶	001	Inversion de l'ordre.	100	4
<i>Li</i>	☲ ☲	101		101	5
<i>T'ouei</i>	☳ ☳	011		110	6
<i>K'ien</i>	☴ ☴	111		111	7
	— — —	: le Yang vaut 1.		— — —	: le Yin vaut 0.

Fig. 7 : valeurs binaires et décimales des trigrammes du Yi-King.

En novembre de l'année 1700, G.W. Leibniz reçut une copie du traité du Yi-King. En quelque sorte déjà préparé à cela par les travaux absolument fondamentaux qu'il avait préalablement accomplis sur l'arithmétique binaire et ses lois essentielles, il fut prompt à découvrir la signification et la portée des trigrammes et autres hexagrammes que comportait le

¹⁸⁹ Dans le cas où l'on se trouve effectivement face à un trigramme composé de deux types de bâtonnets, il est nécessaire de procéder à cette opération d'inversion. Dans le cas contraire (où un seul genre de bâtonnet apparaît dans le trigramme), c'est inutile : inverser l'ordre des composants des triplets «000» ou «111», soit *K'ien* et *K'ouen*, n'a aucun effet : en faisant cela, on retrouve les simplement les triplets de départ, soit «000» et «111».

traité divinatoire de Fohy mais, également, à discerner la parenté étroite qui liait ses symboles linéaires et leur économie au système de l'arithmétique binaire qu'il avait construit (proximité théorique dont il exposa les lignes devant l'Académie des Sciences de Paris en 1702).

L'évocation de ces quelques éléments historiques nous a permis de souligner l'extrême ancienneté de l'usage des structures de type dyadique (d'abord utilisées dans le domaine de la divination), puis de celle, un peu plus tardive, de leur emploi dans le champ du calcul. Ainsi, les chinois, plus de trois mille ans avant Jésus-Christ, recouraient-ils déjà à une paire de symboles linéaires élémentaires (ligne pleine ou interrompue), dont les combinaisons (diagrammes, trigrammes, hexagrammes, huittrigrammes¹⁹⁰) leur permettaient non seulement d'interpréter les événements survenant dans le monde, mais, également, et dès lors que les éléments constituant ce couple fondamental se voyaient respectivement assigner une valeur numérique différente (1 ou 0), d'effectuer des calculs. Même si avec cela nous nous trouvons d'emblée positionnés dans un registre qui est spécifiquement celui de l'augure, de la divination (avec tout ce que ceci peut bien impliquer du point de vue de l'élucubration mystique ou métaphysique), nous ne pouvons que raisonnablement nous étonner de ce qu'une telle indigence de moyens (le « système » du Yi-King ne comprenait, comme nous l'avons vu, que deux éléments), ait pu assurer à l'homme une pareille prise sur son monde et le « devenir » de celui-ci et qu'en plus de cela, il l'ait également autorisé à accomplir, par dérivation, des calculs élémentaires. Peut-être faudrait-il effectivement voir en cela la phase liminaire ou inaugurale, à la fois extraordinairement précoce et raffinée, d'une saisie véritablement numérique, mais impensée en tant que telle, de la réalité. Il faudra cependant attendre la fin du XVII^{ème} siècle et le début du XVIII^{ème} pour que le calcul binaire, avec Godfried Wilhelm von Leibniz, soit formalisé et fasse l'objet d'une véritable présentation scientifique. C'est lui qui, plus d'un siècle avant les travaux décisifs de Georges Boole en logique, décèlera dans ce type de calcul les bases d'un langage symbolique universel, c'est-à-dire, pour l'exprimer autrement, celles d'une caractéristique universelle. Leibniz, avant tout autre, saisira ainsi que l'extraordinaire puissance calculatoire, mais également métaphysique, qui habite fondamentalement ce langage mathématique appauvri à l'extrême, seulement fait d'entrelacs d'«être et de néant¹⁹¹», pour reprendre ici l'expression de Gérard Chazal, réside dans les infinies figures combinées de ses signes élémentaires et dans la multiplication et la complexification des interconnexions, des relations logiques, qui peuvent les nouer les unes aux autres. L'ordre merveilleux et divin qui réside sourdement en toute chose existante, avec

¹⁹⁰ Le huittrigramme, ou *pakoua*, est constitué par la superposition de 64 hexagrammes.

¹⁹¹ In [Chazal 1995], p.64.

ses hiérarchies, ses emboîtements, ses séries périodiques et ses régularités élémentaires et alternées – en cela il peut être dit digital et computationnel - pourra alors se voir adéquatement exprimé ou reconstitué par les formules d'une combinatoire dyadique réticulaire, c'est-à-dire relationnelle. La réalité, qui en permanence se donne à nous sous la modalité souvent confuse du continu, pourra alors être interprétée ou rendue en termes purement numériques, à savoir ceux dont fait précisément usage l'arithmétique binaire. En somme, le « 1 » et le « 0 », l'unité et la nullité, dans leur face-à-face et leur complémentarité à la fois si sommaires et si complexes, constitueraient l'«alphabet» ultime et irréductible permettant de représenter l'ordonnement secret du monde tandis que leurs multiples combinaisons, et les interconnexions liant celles-ci, permettraient, sous forme compactée, ramassée, d'en dire les « phrases ». La structure dyadique, cette fois-ci originalement pensée et mise en œuvre comme une pure arithmétique (et non plus comme une entreprise d'ordre religieux et divinatoire dont aurait pu être incidemment dérivée une forme de calcul binaire), revient au monde non plus afin de conférer du sens à ses événements (présents ou à venir), mais pour en exprimer mathématiquement un ordre caché d'essence numérique : elle ne serait donc pas coextensive au monde, mais en serait bel et bien constitutive. Or, nous avons déjà fait mention de ce fait plus haut, le binaire (en fait l'algèbre booléenne), constitue la « langue » fondamentale des ordinateurs. A la base, ne l'oublions pas, ces machines digitales sont avant toutes choses des calculateurs (que l'on décide par ailleurs, et pour les diverses raisons que nous avons déjà examinées plus haut, de les nommer *computers*, calculateurs ou encore ordinateurs). La conformation de leurs éléments matériels essentiels, (qu'il s'agisse indifféremment de circuits élémentaires basés sur l'emploi de relais mécaniques, de relais électromécaniques, de *vacuum tubes*, ou encore de transistors en germanium ou en silicium), réalise, incarne et met proprement en œuvre les principes du calcul binaire. En cela, c'est-à-dire puisque leur économie fondamentale repose exclusivement sur les règles articulant le déploiement de cette espèce arithmétique, il n'y a pas véritablement lieu de s'étonner de leurs incroyables capacités calculatoires. Afin de rendre compte de pareilles aptitudes computationnelles, démontrons d'abord que ces lois, qui toutes se trouvent fondues¹⁹² au cœur de l'unité arithmétique et logique de l'individu informatique et en autorisent foncièrement le fonctionnement, ne sont en fait guère complexes et qu'elles peuvent très bien être soumises à un processus d'automatisation. Une telle étude nous permettra de répondre à une première question essentielle : comment les ordinateurs calculent-ils ? Les réponses que nous serons en

¹⁹² L'emploi de ce terme est à peine exagéré puisqu'il est courant que l'on désigne les fabricants de microprocesseurs (*e.g. Intel* ou *A.M.D.*), en usant du terme *fondeurs*.

mesure d'apporter à cette interrogation au cours de notre investigation permettront ensuite, nous l'espérons, d'aborder clairement la question du traitement informatique des symboles non numériques, autrement dit celle concernant spécifiquement le traitement du sens et de la forme par les machines.

1.3.2. Les lois de l'arithmétique binaire.

Avant de passer à l'étude de ces lois proprement dites, rappelons très brièvement comment il est possible de convertir un nombre exprimé en base dix en base deux puis d'effectuer l'opération inverse. Pour cela, il convient de se doter d'une table de conversion (base du calcul). Cette table s'écrit ainsi:

2^n	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	1^0
-------	----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

ou, ce qui revient au même :

2^n	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1
-------	------	-----	-----	-----	----	----	----	---	---	---	---

Si nous désirons connaître l'expression binaire d'une valeur N donnée en base décimale, telle que $N_{10} = 12$ par exemple, il convient d'abord de décomposer ce nombre en l'exprimant au moyen d'une sommation de certains des termes numériques (en l'occurrence des puissances de 2), qui apparaissent dans cette table. Ainsi, 12 est-il égal à $8 + 4$, ou encore, exprimé sous forme polynomiale, à $2^3 + 2^2$. Sous ces deux puissances de deux, qui figurent effectivement dans la table, on se contentera d'inscrire le symbole numérique « 1 », (ici, il est « vrai » que 2^3 entre dans la composition du nombre 12 *et* il est « vrai » que 2^2 entre dans la composition du nombre 12 puisque $2^3 + 2^2 = 12$), partout ailleurs, on notera « 0 » (autrement dit, il est « faux » que les autres valeurs figurant dans la table de conversion entrent dans la composition de 12).

2^n	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	1^0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

Qu'est-ce qu'un ordinateur ?

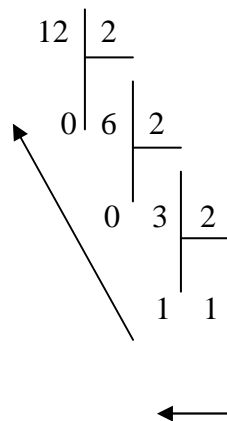
L'expression binaire de 12 est donc 1100. Pour la valeur 69, on aura $69 = 2^6 + 2^2 + 1^0$. Comme indiqué ci-dessus, on indexe la table au moyen de 1 et de 0 et on obtient alors :

2^n	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	1^0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1

En base deux, 69 s'écrit donc 1000101.

Une autre méthode envisageable pour parvenir à ce résultat, peut-être un peu plus fastidieuse, consiste à effectuer une division entière du nombre devant être converti en utilisant comme diviseur de cette opération la base de destination (ici 2). On conserve alors le reste de cette division puis on réitère ce processus en l'appliquant au quotient qui vient juste d'être obtenu. La procédure doit être stoppée lorsque le quotient de la division est inférieur à la base de destination. Le résultat final est alors constitué par le dernier quotient obtenu suivi des restes (on le « lit » de la gauche vers la droite).

Pour la valeur 12, on aura donc :



soit 1100, ce qui, en base 10, équivaut bien à 12.

Inversement, si l'on dispose initialement d'une expression binaire, par exemple 11000111, on rapporte chacun des symboles numériques de cette suite dans chacune des cases de la table de conversion en commençant par inscrire le « bit » de poids le plus faible (le premier en partant de la droite de la série, ici 1) dans la case située le plus à droite de la table, puis on « comble » les cases restées vacantes avec des 0.

2^n	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	1^0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1

La valeur décimale de 11000111 est donc égale à l'expression polynomiale suivante : $(0 \times 2^n) + (1 \times 2^7) + (1 \times 2^6) + (0 \times 2^5) + (0 \times 2^4) + (0 \times 2^3) + (1 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (1 \times 1^0)$, ou, plus simplement, à $2^7 + 2^6 + 2^2 + 2^1 + 1^0$, soit 199.

D'une façon générale, dans un système de base p tel que $p > 1$ et pour un nombre N on écrira :

$$N = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 \text{ ou encore } \sum_{i=0}^n a_i p^i, \text{ avec } a_i \in \{0, 1, \dots, p-1\} \text{ et } a_n \neq 0.$$

Ce type de conversion, on le constate aisément, ne recèle en lui-même rien de réellement difficile. La seule difficulté notable, toute relative encore, qui survienne dans le cours de l'effectuation de ce genre de procédure consiste en l'opération de décomposition visant à exprimer en puissance(s) de deux éventuellement sommées des nombres initialement donnés en base décimale, octale ou hexadécimale. Les autres phases qui peuvent être distinguées dans ce procès se résument autrement à une alternance de pas élémentaires de lecture ou d'écriture. Ceci étant clairement posé, nous pouvons maintenant passer à l'examen détaillé des lois ou tables de l'arithmétique binaire.

Les principes de l'opération d'addition en arithmétique binaire sont les suivants :

- 1) Premier cas : les deux nombres à additionner sont tous les deux des 0 : $0 + 0 = 0$.
- 2) Deuxième cas : les deux nombres sont un 1 et un zéro : $1 + 0 = 0 + 1 = 1$.
(Commutativité de l'addition).
- 3) Troisième et dernier cas, les deux nombres sont des 1 : $1 + 1 = 10$ (retenue).

La soustraction ne pose pas plus de problèmes. Les trois cas de figures possibles sont les mêmes que ci-dessus, à savoir deux 0, un 1 et un 0, et enfin deux 1, devant tour à tour être soustraits l'un de l'autre. En conséquence on aura :

- 1) $0 - 0 = 0$.
- 2) $1 - 0 = 1$.
- 3) $10 - 1 = 1$.

La multiplication et la division binaires, qui reposent sur les mêmes principes que la multiplication et la division en base décimale, s'effectuent comme suit. Supposons que nous souhaitons, en binaire, multiplier l'une par l'autre les valeurs décimales suivantes : 49 et 13. En base dix, le résultat de l'opération 49×13 est égal à 637. La valeur binaire de l'entier 49 est 110001, celle de 13 est 1101. Les lois de la multiplication binaire sont les suivantes :

- 1) $0 \times 0 = 0$.
- 2) $0 \times 1 = 1 \times 0 = 0$. (En vertu de la propriété de commutativité de la multiplication).
- 3) $1 \times 1 = 1$.

En conséquence, nous posons :

$$\begin{array}{r}
 110001 \\
 \times 1101 \\
 \hline
 110001 \\
 000000 \\
 110001 \\
 110001 \\
 \hline
 1001111101
 \end{array}$$

↓ Série d'additions.

Résultat de la multiplication. → 1001111101

La séquence binaire 1001111101, une fois convertie en base dix, donne bien 637 :

2^n	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	1^0
0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1

$$1001111101 = (2^9 + 2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 1^0) = 637.$$

Pour la division binaire, on procèdera comme en arithmétique « classique ». Deux nombres étant donnés à diviser, par exemple 20 par 10, on procèdera de la façon suivante, sachant qu'en binaire, 20 s'écrit 10100 ($2^4 + 2^2$), et 10, 1010 ($2^3 + 2^1$). On pose alors :

$$\begin{array}{r|l} 10100 & 1010 \\ 00 & 10 \end{array}$$

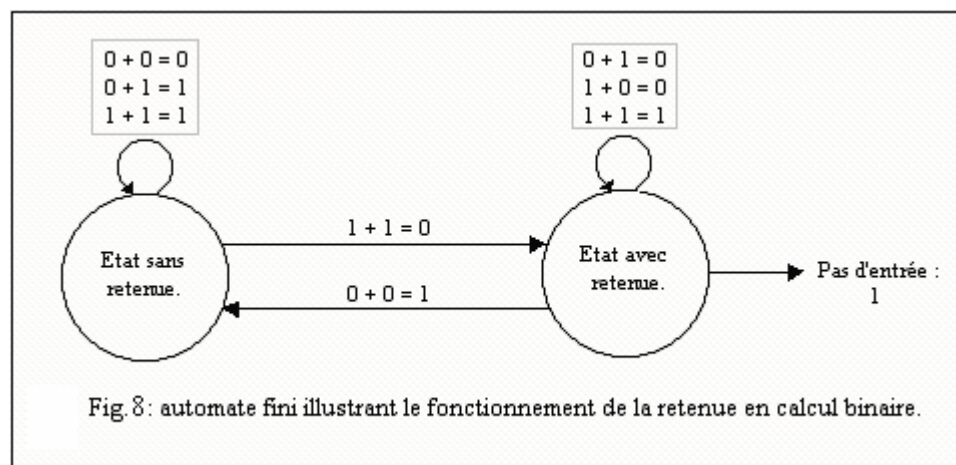
En base dix, 20 divisé par 10 est égal à 2. Or la valeur binaire de 2 est 10 ($10 = 2^1$).

Les lois de la multiplication binaire (ou table de la multiplication binaire), comme du reste celles de l'addition ou de la soustraction, sont seulement au nombre de trois. Comparées aux dix tables de la multiplication du système décimal (table du 0, du 1, ..., du 9), où, pour chacune d'entre elles, on constate que le multiplicateur est maintenu dans son identité (excepté lorsque l'on change de table), tandis que la valeur du multiplicande est linéairement incrémentée d'une unité pour chaque ligne d'une table spécifiée ($2 \times 0 = 0$, $2 \times (0 + 1) = 2$, ..., $2 \times (8 + 1) = 18$), elles peuvent être dites extraordinairement compactes et économiques. Cette compacité et cette simplicité (seules quatre configurations numériques – réductibles à trois du fait de la propriété de commutativité - sont susceptibles d'être identifiées dans les différentes étapes de toute multiplication ou addition binaire), impliquent bien entendu un certain coût pour leur utilisateur. De manière générale, ce que nous venons d'affirmer de la multiplication binaire peut être également étendu à chacune des autres opérations élémentaires de ce système numérique: ce qui est finalement gagné du côté de la réduction du nombre des expressions légales et de la facilitation de l'exécution effective du calcul se paye en ceci que, très, fréquemment les résultats intermédiaires et finaux auxquels on parvient se donnent sous la forme de séquences numériques longues, encombrantes et très redondantes. Il n'est guère difficile de se rendre compte rapidement de cela: dans l'exemple figurant ci-dessus (49 multiplié par 13), le résultat est égal à 637, soit une suite composée de trois chiffres parfaitement différenciables d'un simple coup d'œil: un pour les centaines (6), un pour les dizaines (3), un pour les unités (7). De surcroît, la place occupée par chacune des entités numériques dans la série indique directement et sans confusion possible ce à quoi elle renvoie: unités, dizaines, centaines, etc., et ce quel que soit le sens de la lecture. Cette identification immédiate du rôle positionnel de chacune des primitives numériques du système ne se retrouve nullement lorsque l'on calcule en binaire. Le même résultat obtenu en base 2 s'exprime en effet en une séquence comportant 10 occurrences entremêlées ou répétées de 1 et de 0: 100111101 (soit le résultat de la multiplication que nous avons donnée en exemple). A moins d'être convenablement entraîné, il est bien difficile de repérer d'emblée où, dans cette suite, se situent les individus ou les groupes d'individus représentant les unités, les

dizaines, etc. L'effectuation d'une telle opération ne requiert pourtant de la part de celui qui la réalise qu'une maîtrise parfaite de quelques principes opératoires fort simples, à savoir bien sûr ceux qui régissent le comportement de la multiplication et de l'addition binaires en toutes situations possibles (lesquelles, nous l'avons vu, sont au final fort peu nombreuses). En revanche, pour multiplier ne serait-ce que deux nombres en base 10, un opérateur devrait nécessairement posséder la totalité des tables de multiplication et d'addition propres à ce système afin de parvenir au même résultat. Conséquemment, cela signifie que non seulement en termes d'investissement mémoriel (temps d'apprentissage et « espace » cérébral mobilisé pour la fixation définitive des données acquises), mais également en termes de facilité d'exécution, il est nettement plus intéressant pour quelqu'un qui doit calculer de recourir à la base 2 qu'à la base 10. A l'inverse, l'espace physique nécessaire pour stocker momentanément ou définitivement les issues de calculs effectués en base 2 est nettement plus important que celui exigé pour le stockage de résultats exprimés en base 10, ces derniers étant toujours bien plus concis – et lisibles – que les premiers. De la même manière, il convient de noter que la question de la reproductibilité, et, de façon plus générale, celle de la manipulation des suites binaires se posent immanquablement à nous. Pour commencer, et sur le plan intuitif, il semble relativement aisé de comprendre que l'on ait plus de facilité à manipuler des séquences numériques exprimées en base décimale que des suites données ou obtenues en numération binaire. D'abord, et cela va de soi, parce que nous sommes tous profondément accoutumés, pour ne pas dire conditionnés, à la fois par un long héritage historique ainsi que par l'éducation que nous avons reçue, à faire prioritairement usage du système décimal pour mener nos tâches calculatoires courantes. En dépit des raisons d'être multiples et de la profondeur réelle de cet ancrage qu'il paraît au demeurant bien difficiles de contester, force nous est faite d'affirmer ici que ce dispositif de comptage, que nous trouvons si naturel, n'a au fond strictement rien de nécessaire. Ceci relève bien évidemment du domaine de l'hypothétique, mais il ne se semble nullement déraisonnable d'imaginer que si « l'évolution nous avait dotés » d'appendices terminaux pourvus d'un, de quatre ou de huit doigts nous n'aurions pas considéré les systèmes binaire, octal ou hexadécimal moins naturels que le système décimal. Maintenant il est vrai, sauf accident très regrettable, que nous possédons tous dix doigts à la naissance. Cette conformation organique particulière paraît constituer en vérité l'élément le plus à même de rendre fondamentalement compte de notre inclination spécifique à choisir et à employer de façon éminemment privilégiée la base dix: il est tout simplement à la fois commode et efficace de pouvoir mener des calculs parfois complexes en ayant uniquement recours aux dix doigts de nos mains et aux combinaisons nombreuses qu'ils

autorisent. En fonction de cela, on pourrait raisonnablement prétendre que le système décimal est organiquement coextensif à l'espèce humaine. En second lieu, la commodité ou l'aisance que nous pouvons effectivement avoir ou non à manipuler des expressions numériques exprimées dans une base quelconque paraît varier en raison inverse du nombre de primitives numériques que celle-ci comprend. Pour le binaire, ces primitives sont au nombre de deux ; les lois qui régissent l'économie de ce système, nous sommes précisément en train d'examiner ce point, se voient d'autant simplifiées et réduites en nombre. La contrepartie négative de cette simplification et de cette réduction pourtant appréciables des points de vue de la facilité de mémorisation et de la mise en oeuvre réside dans le fait que les suites numériques qui s'y trouvent exprimées sont, en dehors de leur longueur, très peu différenciables les unes des autres puisque toutes se résument finalement à des successions fréquemment alternées de 1 et de 0. Pis, au sein même d'une série binaire un peu longue on peine parfois à se repérer vraiment tant les sous-ensembles (qui peuvent être arbitrairement appréhendés comme des unités, des paires, des triplets, etc.), qui la constituent se ressemblent et, d'une certaine façon, « interfèrent » les uns avec les autres. Le système décimal comprend quant à lui, on le sait, dix primitives (0, 1, 2, ..., 9). Chacun de ces dix chiffres possède une forme symbolique unique qui en permet sans ambiguïté l'identification immédiate au sein d'une suite composée. Bien évidemment, les principes réglant les opérations fondamentales d'un tel système sont un peu plus complexes que ceux de la base binaire (il y a d'emblée plus de primitives donc plus de configurations type envisageables). Le fait que l'alphabet d'une base comprenne un nombre d'individus numériques fondamentaux supérieur à deux présente pourtant un avantage de taille: la lisibilité des suites numériques exprimées dans un tel système s'y trouve proportionnellement accrue. La différenciation – et donc l'identification – entre individus mathématiques élémentaires y est très grandement facilitée. En binaire, au contraire, la totalité des figures numériques susceptibles d'entrer dans une configuration de calcul se trouve pour ainsi dire condensée, ramassée, dans des enchaînements constitués exclusivement de 1 et de 0 dont seules les tailles respectives permettent d'abord, quoique de façon très limitée, de les comparer les uns aux autres. Alors certes on calcule peut-être avec plus de facilité, mais la lecture, la manipulation et l'interprétation des numéraux traités sont rendues bien plus laborieuses. On voit donc parfaitement que l'arithmétique binaire et sa pratique ne recèlent rien qui soit véritablement compliqué si ce n'est, justement, leur caractère inhabituel et malcommode, dû aux inévitables survenues de suites parfois fort longues constituées des seuls éléments 1 et 0 et au temps notable qu'il faut en conséquence passer pour résoudre des opérations aussi triviales que l'addition, la division ou la multiplication. Le coût attaché à la

facilitation des calculs obtenue en recourant à la base 2 se traduit ainsi par une complexification considérable des nombres ainsi exprimés (par accroissement de la longueur et augmentation de la redondance des séquences numériques). C'est là par ailleurs un caractère tout à fait saillant - et pour tout dire véritablement limitatif¹⁹³ - de l'arithmétique binaire qu'avait remarqué et analysé G.W. Leibniz lors du discours qu'il tint devant les membres de l'Académie des Sciences de Paris en 1702. L'étude du fonctionnement de la retenue est toute aussi nécessaire qu'intéressante. Nous avons introduit celle-ci en examinant l'addition binaire (troisième cas : $1 + 1 = 10$) puis nous en avons forcément et largement fait usage en développant l'exemple illustrant la multiplication binaire. Un petit *automate* fini, dont nous empruntons ici la structure logique à Philip N. Johnson-Laird¹⁹⁴, permettra de rendre parfaitement compte de la mécanique de la retenue en arithmétique binaire.



Cet automate, en fait un additionneur, possède comme on peut le voir sur la figure 7 deux états fondamentaux : le premier d'entre eux est appelé « état sans retenue », le second est désigné comme étant l'«état avec retenue». Les deux grandes flèches figurant entre les cercles (les états de l'automate), servent à indiquer le sens dans lequel peuvent être effectués les passages d'un état à l'autre. Les deux égalités apparaissant au dessus de chacune de ces flèches représentent les conditions d'entrée devant être remplies pour que l'automate modifie son état. Ces opérations (soit « $1 + 1 = 0$ », soit « $0 + 0 = 1$ »), doivent être effectuées lorsque

¹⁹³ Il est aisé de se rendre compte qu'à partir d'une certaine limite numérique, qui n'est pas nécessairement élevée (disons par exemple la centaine décimale), la manipulation de séquences binaires devient de plus en plus malaisée. Lorsqu'il s'agit d'additionner, de multiplier, de soustraire ou de diviser de telles séries, le risque d'erreur augmente considérablement, ne serait-ce qu'en reportant au rang inférieur les résultats intermédiaires lors de chacun des pas du calcul. Tout ceci est avéré - il suffit d'en faire l'expérience pour s'en convaincre absolument - à moins bien sûr que l'on ne puisse automatiser ce type de procédures...

¹⁹⁴Automate présenté in [Johnson-Laird 1994], fig. 3.1, p.46.

l'on change d'état. La totalité des équations apparaissant sur cette figure constitue la « table » d'instructions ou le « programme » de l'automate. La partie gauche de ces égalités représentent les entrées devant être additionnées par l'automate et la partie droite constitue le résultat (ou la sortie) de ces opérations. L'automate possède en outre deux configurations logiques particulières qui constituent des conditions ou des états d'arrêt. Dans le cas où il se trouve dans l'«état sans retenue», il s'arrête tout simplement lorsque les entrées cessent, tandis que dans l'«état avec retenue», il stoppe dès lors qu'il obtient comme résultat d'une entrée la valeur 1. Attachons-nous maintenant à « mettre en marche » cette machine logique afin de comprendre comment elle fonctionne. Imaginons que, dans un premier temps, nous souhaitons additionner les valeurs binaires 01 et 10 (1 et 2 en base dix). L'état de départ est l'état sans retenue, que nous désignerons ici par E1. La première entrée sera « 1 + 0 ». Le résultat de cette opération étant 1, l'automate ne change pas d'état et reste en E1, (ce type de « mouvement » est symbolisé graphiquement par la petite boucle fléchée figurant juste au dessus des cercles représentant E1 et E2). L'opération devant être effectuée ensuite est « 0 + 1 ». Ici aussi, le résultat de cette opération n'amène pas l'automate à modifier son état interne, il demeure donc en E1. Etant donné qu'à partir de ce point la totalité des pas du calcul ont été accomplis et qu'aucune entrée supplémentaire ne peut être traitée, la machine s'arrête d'elle-même et le résultat final est 11 (soit 3 en base dix). Examinons maintenant un cas de figure où la machine change deux fois d'états. Soit les deux valeurs binaires suivantes à additionner : 0010 (2 en base dix) et 1010 (10 en base dix). L'état de départ est toujours E1. La première opération à réaliser est « 0 + 0 », ce qui a pour résultat 0. La machine ne change donc pas d'état. La deuxième entrée est « 1 + 1 », ce qui correspond à l'instruction déterminant le passage de E1 à E2. La machine « marque » donc 0 (puisque « 1 + 1 = 0 »), et passe ensuite à l'état E2 en retenant 1 en « mémoire ». La troisième addition est « 0 + 0 », or, en vertu de l'instruction spécifiant le passage de E2 à E1, l'automate doit repasser à l'état E1 après avoir affiché 1 (retenue). La quatrième (et dernière) opération est « 0 + 1 ». Ici la machine ne change pas d'état, marque 1, et s'arrête puisqu'il n'y a pas d'entrée supplémentaire. Le résultat final du calcul est 1100 (12, c'est-à-dire 10 + 2 en base dix). Le dernier exemple que nous considérerons ici est celui qui amène la machine à s'arrêter en E2. Nous voulons alors additionner la valeur binaire 11 (3 en base dix) à elle-même (ce qui revient, en binaire, à la multiplier par 10). Positionné sur E1, l'automate doit d'abord effectuer « 1 + 1 ». Cette opération, nous l'avons vu, correspond à l'instruction caractérisant la commutation de E1 à E2. En conséquence, il « affiche » 0 et passe à l'état E2 en retenant 1. La seconde opération est « 1 + 1 », où la première instance du symbole numérique «1» vaut pour la retenue précédente.

Le résultat de ce calcul est 1. La dernière addition est « $(0) + 1$ », dont le résultat est 1. Puisque l'automate est en E2 et qu'il produit cette valeur, la condition d'arrêt spécifiée pour cet état se trouve remplie et en conséquence il stoppe son activité. L'issue du calcul est 110, ce qui est égal à $6(3 + 3)$, en base 10.

Le fonctionnement de cet additionneur¹⁹⁵ (dont la représentation peut par ailleurs être donnée sous forme graphique, comme nous l'avons fait, ou tabulaire), illustre encore la très grande simplicité des principes de l'arithmétique binaire et la facilité avec laquelle celle-ci peut effectivement être mise en oeuvre. Deux états étant donnés, E1 et E2, il ne leur correspond respectivement que 4 entrées possibles. Sur cet ensemble composé au total de huit entrées autorisées (puisque'il s'agit d'un additionneur, ce sont les règles de l'addition binaire), deux correspondent à des instructions conditionnant le passage d'un état à l'autre avec affichage d'un résultat. Sur les six opérations restantes, les résultats de trois d'entre elles maintiennent l'automate dans l'état E1, tandis que ceux des trois autres conditionnent soit sa conservation dans l'état E2, soit son arrêt (le résultat de l'addition effectuée en E2 étant alors 1). Dans le cas où l'automate serait dans l'état E1 et qu'il n'y aurait plus d'entrée, c'est-à-dire plus d'opération à effectuer, celui-ci s'arrête également. Il est difficile d'imaginer chose plus élémentaire. Des nombres binaires quelconques étant donnés à additionner, il suffit simplement de suivre cette procédure pas à pas, en vérifiant le résultat de chaque opération individuelle et en effectuant rigoureusement les actions correspondantes (changement ou conservation de l'état courant ou encore arrêt du processus en fonction de l'issue des calculs intermédiaires), pour parvenir de manière assurée à un résultat final exact. Ce n'est pas là, on en conviendra aisément, un exercice intellectuellement insurmontable. A partir de là, la question se pose alors de savoir de quelle nature est le lien unissant si intimement l'ordinateur et la numération binaire. Autrement dit, qu'est-ce qui, foncièrement, confère à la machine informatique son extraordinaire puissance computationnelle ? Chacun le sait, un ordinateur utilise des applications - que l'on appelle peut-être plus couramment programmes - et qui peuvent être par exemple, mais cela ne saurait en aucun cas constituer une énumération exhaustive, de type bureautique, scientifique ou ludique. Les utilisateurs de ces programmes les emploient bien entendu en vue d'obtenir certains résultats très spécifiques (comme écrire un texte, faire du photomontage, jouer, etc.). Il existe également d'autres programmes, comme par exemple la calculatrice du système d'exploitation *Windows 9x* de la firme *Microsoft*, qui

¹⁹⁵ Lequel peut bien entendu être également utilisé pour la résolution des opérations de la phase additive d'une multiplication. Indiquons en outre qu'un tel automate peut être construit pour n'importe laquelle des opérations élémentaires de l'arithmétique binaire.

permettent quant à eux d'effectuer des tâches qui peut-être peuvent paraître plus élémentaires, ou du moins plus modestes, au regard des possibilités offertes par les logiciels de création musicale ou ceux dédiés au travail infographique. La finalité de l'emploi de ce genre de programme peut alors simplement résider dans l'obtention d'un résultat numérique précis (dont le degré d'exactitude est évidemment fonction de la précision des données entrées, de la puissance de traitement et de la capacité mémoire de la machine utilisée). Dans tous les cas, les logiciels, et ce quel que soit leur type spécifique, autorisent finalement la résolution d'une certaine sorte de problèmes. Ces programmes, généralement écrits dans des langages de programmation dits de haut niveau (comme peuvent l'être le C, le C++, le Java, le Pascal, etc.), mettent en œuvre à cette fin des structures que l'on nomme *algorithmes*¹⁹⁶. Un algorithme peut être défini comme un ensemble fini de règles permettant, en un nombre limité d'étapes, de résoudre un problème donné en un temps acceptable du point de vue de l'«utilisateur». En cela, et comme le rappelle très justement Jérôme Ramunni : « ...*la notion d'algorithme n'est spécifique ni aux ordinateurs, ni aux mathématiques. Toute activité complexe décomposable en un certain nombre d'opérations élémentaires qui peuvent être exécutées dans un ordre donné peut s'appeler algorithme*¹⁹⁷. ».

Une simple recette de cuisine est donc, selon cette définition générique, une sorte d'algorithme, de la même manière d'ailleurs que peut l'être par exemple la check-list permettant de vérifier l'état des structures porteuse et motrice d'un aéroplane et le bon fonctionnement de son instrumentation embarquée. Malgré le caractère extrêmement général de cette détermination (laquelle permet, remarquons-le au passage, de couvrir au moins théoriquement bon nombre de situations de la vie courante comme par exemple « skier », « indiquer son chemin à quelqu'un » ou « construire une maquette¹⁹⁸»), il n'en demeure pas moins, lorsque cela est possible, que l'expression la plus pure et la plus économique qu'est susceptible de revêtir en droit un algorithme est la forme logico-mathématique. L'ordinateur, par l'entremise des langages informatiques et en vertu du fait qu'il est par essence un calculateur constitue alors le support privilégié de la mise en œuvre effective de ces procédures formelles. Un programme informatique peut parfaitement être constitué d'un algorithme unique (comme une simple boucle affichant n fois une suite alphanumérique

¹⁹⁶ Ce substantif provient de l'altération (conséquence probable de l'influence du terme grec *ἀριθμός*, nombre), du surnom du mathématicien arabe Muhammad Ibn Musa (IX^{ième} siècle) : Al Khwarizmi.

¹⁹⁷ In [Ramunni 1989], p.234.

¹⁹⁸ Le plan de la maquette est l'algorithme permettant d'en effectuer le montage.

quelconque¹⁹⁹) ou bien de plusieurs procédures modulaires possiblement interagissantes (les « moteurs » d'affichage des jeux actuels utilisent concurremment des algorithmes complexes tels que l'*anti aliasing*, le *bump mapping*, le *trilinear filtering* ou le *tile rendering* pour optimiser la qualité des images et la rapidité de l'affichage des objets texturés et animés). Ces algorithmes, que l'on nomme également processus calculatoires, procédures exécutives ou procédures calculatoires finies, sont fondamentalement des constructions mathématiques que leur essence formelle, essentiellement symbolique, autorisent à être indifféremment représentés dans les termes ou les expressions spécifiques des multiples langues de l'informatique, que celles-ci soient proches de la langue naturelle de l'utilisateur, comme le sont effectivement B.A.S.I.C. ou C++, ou non (c'est le cas par exemple du langage assembleur qui fait spécifiquement usage de mnémoniques et d'une notation numérique hexadécimale). L'algorithme est donc une *procédure mécanique* entièrement déterminée, totalement transparente, qui, en un nombre déterminé de pas et en un temps restreint fournit une solution à un problème, autrement dit « s'arrête » en produisant un résultat (lorsque le problème est calculable²⁰⁰). Automate logique, il instancie donc une fonction spécifique (il correspond à la définition mathématique précise d'un problème) et présente - lorsqu'il stoppe - une solution à ce problème. L'additionneur de la figure 7 représente graphiquement une telle procédure. De façon remarquablement simple, purement mécanique, ce processus entièrement définissable par les clauses explicites précédemment citées permet d'obtenir un résultat précis pour un problème exactement spécifié (en l'occurrence celui qui correspond à l'opération d'addition portant sur n nombres binaires). Cette nature formelle, ce caractère mécanique et cette simplicité rigoureusement ordonnée constituent cela même qui autorise une telle procédure ou algorithme à être programmé, c'est-à-dire à être exprimé en un langage extrêmement peu tolérant à l'égard de l'ambiguïté et de l'erreur²⁰¹ qui puisse être à la fois «

¹⁹⁹ En B.A.S.I.C., (ORIC Extended BASIC V1.0), un tel algorithme (confondu alors avec le programme), peut par exemple être exprimé de la manière suivante :

```
10 FOR I=1 TO n
20 PRINT "GÖDEL- ESCHER-BACH"; " "
30 NEXT I
```

²⁰⁰ Nous examinerons plus loin et plus en détail les notions de calculabilité (problème de l'arrêt ou de la décision), de machine (ou automate) de Turing et de machine universelle de Turing.

²⁰¹ Il va de soi qu'un code source comportant une ou plusieurs fautes de syntaxe, comme par exemple l'omission répétée ou non du caractère « ; » à la fin d'une suite d'instructions en C++, interdira de façon rédhitoire la compilation de ce code et donc la génération du fichier exécutable correspondant jusqu'à ce que l'infraction aux règles syntaxiques du langage de programmation ait été dûment corrigée. De ce point de vue, la tolérance du langage vis-à-vis de l'erreur peut être définie comme étant absolument égale à zéro. Il est cependant des cas, également problématiques, où les fautes et les anomalies de programmation ne s'avèrent pas aussi aisément identifiables en ceci qu'elles n'interdisent pas la compilation du code source et la production d'un exécutable

compris » et « utilisé » par un ordinateur. Sans vouloir trop nous avancer ici, nous pouvons d'ores et déjà affirmer que ces algorithmes, ou leurs diverses expressions programmatiques envisageables, ne sont ni plus ni moins que de petites machines logiques répondant à un type spécifique, un genre purement formel de *one kind computer* comme diraient les auteurs anglo-saxons. On pourrait donc parfaitement imaginer construire une machine spécifique, mécanique, électromécanique ou électronique, qui matérialiserait la fonction et le comportement de n'importe laquelle d'entre elles (additionner des nombres exprimés en binaire et fournir ensuite le résultat de cette opération par exemple). En fait, un ordinateur n'est ni plus ni moins qu'une machine générique ou universelle qui, en *input*, accepte une description logique de telles machines caractéristiques sous forme de programmes et, momentanément, les instancie et les fait fonctionner au moyen de sa structure matérielle propre. On pourrait également dire que l'ordinateur *émule* le comportement et la fonction de machines qui n'ont pas été matériellement actualisées ou construites²⁰² en « devenant » littéralement ces machines le temps que dure l'exécution du programme, grâce à la description logique de celles-ci. De la même manière qu'avec l'additionneur, les deux procédures permettant la conversion d'un nombre exprimé en base dix en base deux et inversement (table et méthode de la division), pourraient sans grande difficulté faire respectivement l'objet d'une définition algorithmique puis être ensuite indifféremment²⁰³

immédiatement utilisable. En Visual C++, la construction d'une application *Dialog based* multi-champs comportant des boutons, des cases ou des menus dotés de caractères mnémoniques (caractères soulignés permettant de déclencher au clavier certains événements) peut s'avérer particulièrement délicate si l'on ne prend pas la peine de systématiquement vérifier la présence de conflits générés par la duplication éventuelle de ces mnémoniques. Dans le cas où un tel contrôle n'est pas effectué et qu'il y a effectivement duplication, le code est pourtant compilé et l'application créée. Il s'ensuit alors un comportement quelque peu erratique du programme puisqu'en activant une mnémonique, l'utilisateur risque de ne pas obtenir l'effet escompté. Selon cette perspective, on peut par conséquent affirmer qu'un tel langage de programmation est relativement tolérant à l'ambiguïté ou à l'erreur. Cependant, il ne s'agit plus cette fois d'une violation des principes essentiels réglant la syntaxe ou l'architecture des suites d'instructions propres au langage employé – laquelle serait rapidement sanctionnée par la génération d'un message d'avertissement assorti d'un code d'erreur - mais d'une simple faute de programmation n'entraînant pas le rejet du code source par le compilateur du langage. Bien qu'il soit fonctionnellement défectueux, le code d'une pareille application est donc parfaitement «sain» au regard des exigences structurelles et syntaxiques du langage considéré.

²⁰² Notons toutefois qu'un ordinateur un peu puissant peut émuler des machines qui ont été effectivement construites. Il existe ainsi des programmes, appelés émulateurs, qui permettent par exemple de temporairement transformer un P.C. de dernière génération en Enigma, en IMSAI, en Oric 1 ou encore en Amstrad. Des programmes tels qu'*Enigma20*, *Sedoric*, *Cap32*, *Mess32* ou *WinSton* permettent ainsi aux passionnés d'une époque désormais révolue de cultiver leur nostalgie à peu de frais. La condition nécessaire et suffisante pour que ce genre de programmes puisse être définis et écrits consiste en la possibilité de décrire de manière logique (sous la forme d'un algorithme), le fonctionnement de la machine à émuler, que celle-ci du reste soit ou non un ordinateur.

²⁰³ Il est toutefois nécessaire de préciser que plus un langage informatique est orienté vers l'utilisateur (c'est-à-dire proche d'une langue naturelle qui, généralement, est l'anglais), plus le temps requis pour l'exécution des programmes qui y sont rédigés est important. L'assembleur, qui constitue le langage de programmation le plus proche du langage machine (binaire) est donc le plus rapide en termes de vitesse d'exécution. A l'inverse, si un langage informatique est éloigné de cette couche fondamentale, le temps d'exécution des programmes qui sont

portées vers un quelconque langage informatique. Une fois les programmes écrits, ils peuvent être entrés en machine par le biais d'un périphérique d'acquisition de données et autoriser leur utilisateur, dès lors qu'ils sont exécutés, à réaliser automatiquement et très rapidement les procédures de conversion numériques qu'ils représentent... Ce qu'il convient de bien comprendre ici, c'est que, dans tous les cas de figure, c'est-à-dire quels que soient le genre de programmes utilisés, les algorithmes qu'ils mettent en œuvre et le langage dans lequel ils peuvent bien être écrits, ils sont finalement représentés en machine sous forme de suites numériques binaires. L'intérêt essentiel des numéraux binaires réside dans le fait « *qu'ils permettent de représenter des nombres* [ou, par l'entremise d'un codage explicite adéquat, par exemple les codes E.B.C.D.I.C. ou A.S.C.I.I.²⁰⁴, des symboles alphanumériques] *dans des dispositifs ne disposant que de deux signaux internes*²⁰⁵ ». Tel est le cas, bien sûr, des calculateurs électroniques digitaux que nous nommons ordinateurs. Les primitives binaires qu'utilisent ces machines au niveau de la couche matérielle sont représentées par la présence, 1, ou l'absence, 0, d'une tension électrique particulière (un numéral quelconque étant représenté par un ensemble de tensions présentes ou absentes). Nous avons indiqué à plusieurs reprises déjà que l'économie interne des calculateurs électroniques reposait foncièrement sur l'emploi de l'arithmétique binaire et plus particulièrement sur celui de l'algèbre de Georges Boole. Or, en 1938, dans le cadre de sa thèse de doctorat, l'américain Claude Shannon, dont nous avons déjà vu qu'il était l'auteur de la théorie mathématique de la communication, produisit une démonstration mathématique de l'existence d'une isomorphie

écrits grâce à lui peut être plus important. La complexité de la mise en œuvre d'un langage varie donc en raison inverse de la vitesse d'exécution machine des programmes qui sont écrits avec ce dernier (le langage machine est bien évidemment le plus rapide de tous les langages mais extrêmement rares sont les individus rompus à son emploi, l'assembleur est également rapide, mais il demeure tout de même assez complexe à apprendre et à utiliser, le C++ est nettement plus accessible, mais les programmes qui sont écrits avec nécessitent plus de temps pour être exécutés en machine...). Tous ces langages, et par voie de conséquence tous les programmes qui peuvent effectivement être écrits au moyen de ces derniers, sont, *mutatis mutandis*, précisément exprimables ou traduisibles les uns dans les autres. En définitive, lorsqu'ils sont entrés en machine, tous les programmes informatiques font nécessairement l'objet d'une traduction en langage machine (des programmes spéciaux résidant en machine, appelés interpréteurs ou compilateurs, se chargent automatiquement et de manière transparente pour l'utilisateur de ces opérations de traduction absolument nécessaires pour qu'un quelconque programme P écrit dans un quelconque langage L puisse être au final «compris» et exécuté par un ordinateur).

²⁰⁴ Nous pourrions également citer ici les codes B.C.D. (*Binary Coded Decimal*), UNICODE et ISO/IEC 10646. Tous ces codes permettent de coder en machine les caractères alphanumériques courants (comme: a, b, c,..., z, A, B,..., Z, 0, 1,...9) ainsi que les caractères spéciaux (*, \$, %, ...). Avec le code B.C.D., les caractères sont codés sur 6 bits (soit $2^6=64$ valeurs effectivement disponibles pour le codage). A.S.C.I.I. effectue un codage sur 7 bits (ce qui donne $2^7=128$ valeurs); E.B.C.D.I.C. (*Extended Binary Coded Decimal Internal Code*) autorise un codage sur 8 bits ($2^8=256$ valeurs possibles); UNICODE permet un codage sur 16 bits ($2^{16}=65536$ valeurs différentes) tandis qu'ISO/IEC 10646 réalise ce codage sur 32 bits (soit $2^{32}=4294967296$ valeurs disponibles pour le codage). UNICODE et ISO/IEC 10646 datent tous deux du début des années 1990. Ils ont été spécifiquement conçus afin de permettre le codage de tous les caractères de toutes les langues du monde, chose qui était absolument inenvisageable avec des codages réalisés sur 7 ou 8 bits.

²⁰⁵ In [Johnson-Laird 1994], *op. cit.*, p. 35.

fonctionnelle entre expressions de l'algèbre booléenne et assemblages physiques reposant sur l'emploi de dispositifs – portes, interrupteurs - de commutation électrique (cette isomorphie valant également pour les circuits de commutation électroniques, c'est-à-dire les transistors). En fonction de cela, une expression de la logique booléenne étant donnée (à condition toutefois qu'elle corresponde à un problème mathématique exprimable sous forme algorithmique, c'est-à-dire qu'elle soit calculable et par là effectivement mécanisable), il est réellement possible d'en élaborer une représentation matérielle fidèle dont la complexion et le comportement sont précisément fonction de ceux de cette expression. Les différents composants élémentaires d'un tel montage, leur possible interfaçage, leurs divers états physiques respectifs variant avec le temps et l'évolution de l'ensemble correspondent alors strictement à ceux des termes constitutifs du corps de l'expression logique considérée et inversement. L'état terminal de l'automate ainsi réalisé, autrement dit sa sortie ou son résultat, concorde quant à lui exactement, et pourvu seulement qu'il ait été convenablement conçu, avec la valeur de vérité de cette expression booléenne (calculée au moyen des tables de vérité de la logique propositionnelle). Pour le dire autrement, il existe une isomorphie parfaite entre l'état qui caractérise précisément l'arrêt de la machine et cette valeur de vérité. De la même manière que Michel Tibon-Cornillot avait pu écrire dans un tout autre contexte que le code s'était fait chair, nous pourrions ainsi dire ici que la logique booléenne et ses multiples expressions ont trouvé dans la matière et la géométrie bi-modale des dispositifs de commutation et d'interruption un réceptacle physique qui en permet une représentation fidèle et efficiente, une sorte d'*analogon* tangible parfaitement fonctionnel qui autorise l'automatisation et donc l'accélération sécurisée de l'exécution de ses opérations. C'est en cette correspondance fondamentale que se tient en fait le lien absolument essentiel, voire fusionnel, qui unit si profondément numération ou logique binaire et calculateurs (du moins tous ceux qui faisaient ou font usage de dispositifs de commutation à deux états, c'est-à-dire la très grande majorité d'entre eux). Dire cela ne suffit néanmoins pas à rendre compte précisément de la manière dont sont ici si intimement articulés algèbre de Boole et commutateurs électriques ou électroniques, autrement dit, et du point de vue fonctionnel, opérateurs et fonctions de la logique booléenne et matérialité informatique fondamentale. La compréhension de ce rapport d'équivalence fonctionnelle, que nous nous proposons donc d'étudier maintenant, nous sera non seulement indispensable pour comprendre le fonctionnement des ordinateurs, mais, également, pour appréhender la question de la représentation informatique des nombres et des symboles, c'est-à-dire, finalement, celle du traitement du sens et de la forme par les machines.

1.3.3. De l'isomorphie entre les fonctions de l'algèbre booléenne et les dispositifs de commutation électromécaniques, électriques ou électroniques : lois de l'algèbre de Boole, opérateurs booléens, et circuits d'ordinateur.

Puisqu'elle permet de statuer, en calculant, sur la véracité ou la fausseté d'une proposition formalisée, la logique booléenne est une logique bivalente. C'est donc dire qu'elle prend exclusivement ses valeurs dans l'intervalle [vrai ; faux] ou, ce qui revient au même, dans l'ensemble binaire [1 ; 0] où la valeur 1 correspondra alors à « vrai » et la valeur 0 à « faux ». Fort bien connue, la logique booléenne comprend des lois (résumées dans le tableau n°4 présenté ci-dessous) et un certain nombre d'opérateurs binaires ou unaires dont les plus fondamentaux sur le plan informatique sont la conjonction (ET ou AND : terme produit), la disjonction (OU ou OR : terme somme) et la négation NON (ou NOT : opération de complémentation). Ces quelques fonctions booléennes relativement élémentaires, nous ne tarderons pas à examiner ceci de façon plus détaillée, jouent un rôle théorique et pratique absolument crucial dans le domaine de la construction des calculateurs numériques et tout particulièrement dans celui de l'élaboration de leurs circuits logiques combinatoires ou séquentiels. Les éléments individuels (c'est-à-dire les portes logiques élémentaires), constitutifs des multitudes de circuits logiques qui forment la couche physique dernière des ordinateurs (qu'ils relèvent architecturalement du modèle de Von Neumann ou de ceux, prometteurs, de l'approche connexionniste²⁰⁶) s'appuient donc, pour leur fonctionnement fondamental, sur les principes réglant le déploiement de la logique booléenne. En fait de s'appuyer sur cette espèce mathématique bivalente, nous pouvons même dire que de tels composants la matérialisent de façon fidèle.

²⁰⁶ Une très grande majorité de systèmes connexionnistes (dispositifs également connus sous le nom de «réseaux de neurones»), ne font en fait jamais l'objet d'une véritable réalisation matérielle. Essentiellement pour des motifs liés aux coûts de construction, la plupart d'entre eux existe donc sous forme de logiciels spéciaux plutôt que de machines physiques. Mais dans les deux cas, c'est-à-dire qu'il s'agisse de machines virtuelles (programmes) ou bien, mais plus exceptionnellement, de machines *ad hoc*, ils reposent toujours fondamentalement sur les principes de l'algèbre booléenne (de tels programmes sont en effet conçus et utilisés sur des ordinateurs à architecture Von Neumann tandis que les éléments fonctionnels premiers des prototypes de l'informatique connexionniste, qui sont en fait des systèmes multiprocesseurs massivement connectés, s'appuient aussi sur les lois du calcul binaire).

Tableau n°4 : théorèmes de l'algèbre de Boole.

Désignation	Forme conjonctive (produit logique)	Forme disjonctive (somme logique)
Théorème des constantes	$p \cdot 0 = 0$ $p \cdot 1 = p$	$p \vee 0 = p$ $p \vee 1 = 1$
Loi d'idempotence	$p \cdot p = p$	$p \vee p = p$
Loi de commutativité	$p \cdot q = q \cdot p$	$p \vee q = q \vee p$
Loi d'associativité	$(p \cdot q) \cdot r = p \cdot (q \cdot r)$	$(p \vee q) \vee r = p \vee (q \vee r)$
Loi de distribution	$p \vee (q \cdot r) = (p \vee q) \cdot (p \vee r)$	$p \cdot (q \vee r) = (p \cdot q) \vee (p \cdot r)$
Loi d'absorption	$p \cdot (p \vee q) = p$	$p \vee (p \cdot q) = p$
Théorèmes de De Morgan	$\sim (p \cdot q) = \sim p \vee \sim q$	$\sim (p \vee q) = \sim p \cdot \sim q$
Loi d'inversion (complémentation)	$(p \cdot \sim p) = 0$	$(p \vee \sim p) = 1$

Littéralement, et en deçà des multiples réalisations aussi diversifiées qu'indéniablement extraordinaires qu'autorise l'emploi de l'ordinateur dans la plupart des domaines de l'activité humaine, on retrouve toujours discrètement à l'œuvre les principes mathématiques de l'algèbre booléenne sous la forme de portes logiques élémentaires interconnectées. C'est en effet cette somme de moyens absolument désarmante de simplicité, cette dichotomie close sur elle-même et dépouillée à l'extrême, qui, silencieusement et dans tous les cas, sous-tend de manière systématique et incontournable la totalité de l'édifice informatique. Sourdemment porteuse d'une puissance et d'une richesse assourdissantes (ce pouvoir combinatoire, que, précisément, G.W. Leibniz avait fait plus qu'entrevoir), l'algèbre binaire est ainsi ce qui, *ad litteram*, constitue, entretient et alimente la mécanique subtile et rigoureuse de l'univers informatique et celle de toutes ses merveilleuses singularités, qu'elles soient logicielles ou matérielles. Les ordinateurs digitaux sont aujourd'hui des machines stupéfiantes de puissance qui bénéficient d'une architecture stratifiée étonnamment dense et complexe. Mais derrière toutes les prouesses et les merveilles dont ils sont capables, il y a toujours des programmes. Des programmes qui en droit peuvent se voir réduits à des suites numériques possiblement vertigineuses, mais toujours exclusivement composées de 1 et de 0. C'est une matérialité infinitésimale opérant de façon étonnamment subtile les principes de l'algèbre booléenne qui donc, en permanence, se tient voilée, dissimulée, derrière tous les

accomplissements du règne informatique, que ceux-ci soient les plus modestes ou les plus admirables. C'est elle qui, en raison dernière, constitue la condition même de possibilité de ces derniers. Il n'est donc pas de dissociation réellement envisageable entre ces deux dimensions tant elles se trouvent entrelacées, comme prises l'une dans l'autre. Que l'on choisisse de s'intéresser à la simulation ou à l'intelligence artificielle, à la création de mondes virtuels ou à la reconstitution de lieux et d'objets disparus ou irrémédiablement altérés, nous serons donc bien avisés de ne jamais oublier que toutes ces réalisations, sans exception, sont fondées sur la mise en œuvre technique originale de quelques principes mathématiques fort simples, fort modestes, qui ne font jamais appel qu'à deux valeurs élémentaires...

Nous allons à présent examiner comment, précisément, les lois de l'algèbre binaire ont pu se voir inscrites dans la matière. Cette étape représentera à coup sûr un temps décisif dans notre étude de l'ontologie de l'ordinateur digital (qu'il soit ou non électronique), puisque c'est la possibilité même de cette pénétration ou de cette in-formation d'une substance inerte par les principes de la logique binaire qui, fondamentalement, a autorisé la réalisation technique de ce dernier. C'est là en vérité un bien étrange mouvement de compénétration où l'on constate que, tour à tour, divers corps somme toute extrêmement ordinaires seront appelés à prêter leur extension et leurs qualités propres (e.g. la semi-conductivité) à un corpus de règles mathématiques aussi modestes qu'extraordinairement puissantes dans lesquelles Georges Boole, un siècle plus tôt, avait cru déceler les principes réglant le fonctionnement de la pensée humaine.

Il existe une classe de dispositifs techniques au comportement fonctionnel relativement élémentaire et que l'on nomme interrupteurs ou commutateurs. Nous connaissons et employons tous forcément et quotidiennement, sous une forme ou sous une autre, ces systèmes de commande rudimentaires. Les boutons poussoir ou les petites bascules plastifiées qui, à volonté, nous autorisent à éteindre ou à allumer une lampe et encore un poste de télévision ou un ordinateur constituent en fait pour nous la partie « émergée » de ces systèmes, celle-là même sur laquelle nous pouvons agir physiquement, musculairement, afin de déclencher un événement *ou* un autre en fonction de la configuration courante du système. D'une manière générale, la finalité fonctionnelle de tels agencements consiste à nous permettre de choisir entre deux états possibles et exclusifs l'un de l'autre d'un ensemble technique plus vaste qu'ils servent par conséquent à commander. Ainsi un interrupteur électrique, selon qu'il est effectivement actionné dans l'une ou l'autre des deux positions qu'il est seulement susceptible de prendre (e.g. enfoncé ou relâché, abaissé ou remonté), ouvre ou bien ferme le circuit électrique auquel il est précisément relié. Nous dirons donc qu'il sert à en

modifier l'état courant. Si, en entrant dans une pièce obscure, nous appuyons sur un interrupteur électrique, la dite pièce cessera presque instantanément d'être plongée dans les ténèbres. En fait, lorsque nous avons appuyé sur l'organe déclencheur de cet appareil, nous avons, à distance, refermé un circuit électrique, débloquant ainsi un flux d'électrons jusqu'alors empêché qui, maintenant qu'il circule librement dans les méandres du circuit électrique, viendra exciter les filaments de tungstène des ampoules du plafonnier. Si nous effectuons l'opération inverse, c'est-à-dire si nous ramenons l'interrupteur dans la position dans laquelle nous l'avons trouvé en entrant dans la pièce, nous restaurerons la configuration initiale du circuit : il se trouvera à nouveau en position ouverte et la lumière cessera par conséquent d'être produite. Finalement, force nous est faite de constater, au moins dans un premier temps, qu'il est très peu de différences fondamentales entre les circuits électriques qui nous permettent d'éclairer nos lieux d'habitation et ceux des ordinateurs. Alors certes, les technologies et la physique effectivement convoquées et mises en œuvre dans l'un et l'autre domaine diffèrent considérablement puisque dans un cas nous nous situons de fait dans l'ordre macroscopique tandis que dans l'autre, c'est du microscopique dont il s'agit, tout du moins aujourd'hui. De la même manière, si d'un côté il est principalement question d'activer ou de désactiver quasi instantanément divers types d'appareils en les approvisionnant en énergie ou au contraire en faisant cesser cet approvisionnement, de l'autre, les enjeux fonctionnels qui peuvent immédiatement être décelés relèvent foncièrement des sphères mêlées du calcul, de la représentation, de la transformation et du stockage d'informations. Au delà de ces dissimilitudes considérables qui bien entendu ne sauraient être passées sous silence, une chose demeure, absolument invariable : un circuit électrique ne peut posséder, en tout et pour tout, que deux états de stabilité, et deux états uniquement. Ou bien le flux électronique passe, et le circuit est dit fermé, ou bien il ne passe pas et il est alors dit ouvert. Quoiqu'il en soit effectivement, il n'est pas là de place imaginable pour une quelconque situation - ou état d'équilibre - intermédiaires. Nous sommes donc ici en présence d'un univers ou d'un micro-univers dont l'intégralité des possibles est absolument et définitivement limitée à une simple paire (binaire) de configurations, dont une seule, et une seule uniquement, est susceptible d'être activée ou actualisée à un quelconque instant t . On pressent à partir de ce point que se profile, il est vrai d'une manière encore fort imprécise, un lien de parenté étroit entre circuits électriques et/ou électroniques et algèbre booléenne, laquelle, rappelons-le encore, ne connaît en tout et pour tout que deux valeurs numériques: le 1 et le 0. Remarquons également que dans un circuit, ou dans un microcircuit intégré, la bascule d'un état à l'autre ne saurait s'opérer gratuitement, comme par magie. A l'origine

d'une telle permutation – qui, n'omettons pas de le préciser, est réversible - il est toujours un acte instaurateur de changement, une entrée radicalement modificatrice pour le système en cela que lorsqu'elle est effectivement actualisée, elle conduit nécessairement à la réalisation de la sélection exclusive de l'un de ses deux états possibles. Dans le cas d'un circuit électrique conventionnel, comme par exemple celui qui se dérobe dans les murs d'une pièce et permet d'en alimenter la suspension, l'entrée, l'action déterminante pour l'état courant de cet ensemble est, au moins en raison dernière, l'acte physique que nous effectuons précisément en appuyant sur le bouton de l'interrupteur²⁰⁷ (même si avant cela, et bien évidemment, divers facteurs de motivation relevant principalement de l'ordre volontaire sont sans nul doute possible susceptibles d'être retracés chez l'opérateur). Notons que dans ce cas précis, le répertoire de choix disponibles (déjà réduit dans l'absolu à une alternative unique), ne comporte plus qu'une seule option : si le circuit est ouvert, nous ne pouvons que le fermer, s'il est fermé, nous ne pouvons que l'ouvrir (à moins bien sûr que nous ne décidions de le maintenir dans son état courant). D'une certaine façon, l'état courant du système détermine donc son état futur. Dans la très grande majorité des cas, les circuits intégrés de nos ordinateurs n'obéissent pas à ce schéma spécifique : l'entrée ou les entrées des microcircuits électroniques, autrement dit la ou les configurations qui permettront de modifier, ou non, l'état courant de ces derniers, seront le plus souvent constituées par l'état final des microcircuits qui sont situés en amont de ceux-là et qui leur sont connectés. La sortie, c'est-à-dire le résultat des uns, représentera donc l'entrée des autres, les amenant ainsi, éventuellement et selon le cas, à modifier en conséquence leur état interne et à produire un nouveau résultat (notons qu'il est cependant un ensemble de circuits, dont les objets sont communément désignés sous l'appellation de circuits séquentiels ou circuits à mémoire, dont *« la fonction de sortie dépend non seulement de l'état des variables d'entrée mais également de l'état antérieur de certaines variables de sortie »*²⁰⁸). Dans ce cas de figure aussi, au moins partiellement, l'état courant du dispositif influera par conséquent sur son état suivant). Si un circuit ou un microcircuit électronique ne comporte qu'une seule entrée, il ne pourra avoir que 2¹ états. Dans ce cas, et très simplement, le courant (dans les faits il s'agit d'un signal de

²⁰⁷ Les circuits électriques qui peuplent notre quotidien voient le plus souvent leur état courant modifié par une entrée qui n'est rien d'autre qu'une force physique somme toute assez «triviale», en l'occurrence celle, corporelle, qui est transmise à l'interrupteur par une action orientée de la main. Mais en principe, rien ne s'oppose à ce que de tels dispositifs soient modifiés pour répondre à une entrée qui serait de nature électromagnétique (et ce quelle que soit la longueur d'onde utilisée). En fait, ces systèmes, qui relèvent du domaine de la domotique, existent déjà, exploitant principalement les technologies de l'infrarouge. Le fait qu'ils puissent être ainsi commandés par l'entremise d'un rayonnement rapproche plus encore leur fonctionnement de celui des circuits intégrés.

²⁰⁸ In [Tanenbaum 2001], p. 129.

faible voltage) passera ou bien ne passera pas (on reconnaîtra là un simple interrupteur). Si maintenant nous imaginons un microcircuit un peu plus complexe et que, pour ce faire, nous portons à deux le nombre de ses entrées, 2^2 combinaisons seront alors possibles²⁰⁹ : en fonction de l'état électrique actuel de ses lignes afférentes, le courant passera sur les deux lignes du microcircuit, passera sur l'une et non sur l'autre et inversement, ou bien encore ne passera pas du tout. Similairement, un microcircuit comportant 3 entrées pourra posséder 2^3 états possibles. S'il en comporte 4, il pourra en avoir 2^4 et, de façon générale, s'il accepte n entrées, il pourra adopter 2^n états. Les différentes combinaisons pouvant être constituées par les états électriques respectifs de ces entrées, et ce quel que soit leur nombre, détermineront pour finir l'état terminal – la résultante – de ce microcircuit : sur la ou les lignes efférentes (si on a par exemple affaire à un circuit codeur), le courant passera ou ne passera. Quant à cette sortie, ou *output* (représentée dans les circuits d'ordinateur par la présence ou l'absence d'un signal électrique de faible voltage), elle pourra éventuellement être utilisée comme entrée pour un autre microcircuit, que celui-ci diffère ou non en genre par rapport au circuit dont elle est issue.

C'est donc là tout un ordre, à la fois combinatoire et fonctionnel, qui se déploie, s'élabore, et se concrétise littéralement: diverses configurations autorisées d'*input*, vecteurs ou non de signaux électriques, induiront, ou pas, en passant dans un circuit à la géométrie précisément fixée, la génération d'un signal électrique qui constituera alors l'*output* de ce circuit. Ce dernier pourra, le cas échéant et en fonction de l'opération qu'il réalise, être transmis ou « injecté » comme *input* dans un circuit subséquent, et ce jusqu'à obtention de la solution recherchée. Voici quelque chose qui, d'une façon générale, ne sera pas sans nous rappeler le comportement de certains des opérateurs de la logique booléenne et de leurs tables de vérité. La précédente assertion s'éclairera plus sûrement si, au lieu d'employer le terme « opérateur », nous utilisons désormais celui de « fonction ». Cette substitution terminologique, bien sûr, ne modifie en rien la nature véritable des opérateurs que nous considérons ici. Ce n'est là simplement qu'une façon alternative de désigner un même type d'objets. En cela, elle n'a pour unique finalité que de nous permettre de progresser peut-être plus aisément sur la voie de la compréhension de l'isomorphie fonctionnelle existant entre certains montages électriques ou électroniques et les opérateurs de l'algèbre booléenne. Fondamentalement ces

²⁰⁹ De manière générale, et pour une fonction n -aire, on aura une table de vérité comportant 2^n lignes (soit un nombre de lignes équivalent au nombre d'états d'entrée). Comme ces entrées ne peuvent prendre que deux valeurs, 1 ou 0, ceci donne un total de 2^{2^n} fonctions possibles. Si $n = 2$, on a donc une table avec 2^2 lignes et 2^{2^2} fonctions possibles, ce qui, précisément, correspond au nombre d'opérateurs binaires (16) de la logique booléenne.

derniers, par exemple le « . » ou le « v », ne sont ni plus ni moins que des fonctions mathématiques. Ces fonctions, d'une façon générale, ont pour propriétés distinctives essentielles d'admettre à titre d'arguments un certain nombre de variables (deux pour la conjonction et la disjonction), sur lesquelles elles opèrent ensuite un type spécifique de transformation. La valeur obtenue à l'issue d'une telle transformation, qui dépend seulement de la valeur binaire de ces variables, constituera le résultat de ces fonctions. En algèbre booléenne, ces variables, nous l'avons à plusieurs reprises déjà mentionné, prennent leurs valeurs propres dans un intervalle fini qui ne comprend que deux individus, le 1 et le 0. De la même manière, et puisqu'il est uniquement déterminé par l'état binaire de ses variables, le résultat d'une fonction ne pourra être égal qu'à la valeur 1 *ou* à la valeur 0. D'une manière générale nous dirons donc qu'une fonction booléenne est une fonction mathématique qui projette les n -tuples de ses entrées logiques sur les valeurs 1 et 0, soit : $f\{1,0\}^n \rightarrow \{1,0\}$. Décidons maintenant de nommer chacune de ces variables « entrée ou *input* de la fonction », et ce résultat « sortie ou *output* de la fonction ». Accordons-nous également sur les propositions suivantes: si le résultat d'une fonction booléenne est 1, nous dirons alors que sa valeur est « VRAI ». S'il équivaut à 0, nous dirons que cette valeur est égale à « FAUX ». Pareillement, et pour les circuits électriques ou électroniques, nous dirons que s'il y a effectivement présence d'un courant sur la ligne de sortie d'un circuit, celle-ci aura pour valeur « VRAI ». Dans le cas contraire, qui correspond donc à un défaut de courant en sortie de circuit, nous dirons que la valeur équivalente à cette absence sera « FAUX » (l'être – la présence d'un courant – sera par conséquent assimilé ici à la véracité tandis le non-être – l'absence de courant – sera associé à la fausseté). Si l'on consent à nous accorder les quelques éléments qui précèdent, alors on se trouvera sûrement en mesure d'apercevoir que circuits électriques ou électroniques et fonctions booléennes peuvent être globalement décrits, au moins jusqu'à un certain point, en usant d'un même lexique commun dont les termes sont interchangeable. Les arguments d'une fonction mathématique et les entrées (ou *inputs*) d'un circuit renvoient ainsi à une même notion : l'idée d'un individu (ici numérique ou électromagnétique), qui entre, littéralement, dans un système de nature formelle ou matérielle pour y être, éventuellement, transformé. Identiquement, le résultat d'une fonction et la sortie (*output*) d'un circuit correspondent à une même chose : en l'occurrence il s'agit du produit d'une telle transformation. Nous pourrions être tentés, à ce point de notre entreprise, de nous aventurer à dérouler cette comparaison pour le moins opportune en allant jusqu'à affirmer que, finalement, tous les montages de ce type et toutes les fonctions booléennes correspondent d'un point de vue fonctionnel et selon une modalité bijective, les uns aux autres. Ceci est faux.

En fait, seule une classe ne comprenant que certains de ces dispositifs (fort nombreux au demeurant), correspond à la classe générique englobant ces fonctions. En sont exclus les circuits qui réalisent des fonctions correspondant à des problèmes mathématiques qui ne sont pas calculables, autrement dit des problèmes qui ne sont pas susceptibles de faire l'objet d'un traitement algorithmique (et qui par conséquent ne peuvent être traitées mécaniquement). C'est en 1938, et dans un travail intitulé « *A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits*²¹⁰ » que Claude Shannon, le premier, a démontré qu'il existait effectivement un isomorphisme entre ces individus logiques (et les constructions formelles dont ils autorisent la construction), et certains de ces montages physiques, autrement dit qu'il était possible de modéliser des circuits électriques au moyen de l'algèbre booléenne. Ainsi que le rappelle Jean-Pierre Dupuy, avant C. Shannon, des modèles mathématiques des circuits électriques avaient été effectivement élaborés, (comme du reste l'avaient été des modèles mathématiques du système nerveux), mais il aura fallu tout le génie de ce dernier (et ceux de W. McCulloch et W. Pitts en ce qui concerne la modélisation du neurone), pour comprendre que : «... *la modélisation pertinente [de ces circuits] était en fait de type logique ... et, qu'inversement ces systèmes matériels pouvaient se représenter comme réalisant, voire incarnant la logique, cette forme supérieur de la pensée.*²¹¹ ».

Comme le laisse clairement entendre l'intitulé de ce travail de recherche, une telle analogie fonctionnelle entre logique booléenne et circuits électriques, un tel isomorphisme, furent initialement démontrés par Shannon pour ceux d'entre eux, à vrai dire alors la très grande majorité, qui reposaient sur l'emploi de la technologie des relais et des bascules²¹². Toutefois, et dans l'absolu, c'est-à-dire quel que soit le *substratum* technologique autorisant la

²¹⁰ Claude E. Shannon, « *A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits* », *Trans. Amer. IEEE*, 57, 1938.

²¹¹ In [Dupuy, 1999], p. 22.

²¹² A cette époque, c'est-à-dire avant guerre, il est nécessaire de préciser que l'accès aux nouvelles techniques électroniques (connues alors sous la forme des *vacuum tubes*), n'étaient pas permis à tous les constructeurs de calculateurs pour d'évidentes raisons de coûts et de disponibilité (ceci étant tout particulièrement vrai en ce qui concerne l'Europe et le Japon). Pourtant c'est au cours de cette même période que furent élaborées ces formidables machines que Michael R. Williams n'a pas hésité à baptiser, si justement, *the Mechanical Monsters*. Pour illustrer cela, nous mentionnerons rapidement le calculateur Z3, (héritier à bien des égards de ses prédécesseurs, les modèles Z1 et Z2), une machine construite par l'allemand Konrad Zuse entre 1939 et 1941, et qui reposait intégralement sur la technologie des relais (1400 relais furent requis pour la construction de la mémoire et 600 pour l'unité arithmétique). Contemporain du Z3, on peut également citer le *Complex Number Calculator*, un calculateur conçu par le mathématicien américain George Stibitz, des *Bell Laboratories*. Plus « modeste » que le Z3 allemand, il faisait néanmoins appel à 450 relais téléphoniques ordinaires et dix modules à bascules (*crossbar switches*), du type de ceux qui pouvaient autrefois être trouvés dans les standards téléphoniques. On pourrait également songer ici à l'Harvard Mark I (1939-1943), de l'américain Howard Aiken (lui aussi mathématicien). Considérés dans leur ensemble, les modules internes de cette machine ne comprenaient pas moins de 750000 éléments différents parmi lesquels on trouvait en majorité des bascules binaires, des relais, des bascules à dix positions, des roues (qui constituaient les registres de la machine), ou encore de simples cames (utilisées pour la transmission des signaux de timing).

fabrication de ces derniers, les principes dégagés ici par le mathématicien américain demeurent universellement valides: *i.e.*, un circuit spécifique participant de cette espèce et exclusivement constitué de relais téléphoniques pourra toujours, *mutatis mutandis*, être reconstruit en utilisant cette fois des composants tels que des tubes à vide ou encore des éléments transistorisés (qu'il s'agisse indifféremment de corps semi-conducteurs à base de germanium ou de silicium). Dire cela revient à affirmer que c'est ici la structure, la forme logique, qui de façon sous-jacente détermine le tracé ou le dessin du circuit ou du microcircuit qui importe fondamentalement et non pas le genre matériel dans lequel celui-ci, accidentellement, se trouve réalisé à une époque ou une autre. Mais cette remarquable correspondance ne s'arrête pas là. Comme l'a très justement noté D. Parrochia : « ... *on peut toujours associer à une expression booléenne, aussi complexe qu'elle soit, un montage physique particulier comportant des portes ou interrupteurs dont les positions ou états concrets matériels correspondent bijectivement aux différents aspects de l'expression, et dont l'état de sortie est isomorphe à la valeur de vérité de l'expression*²¹³. ».

Toute expression ou toute classe d'expressions équivalentes de la logique booléenne, à condition bien entendu qu'elles soient des expressions bien formées de ce système et qu'elles correspondent à un problème calculable, pourront donc être directement appariées à un assemblage électrique *ad hoc* parfaitement opérant dont le comportement des éléments et l'état de sortie, c'est-à-dire l'*output*, refléteront fidèlement et dynamiquement non seulement leurs caractéristiques constitutives, leur agencement propre, mais également, et enfin, leur valeur de vérité (éventuellement commune). C'est alors, pour reprendre à notre compte une métaphore que nous croyons chère non seulement à Gérard Chazal mais aussi à Philippe Breton, un véritable « jeu de miroirs » et d'interpénétration qui s'instaure entre ces deux ordres, la pure logique et la matière inerte ; un jeu qui vient les articuler l'une à l'autre en les liant mutuellement d'une manière étonnamment profonde mais non pas obscure. Nous l'avons déjà dit, à une expression correcte et calculable de la logique booléenne, aussi composée fut-elle, correspondra toujours un montage électrique (ou électromécanique, ou électronique), qui en reflètera la forme, la complexité et l'entière économie arithmétique. Sur ces surfaces concrètes et nécessairement limitées en extension, c'est donc tout l'édifice de l'algèbre booléenne qui, pièce à pièce, fragment par fragment, viendra s'inscrire ou diffuser en se cristallisant dans des réticularités combinées de façon parfois étonnamment alambiquée. C'est en fait la structure même de l'expression logique considérée, sa configuration formelle propre,

²¹³ In [Parrochia, 1992], p. 120.

qui détermineront très précisément l'organisation mutuelle et spécifique des différents composants du circuit qui l'instancie (le cycle permettant effectivement le portage de telles formules logiques vers un substrat matériel comprend, en amont de la réalisation physique proprement dite, la médiation de circuits logiques. Nous ne tarderons pas à examiner le rôle essentiel que remplissent ces derniers). On pourra donc dire de ce dernier, ou, plus exactement, de la figure « géométrique » composée par les éléments de celui-ci et les interrelations qui les unissent, qu'elle *représente* fidèlement cette expression. Cependant le mode d'être d'une telle représentation ne saurait être complètement confondu avec celui d'un simple reflet. Elle ne constitue pas une image neutre ou purement passive de son objet comme ce pourrait être le cas, par exemple et toutes considérations esthétiques mises à part, de celui d'un tableau figurant un paysage. Il s'agit là en effet de représentations concrètes, opérantes et optimisées des expressions de la logique booléenne dont la faisabilité matérielle et l'efficacité impliquent nécessairement que ces dernières, qui en déterminent intégralement les motifs respectifs, peuvent être traitées d'une manière entièrement mécanique (pourvu, toujours, qu'elles soient calculables). Les propositions de l'algèbre binaire, en investissant de la sorte l'ordre matériel, en ordonnent donc rigoureusement, et cela selon leurs propres aspects formels, leur propre structure mathématique, la configuration. On comprendra alors qu'un circuit de ce genre n'est rien d'autre qu'une petite machine dont les pièces constitutives et leur disposition mutuelle expriment en la réalisant matériellement une formule ou une classe de formules logiques équivalentes. Ces deux entités distinctes, dont l'une est formelle et l'autre est physique, sont ainsi une seule et même chose, une seule et même forme mathématique, laquelle se trouve ainsi exprimée de deux manières qui diffèrent radicalement en nature tout en demeurant cependant parfaitement isomorphes du point de vue fonctionnel. Ceci signifie par conséquent que si l'on se dote à titre expérimental d'une quelconque expression bien formée de la logique booléenne et du montage qui la représente physiquement, le calcul de la valeur de vérité de cette expression produira un résultat qui sera équivalent à l'état de sortie de ce circuit. Dans l'une et l'autre de ces deux situations dont nous conviendrons qu'elles sont, au moins en apparence, fort hétérogènes, c'est bien toujours à un même calcul auquel nous avons affaire. Ce sont seulement les modalités dont nous usons afin de le représenter tour à tour qui diffèrent ici foncièrement. Que nous choissions d'effectuer nous-mêmes ce calcul ou que nous préférions le confier à une machine importe finalement assez peu : le résultat sera le même (dans un cas, nous l'obtiendrons sous la forme d'un numéral binaire, dans l'autre, sous celle de la présence ou de l'absence d'un signal électrique qui nécessitera ensuite un codage adéquat afin que nous puissions l'interpréter).

Nous venons de voir qu'il existait un rapport d'isomorphie entre les circuits électriques et le calcul binaire. C'est l'existence même de cette relation qui a rendu possible celle des ordinateurs digitaux électromécaniques ou électroniques. Toutes ces machines, sans exception aucune, font en effet appel pour le fonctionnement de leur couche matérielle ultime à des circuits extrêmement élémentaires dont le comportement fonctionnel est descriptible ou analysable dans les termes de l'algèbre booléenne. Inversement, une quelconque expression de cette algèbre étant donnée, on pourra, selon un *modus operandi* fixé, synthétiser à partir de cette dernière un circuit qui lui correspondra. Mais alors comment, concrètement, cela est-il réalisé ? Comment la logique, pour le formuler autrement, peut-elle ainsi se faire machine ? Réciproquement, comment est-il possible que la machine, prise dans la pesanteur de sa propre matérialité, puisse ainsi se faire « artéfact logique » ? Qui plus est artéfact capable non seulement de manipuler, de stocker et de transformer des données numériques, ce qui, à la limite, serait peut-être un peu moins étonnant, mais aussi d'effectuer les mêmes opérations sur du son, du texte ou encore de l'image ? Répondre à ces questions, autrement dit parfaire notre compréhension de ce qu'est un *vraiment* un ordinateur, implique que nous procédions maintenant à l'étude de la manière dont ses circuits de base réalisent littéralement les fonctions de l'algèbre de Boole.

1.3.4. Eléments fondamentaux des calculateurs digitaux : logique bivalente, portes logiques, circuits logiques et circuits matériels.

Les circuits élémentaires qui constituent la couche physique matérielle d'un calculateur digital à mémoire interne sont communément appelés des « portes logiques ». Par porte logique, il faut entendre un dispositif technique (considéré ici seulement des points de vue générique et logique, c'est-à-dire sans être spécifié en genre matériel), ne possédant que deux états d'équilibre ou de stabilité: soit 0 et 1. Le comportement d'un circuit logique est donc binaire. Etant donné que ces circuits peuvent être de type électromécanique, électrique ou électronique, ils sont de toute façon caractérisés par deux niveaux de tension (la présence ou l'absence d'un courant), définissant chacun un signal logique (respectivement 1 et 0). Une porte logique peut par ailleurs comporter une ou plusieurs lignes afférentes (appelées entrées ou *inputs*). En revanche, elle ne comportera qu'une seule ligne efférente (nommée sortie ou *output*). La fonction de ces lignes est de transporter, d'un point à un autre et toujours sous la forme d'un courant électrique, un signal logique. Ce signal (présence ou absence d'un courant

/ 1 ou 0), correspond alors à l'état de la ligne considérée. Nous ne nous intéresserons ici que de manière incidente aux réalisations électromécanique, électrique ou électronique de tels dispositifs pour ne nous concentrer essentiellement que sur leurs aspects logiques. Comme ces montages réalisent, selon leurs caractéristiques matérielles spécifiques, une quelconque fonction logique f , nous pouvons donc, tout au moins dans un premier temps, nous permettre ainsi de négliger la matière dans laquelle celle-ci se trouve « prise » accidentellement et n'étudier précisément que la dimension logique de cette réalisation. Plutôt que de parler de circuits électromécaniques, électriques ou électroniques, on parlera alors de circuits logiques ou virtuels, lesquels pourront être par la suite concrétisés en usant spécifiquement de l'une ou l'autre de ces différentes technologies.

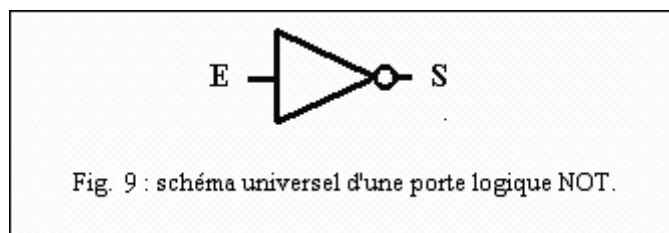
On distinguera d'abord deux types fondamentaux de circuits (où l'on pourra cependant retrouver mis en oeuvre différents genres de portes logiques) : les circuits dits « combinatoires » et les circuits dits « séquentiels ». Dans les deux cas, ces circuits réalisent une fonction mathématique (il peut d'ailleurs s'agir d'une seule et même fonction). De ce point de vue, donc, ils ne diffèrent pas les uns des autres. Les circuits de type combinatoire peuvent néanmoins être particularisés par rapport aux circuits séquentiels en ceci qu'ils sont considérés, à l'inverse de ces derniers, comme des circuits idéalisés : *i.e.*, le temps de propagation du signal ou des signaux qui entrent et sont traités dans le circuit n'est jamais pris en considération ici. Le signal recueilli en sortie d'un circuit combinatoire dépend donc des signaux d'entrée et de ceux-là seulement. Les circuits séquentiels, quant à eux, ne sont pas des circuits « idéaux ». Ceci signifie que non seulement est pris en compte ici le temps de propagation des signaux dans le circuit mais qu'en plus de cela, est pris également en considération ce que nous nommerons la « mémoire » du circuit, c'est-à-dire son état antérieur. En conséquence, le signal de sortie d'un circuit séquentiel dépend non seulement des signaux reçus en entrée et de leur temps de propagation dans ce circuit, mais également des signaux d'entrée reçus antérieurement. Puisque, entre autres choses énumérées, la sortie d'un tel circuit est déterminée par l'état de ses entrées antécédentes, il est donc permis de dire que d'une certaine façon, il possède une « mémoire ».

Avant d'étudier de manière circonstanciée le fonctionnement de ces circuits (qui constituent les deux types fondamentaux de circuits que l'on trouve dans les ordinateurs), ainsi que la relation particulière qu'ils entretiennent à l'algèbre de Boole, il nous est nécessaire de considérer, toujours d'un point de vue logique, les éléments fondamentaux dont ils sont composés, à savoir les différentes sortes de portes logiques existantes. Chacune d'entre elles peut, à l'instar des opérateurs de l'algèbre booléenne auxquelles elles

correspondent, être représentée d'une manière symbolique (cette représentation graphique autorisera par la suite la conception de logigrammes, c'est-à-dire de schémas graphiques représentant des circuits logiques, diagrammes à partir desquels il sera ensuite possible de construire des circuits concrets). On distinguera dans un premier temps quatre portes logiques, lesquelles sont absolument fondamentales en informatique. Il s'agit des portes NOT (porte NON), AND (porte ET), OR (porte OU) et XOR (porte du ou exclusif ou *eXclusive* OR). A chacune de ces portes est associé un comportement logique (décrit au moyen d'une table de vérité), qui correspondra très exactement, lorsqu'elles se trouveront ensuite instanciées dans la matière, à un comportement électromécanique, électrique ou électronique.

Le symbolisme communément employé pour schématiser ces quatre portes est le suivant :

1) Porte NOT :



La porte logique NOT ne comporte qu'une seule entrée et qu'une sortie, lesquelles sont respectivement notées E (pour Entrée) et S (pour Sortie). A ce schéma est associée une table de vérité :

Table de vérité de la porte logique NOT :

E	S
1	0
0	1

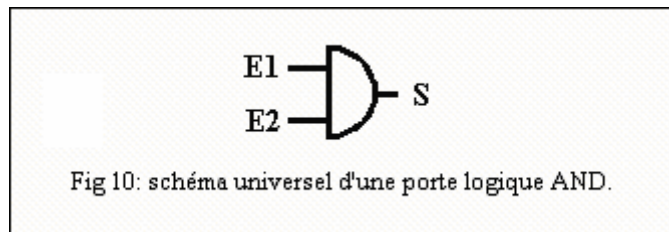
Table de vérité de l'opérateur booléen de négation:

p	$\sim p$
1	0

0	1
---	---

Si l'entrée E de la porte NOT est à 1 alors sa sortie S sera mise à 0 tandis que si E est à 0 alors S sera mise à 1. Indiquons que la porte logique NOT est parfois également appelée « inverseur » puisque la fonction qu'elle réalise est précisément cela : une inversion. Autrement dit, si on a p en E, on aura systématiquement $\sim p$ en S. Inversement, si on a $\sim p$ en E, alors on aura toujours p en S. Au niveau matériel, ceci se traduira par le fait que si l'on a un courant en E, alors on n'en aura pas en S et inversement. On ne manquera pas alors de rapprocher la table de vérité décrivant le comportement logique/électrique de la porte NOT de celle de l'opérateur booléen de négation (« \sim ») : un rapide examen suffira à nous apprendre qu'elles sont identiques. La porte logique NOT est donc isomorphe à l'opérateur unaire de négation de l'algèbre de Boole. De la même façon, et bien entendu, un circuit concret réalisant matériellement la fonction d'inversion NOT sera isomorphe à la fonction de négation de l'algèbre booléenne (symbolisée par les signes « \sim » ou « \neg »).

2) Porte AND :



La porte AND, comme on peut le voir sur la figure 9, possède deux entrées notées E1 et E2. Comme la porte NOT, elle ne possède toutefois qu'une seule sortie toujours représentée par le symbole S. Puisqu'elle possède deux lignes d'entrées, cette porte est binaire. Sa table de vérité comportera donc 2^2 lignes :

Table de vérité de la porte logique AND :

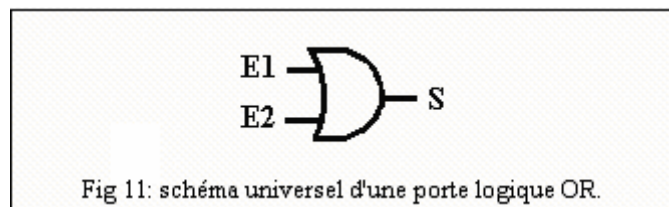
E1	E2	S
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Table de vérité de l'opérateur booléen de conjonction:

p	q	$p \cdot q$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

On peut décrire le comportement logique (et donc électrique) de la porte AND de la manière suivante : si en E1 et en E2, on a un signal d'entrée de valeur 1 (ou, ce qui est équivalent au niveau matériel, la présence d'un courant), alors la sortie S est mise à 1 (présence d'un courant). Dans toutes les autres configurations restantes, la sortie S vaut 0 (soit une absence de courant). On reconnaîtra ici l'équivalence de la table de vérité de la porte OR avec celle de la table de vérité de l'opérateur de conjonction (« . » ou « \wedge »), de la logique de Boole.

3) Porte OR :



Comme la porte logique AND, la porte OR est binaire. Elle comporte deux entrées, E1 et E2, et une sortie, S. A la porte OR est associée la table de vérité suivante :

Table de vérité de la porte logique OR :

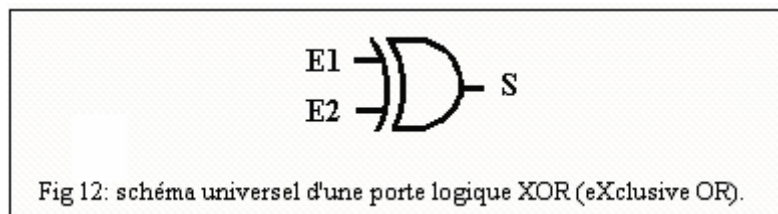
E1	E2	S
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Table de vérité de l'opérateur booléen de disjonction inclusive:

p	q	$p \vee q$
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

L'interprétation de sa table de vérité nous permet de comprendre le fonctionnement spécifique de cette porte. Dans l'hypothèse où l'état logique des lignes afférentes E1 et E2 est 0, alors la sortie S est mise à 0. A l'exception de cette configuration particulière, c'est-à-dire quelles que soient par ailleurs les valeurs respectives que peuvent prendre simultanément les entrées E1 et E2, l'état de la sortie S du circuit est toujours 1. La table de vérité de la porte logique OR est par conséquent isomorphe à celle de l'opérateur booléen de disjonction inclusive (« \vee »).

4) Porte XOR :



La porte XOR possède deux entrées et une sortie (respectivement E1,E2 et S). On lui associe la table suivante :

Table de vérité de la porte logique OR :

E1	E2	S
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

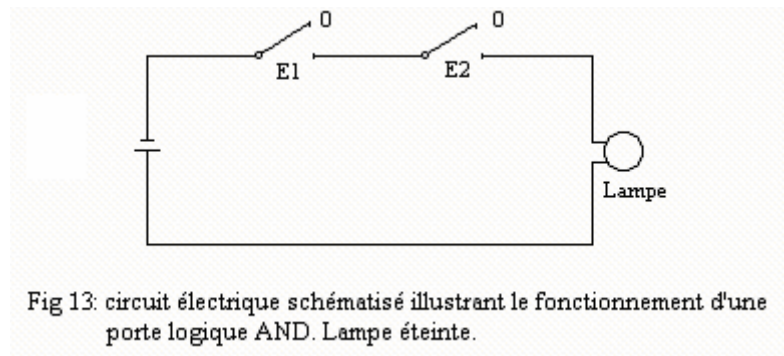
Table de vérité de l'opérateur de disjonction exclusive :

p	q	$p \vee q$
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

La porte XOR fonctionne comme suit : si l'état logique des entrées E1 et E2 est conjointement mis à 1 ou à 0 (absence ou présence d'un courant sur les deux lignes afférentes), alors l'état logique de la sortie S est 0 (absence de courant). Les deux autres combinaisons ont pour résultat la mise à 1 de S (présence d'un courant en sortie de circuit).

Au moyen de schématisations simplifiées des circuits électriques correspondant aux portes logiques AND, OR et XOR, nous pourrons plus aisément visualiser la façon dont celles-ci, concrètement, fonctionnent :

1) Porte AND :



E1	E2	S (lampe)
0	0	0

Ce circuit possède deux bascules notées E1 et E2 qui correspondent respectivement aux entrées E1 et E2 de la porte logique AND. La sortie S est ici représentée par une petite lampe. Sur la figure 12, le circuit est ouvert. Les deux entrées possèdent la valeur 0, autrement

dit, dans l'un et l'autre cas, les bascules sont en position haute et le courant ne circule pas. La sortie a donc la valeur 0 et la lampe est éteinte.

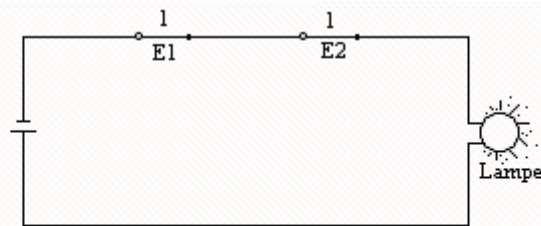


Fig 14: circuit électrique schématisé illustrant le fonctionnement d'une porte logique AND. Lampe allumée.

E1	E2	S (lampe)
1	1	1

Sur la figure 14, les deux bascules E1 et E2 possèdent la valeur 1 ; elles sont en position basse. Etant donné que le courant passe sur le circuit, la sortie S possède la valeur 1. La lampe (représentant cette sortie), est par conséquent allumée.

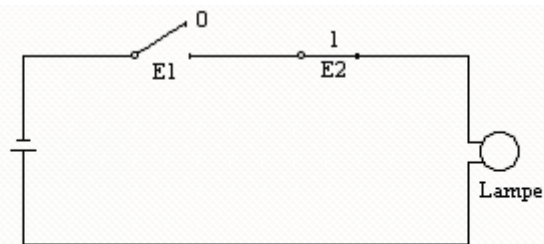


Fig 15: circuit électrique schématisé illustrant le fonctionnement d'une porte logique AND. Lampe éteinte.

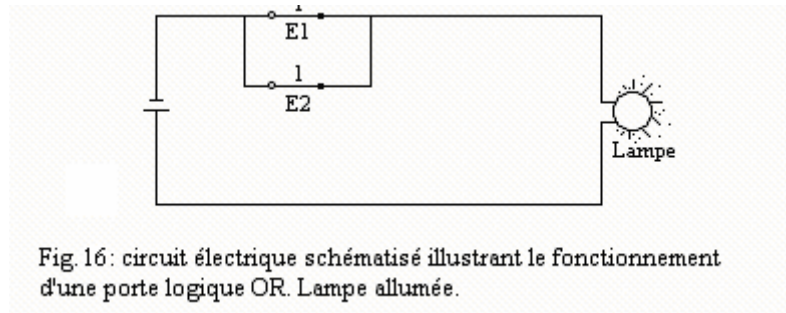
E1	E2	S (lampe)
0	1	0

La figure 15 illustre un circuit AND où la bascule E1 a la valeur 0 et la bascule E2 a la valeur 1 (E1 est alors en position haute et E2 en position basse). Etant donnée cette configuration singulière, le circuit est ouvert et le courant ne peut pas passer (pour que ce soit effectivement le cas, et comme nous venons de le voir ci-dessus, il faudrait que les entrées E1 et E2 possèdent simultanément la valeur 1, c'est-à-dire qu'elles soient toutes deux en position basse en même temps de manière à autoriser l'établissement de contacts). La sortie S a la valeur 0 et la lampe reste éteinte. Remarquons également que si nous avons affaire à la

combinaison inverse (où E1 posséderait donc la valeur 1 et E2 la valeur 0), S aurait toujours la valeur 0 (la lampe serait éteinte), puisque l'on sait que :

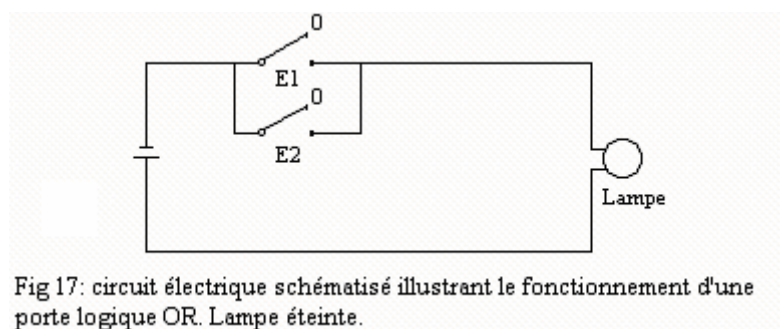
E1	E2	S (lampe)
1	0	0

2) Porte OR :



E1	E2	S (lampe)
1	1	1

Comme cela était précédemment le cas avec le circuit électrique illustrant physiquement le comportement de la porte logique AND, si les entrées E1 et E2 d'un circuit de type OR possèdent concurremment la valeur 1 (E1 et E2 sont en position basse et le courant passe), la lampe est allumée ($S = 1$).



E1	E2	S (lampe)
0	0	0

De la même manière, si E1 et E2 se trouvent tous deux en position haute (E1 = E2 = 0), alors les contacts du circuit ne sont pas établis et le courant ne passe pas sur ce dernier: la lampe, donc, n'est pas allumée (S = 0).

En revanche, et à la différence du circuit de type AND, les deux autres configurations restantes (E1 = 0 et E2 = 1 ou E1 = 1 et E2 = 0), ont pour résultat la fermeture du circuit et en conséquence l'allumage de la lampe. Les figures 19 et 20 illustrent ces combinaisons :

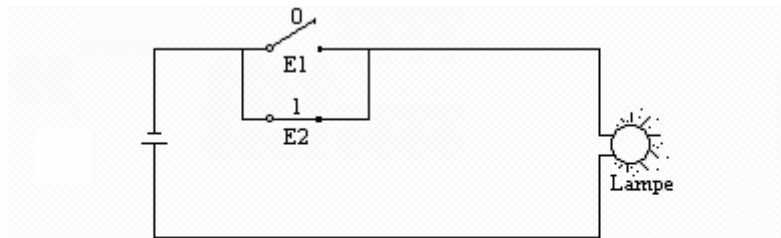


Fig. 18: circuit électrique schématisé illustrant le fonctionnement d'une porte logique OR. Lampe allumée.

E1	E2	S (lampe)
0	1	1

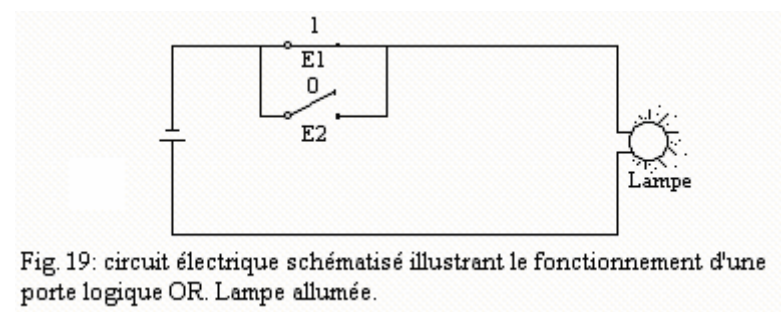


Fig. 19: circuit électrique schématisé illustrant le fonctionnement d'une porte logique OR. Lampe allumée.

E1	E2	S (lampe)
1	0	1

3) Porte XOR :

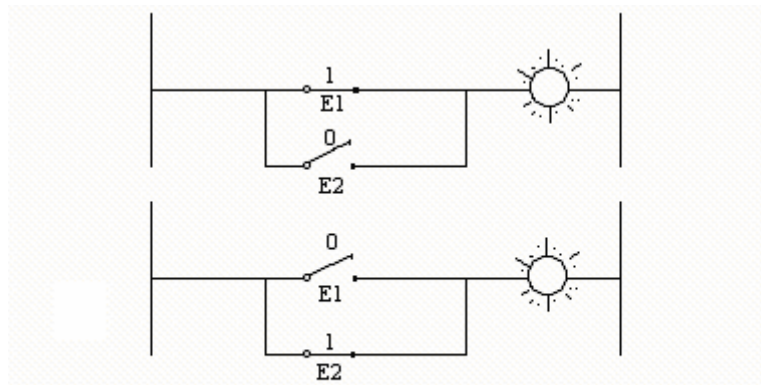


Fig 20: circuits électriques schématisés illustrant le fonctionnement d'une porte logique XOR. Lampe allumée.

E1	E2	S (lampe)	E1	E2	S (lampe)
1	0	1	0	1	1

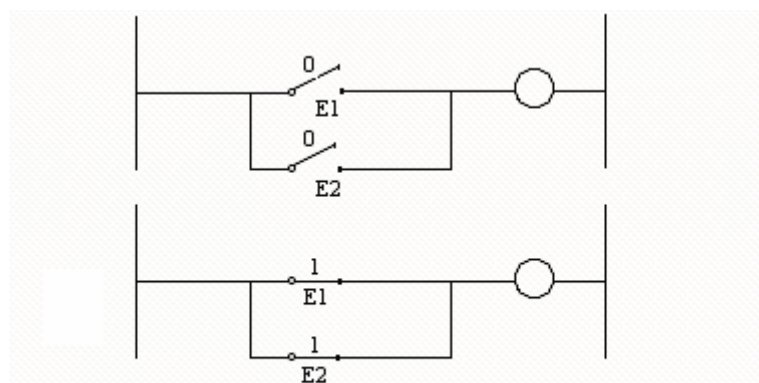


Fig. 21: circuits électriques schématisés illustrant le fonctionnement d'une porte logique XOR. Lampe éteinte.

E1	E2	S (lampe)	E1	E2	S (lampe)
0	0	0	1	1	0

Comme on peut le constater sur les figures 21 et 22, le comportement de la porte XOR peut être partitionné en deux genres qui comprennent deux types distincts de combinaisons logiques. Si les états logiques de E1 et E2 sont respectivement 1 et 0 ou qu'ils sont 0 et 1, alors l'état logique de la sortie est 1. La lampe est allumée. Si E1 et E2 possèdent la même valeur logique (1 et 1 ou 0 et 0) alors celle de la sortie est 0 (la lampe est donc éteinte).

Par simple souci de lisibilité, nous avons ici choisi d'illustrer le fonctionnement des portes logiques AND, OR et XOR en recourant à des montages électriques schématisés. Rappelons une fois de plus que nous aurions tout aussi bien pu parvenir à un résultat absolument identique en utilisant un schématisme ne faisant intervenir que des composants électromécaniques ou encore des éléments électroniques (par exemple des tubes à vide ou des transistors) : c'est la *structure logique de la fonction* considérée qui importe avant toute chose, et non la technologie spécifique vers laquelle celle-ci peut se trouver éventuellement portée.

Parlant des portes logiques NOT, AND, OR et XOR, nous avons plus haut affirmé qu'en informatique, elles étaient fondamentales. Bien que cette assertion soit vraie dans l'absolu, il nous faut néanmoins la modérer quelque peu. Nous allons maintenant voir pourquoi.

En logique bivalente, il a été démontré depuis longtemps déjà que tous les connecteurs binaires (qui sont au nombre de 16), pouvaient être exprimés en utilisant un ensemble réduit d'opérateurs composé d'un ou de quelques foncteurs binaires ainsi que de l'opérateur unaire de négation. Nous récapitulons ces 16 connecteurs dans le tableau systématique suivant :

Tableau n°5 : les 16 connecteurs de l'algèbre booléenne :

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
p	q	T	$p \vee q$	$p \subset q$		$p \supset q$		$p \equiv q$	$p \cdot q$	$p \mid q$	$p \wedge q$					$p \downarrow q$	C
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Les colonnes n°2, n°3, n°4, n°5, n°7, n°8, n°9, n°10, et n°15 de ce tableau correspondent respectivement aux tables de vérité des opérateurs suivants : opérateur de disjonction inclusive (2), converse de l'implication (3), opérateur d'implication (5), opérateur d'équivalence (7), opérateur de conjonction (8), opérateur d'incompatibilité (9), opérateur de disjonction inclusive (10), opérateur de rejet (15). Les colonnes n°1 et n°16, sont celles de la

tautologie (T) et de la contradiction²¹⁴ (C). Les colonnes n°12 et n°14 sont celles des tables de la non-implication directe et de la non-implication converse. Quant aux colonnes restantes (n°4, n°6, n°11 et n°13), elles peuvent, comme le note G. Chazal, être exprimées « avec les opérateurs binaires déjà connus et la négation : il n'est donc pas besoin de leur donner un nom²¹⁵ ». En fait, toutes ces fonctions peuvent être exprimées en utilisant un ensemble restreint d'opérateurs composé seulement de la conjonction, de la disjonction et de l'implication²¹⁶ assortis de la négation. Leur interdéfinissabilité peut être démontrée au moyen de la table d'équivalence qui suit:

Est traduisible en termes de :	$p \vee q$	$p \cdot q$	$p \supset q$
Conjonction	$\sim (\sim p \cdot \sim q)$	x	$\sim (p \cdot \sim q)$
Disjonction	x	$\sim (\sim p \vee \sim q)$	$\sim (\sim p \vee q)$
Implication	$\sim p \supset q$ $\sim q \supset p$	$\sim (p \supset \sim q)$ $\sim (q \supset \sim p)$	x

Afin de vérifier la véracité des différentes liaisons d'équivalence répertoriées dans cette table, il sera possible, pour chacune des formules logiques qui s'y trouvent mises en rapport, de construire les tables de vérité correspondantes et d'en comparer ensuite les résultats finaux. Ainsi pourra-t-on par exemple construire la table des expressions « $p \vee q$ » et « $\sim (\sim p \cdot \sim q)$ » :

p	q	$\sim p$	$\sim q$	$p \vee q$	$(\sim p \cdot \sim q)$	$\sim (\sim p \cdot \sim q)$
1	1	0	0	1	0	1
1	0	0	1	1	0	1
0	1	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	1	0

Comme on peut le constater ci-dessus, ces deux formules possèdent chacune une table de vérité, qui, lorsque l'on procède à leur comparaison, s'avèrent être

²¹⁴ R. Blanché rappelle dans son *Introduction à la logique contemporaine*, que la tautologie et la contradiction ne peuvent être considérés comme des foncteurs de vérité qu'en un sens élargi. Ainsi, « la vérité de la proposition tautologique, par exemple, n'est pas fonction de la vérité ou de la fausseté des propositions atomiques qui la composent : elle ne varie pas selon que varient les valeurs de vérité de ces propositions, puisqu'elle est vraie quelles que soient ces valeurs », in [Blanché, 1968], pp. 49-50.

²¹⁵ In [Chazal, 1996], p. 74.

²¹⁶ Le logicien et mathématicien Alfred Tarski a prouvé que cet effort de réduction pouvait être mené à son extrême puisqu'il est parvenu à reconstruire le calcul propositionnel en ne recourant qu'à un seul opérateur fondamental, celui d'équivalence. Le même résultat peut être obtenu avec l'opérateur de rejet.

rigoureusement identiques l'une à l'autre (dans les deux cas les tables sont : $\{1,1,1,0\}$). Par conséquent, ces deux expressions sont équivalentes. On pourra sans grande difficulté réitérer un calcul de ce genre pour chacune des paires de formules liées dans ce diagramme : dans tous les cas de figure qui y sont effectivement listés, une telle identité pourra invariablement être vérifiée. De ce fait, et grâce à une telle simplification, il est donc permis de migrer d'un système formel comportant initialement seize opérateurs à un système absolument équivalent qui n'en comporte plus que quatre (*i.e.* : la négation, l'implication, la disjonction et la conjonction).

Etant donnée la relation d'isomorphie existant entre la logique binaire et les circuits logiques et physiques, il est patent que la possibilité de procéder à la simplification de l'une implique nécessairement la possibilité de condenser ou de simplifier les autres proportionnellement : si l'on réduit à n (foncteur de négation compris), le nombre d'opérateurs permettant d'exprimer toutes les expressions bien formées de la logique, on se trouvera également en mesure de réduire à ce même nombre n le nombre de portes logiques élémentaires permettant la composition des circuits logiques puis celle des circuits matériels. Dans le domaine de la construction des calculateurs, la possibilité même de cette réduction revêt une importance considérable puisque parmi les multiples contraintes qui pèsent sur la synthèse ou la spécification optimales des circuits d'ordinateurs digitaux, il en est une qui est à la fois fondamentale et inévitable: le coût de leur réalisation. Pour une technologie donnée et pour des circuits exhibant un même niveau de complexité, il est évident que le coût financier directement lié à la réalisation de ces derniers sera fonction à la fois du nombre d'éléments effectivement utilisés et de celui de leurs types. Suivant cela, un circuit constitué de trois types différents de composants, disons par exemple des portes XOR, des portes AND et des portes NOT, sera toujours plus coûteux à produire qu'un circuit réalisant la même fonction mais en étant cette fois-ci construit à partir de deux types de portes seulement, par exemple des portes NOT et AND. Puisque l'ensemble des opérateurs binaires que nous avons effectivement considéré peut être exprimé en usant des seuls opérateurs de négation, de conjonction et de disjonction²¹⁷ (autrement dit la négation, le produit et la sommation logiques du calcul booléen), de façon isomorphe, l'ensemble constitué des portes logiques pourra donc être réduit à des combinaisons de portes logiques NOT, AND et OR (à l'aide des méthodes des minterms ou des maxterms (formes normales) - ou encore celle des diagrammes de Karnaugh - il sera possible de démontrer que n'importe quelle fonction booléenne peut être

²¹⁷ Nous omettons volontairement de mentionner ici l'implication mais, celle-ci, au même titre que les autres opérateurs, peut être traduite avec « \sim » et « \cdot » ou « \vee ».

exprimée sous la forme d'une somme logique de produits logiques ou d'un produit logique de sommes logiques). Pour le dire autrement, toute formule algébrique bien formée appartenant à la logique bivalente pourra être traduite en termes négatifs, conjonctifs et disjonctifs, ce qui a évidemment pour conséquence directe que tout circuit logique isomorphe à une telle expression pourra être construit en utilisant uniquement des portes NOT, AND et OR. Précisons sans plus attendre que cet effort de réduction, cette tension continue vers une économie mathématique et physique maximales, peut encore être poussé plus avant. En effet, et même si, remarquablement, il autorise la synthèse de toute fonction logique, l'ensemble {NOT, AND, OR} n'est pas minimal puisqu'il est possible, nous l'avons vu plus haut, de réaliser la fonction AND avec des portes NOT et OR et la fonction OR avec des portes NOT et AND (puisque l'on sait que « $p \cdot q \equiv \sim (\sim p \vee \sim q)$ » et que « $p \vee q \equiv \sim (\sim p \cdot \sim q)$ »). Il existe en fait une classe d'opérateurs – et donc un ensemble correspondant de portes logiques - dits complets ou minimaux étant entendu que non seulement, pris de manière combinée ou individuelle, ils permettent de formuler la totalité des opérateurs et des expressions de la logique bivalente mais qu'en plus, ils ne peuvent être davantage réduits. Ce sont les opérateurs NAND (pour NOT-AND) et NOR (pour NOT-OR). Il va cependant de soi, puisque A. Tarski par exemple a mathématiquement démontré la réductibilité de la logique bivalente à des propositions uniquement construites au moyen du seul opérateur binaire d'équivalence, que l'irréductibilité de ces deux fonctions doit être exclusivement comprise en un sens pratique. Se pose alors la question de savoir pourquoi une telle solution, absolument radicale en termes d'optimisation, n'a pas été retenue et mise en œuvre pour la construction de nos ordinateurs ? En vérité, la raison de tout ceci s'avère être relativement triviale. En logique, et conséquemment dans le domaine de la définition des circuits d'ordinateurs, la question qu'il convient de se poser finalement est celle que formule avec justesse Gérard Chazal dans ses *Éléments de logique formelle*, à savoir «... faut-il choisir beaucoup d'opérateurs ou peu, voire un seul ?²¹⁸ ». Il paraît évident que la conception d'un calculateur n'utilisant qu'un seul type de portes très simples au lieu de plusieurs – tout aussi simples et sans que cette transition n'amoindrisse le moins du monde la puissance calculatoire du système ainsi réalisé - représentera pour le constructeur de cette machine une économie financière considérable. Pourquoi alors ne pas avoir franchi cette ultime étape qui à coup sûr nous aurait conduits en informatique à une économie de moyens tout à la fois maximale et indépassable ? En fait, comme le rappelle également G. Chazal concernant la logique, « tout est affaire de

²¹⁸ In [Chazal, 1996], p. 75.

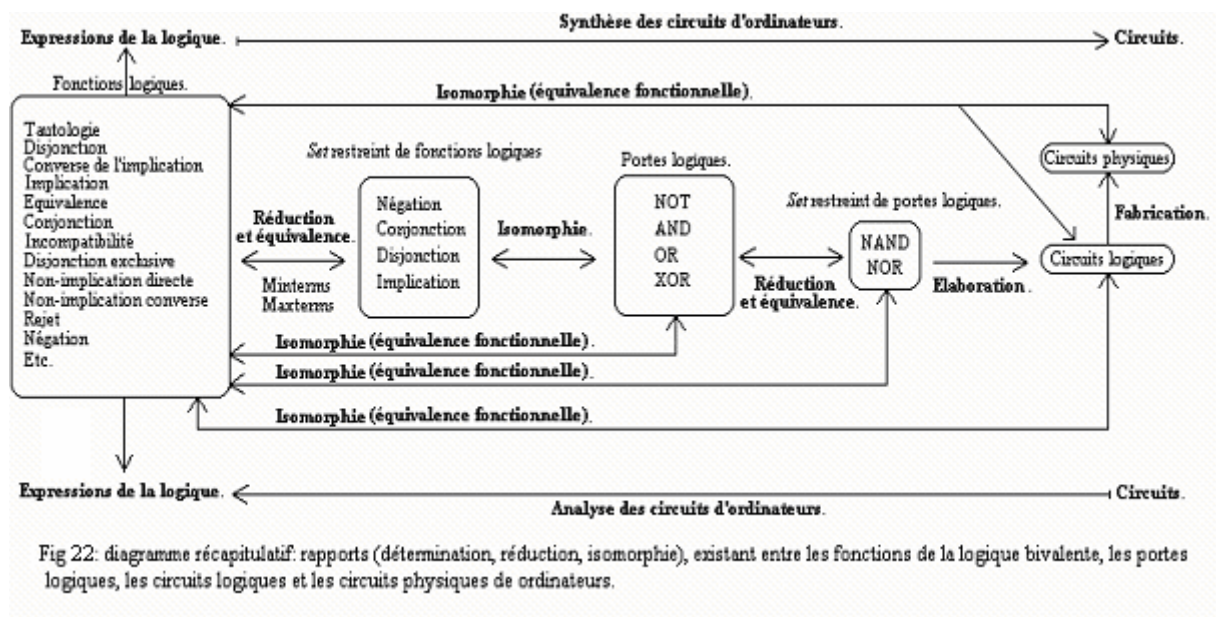
*compromis et de juste milieu*²¹⁹ ». Ce qui vaut pour la logique bivalente s'appliquant aussi aux circuits, qu'ils soient du reste virtuels ou matériels, tout y sera également question de compromis et de juste milieu. Construire une machine avec un seul type de portes entraînera sûrement, au moins dans un premier temps, une réduction appréciable des coûts de conception et de réalisation. Cependant un tel gain financier sera négativement contrebalancé par une augmentation considérable du nombre d'éléments nécessaires pour construire les circuits étant donné que l'usage, en amont, d'une logique basée sur un unique opérateur conduira obligatoirement à une complexification conséquente des formules algébriques qu'ils instancient matériellement. C'est alors le niveau d'intégration des circuits qui pâtira de cela, avec tous les problèmes liés au volume des machines, à la consommation électrique et à la dissipation thermique que cela peut bien impliquer. L'usage de l'ensemble constitué des portes NAND et NOR (qui d'une part synthétisent les fonctions NOT et AND et d'autre part les fonctions NOT et OR), permet d'atteindre un équilibre et une performance technique et économique optimales au milieu de ce faisceau de contraintes. C'est la raison pour laquelle l'économie interne fondamentale des ordinateurs repose aujourd'hui sur l'emploi de logiques impliquant principalement ces deux opérateurs fondamentaux.

Nous avons précédemment avancé le fait que le langage mathématique binaire, avec l'extrême pauvreté de moyens qui par essence est sienne, permettait néanmoins, grâce à l'extraordinaire puissance combinatoire qu'il autorise et aux dispositifs optimaux de codage qui lui sont communément associés en informatique, de prendre indifféremment en charge, c'est-à-dire de traiter de nombreuses façons, les objets respectifs de champs aussi diversifiés que le calcul, le texte, l'image ou encore le son. Par l'entremise d'un processus de numérisation auquel ils se trouvent tout d'abord soumis et qui a pour effet essentiel d'en réduire uniformément la multiplicité des aspects à des suites exclusivement composées de 1 et de 0, les objets participant de ces sphères viennent ainsi se condenser dans l'ordinateur digital pour s'y trouver stockés, manipulés, transformés, déformés, fusionnés, dupliqués ou transférés. Or toutes ces opérations de modification ou de conservation portant sur des séquences binaires – car c'est bien d'opérations, au sens mathématique du terme, dont il s'agit ici – nécessitent pour être effectuées l'existence et l'action spécifique d'un certain nombre d'opérateurs mathématiques. Ces opérateurs logiques, ou les portes virtuelles ou physiques qui en sont dérivées et qui leur sont isomorphes, sont ceux-là même de la logique booléenne. Si leur nombre peut être raisonnablement limité sans pour autant affaiblir la puissance

²¹⁹ *Ibidem.*

mathématique du système formel duquel ils participent, ce qui se trouve être effectivement le cas, alors c'est tout l'agencement intime des calculateurs digitaux qui s'en trouve très avantageusement modifié. On se trouve alors mis en présence de deux entités rigoureusement isomorphes, dont l'une est mathématique et l'autre est matérielle – il s'agit bien sûr de la logique bivalente et du calculateur digital - et dont la relation ne saurait être qualifiée autrement qu'en usant du terme « fusion » tant, profondément, elles dialoguent, se compénètrent et s'entredéterminent continuellement. L'ordinateur reflète ainsi avec une absolue fidélité, de façon mécanique et jusque dans la conformation de ses éléments les plus infimes, les plus imperceptibles s'il s'agit de composants transistorisés, à la fois toute la simplicité, toute l'économie et tout le pouvoir de la mathématique binaire.

La figure 22, présentée ci-dessous, nous permettra de reconsidérer sous forme schématisée l'intégralité des éléments que nous venons d'examiner ainsi que les interrelations qu'ils entretiennent les uns avec les autres.



En débutant cette section consacrée à l'étude des composants des ordinateurs et à la relation qui les lie à la logique, nous avons rapidement mentionné l'existence de deux types essentiels de circuits : les circuits combinatoires et les circuits séquentiels. Ces derniers, qui peuvent être de différents types mais qui toujours sont bâtis au moyen des quelques portes que nous venons d'étudier, constituent pour ainsi dire les modules logiques élaborés les plus fondamentaux de nos calculateurs digitaux. Ce sont eux et les nombreuses combinaisons

qu'ils autorisent, qui, matériellement, permettent la réalisation de fonctions mathématiques complexes. Nous devons bien comprendre qu'à ce stade de notre investigation, où nous délaissions, sans réellement l'abandonner, le purement élémentaire pour nous intéresser à la formidable combinatoire qu'il autorise, nous nous élevons d'un niveau dans cette structure étonnamment stratifiée, conjointement logique et matérielle, qu'est l'ordinateur digital...

1.3.5. Analyse de quelques circuits combinatoires et séquentiels : décodeurs, codeurs, multiplexeurs, démultiplexeurs, additionneurs et bascules R-S.

Précisons immédiatement que nous ne distinguerons et n'étudierons, dans les deux classes spécifiquement constituées par les nombreux circuits combinatoires et séquentiels existant, que ceux dont nous avons jugé que les modalités de fonctionnement paraissaient les plus représentatives de l'ensemble duquel ils participent. Une étude exhaustive et plus détaillée de ces composants et de leur fonctionnement risquerait en effet de nous conduire à trop nous éloigner de notre objectif. A force de vouloir parcourir les multiples couloirs et niveaux que compte ce véritable labyrinthe qu'est la couche physique fondamentale de l'ordinateur, nous prendrions à coup sûr le risque de nous y perdre...

Concernant ces circuits, et de manière générale, il conviendra de toute façon de ne retenir que deux principes essentiels :

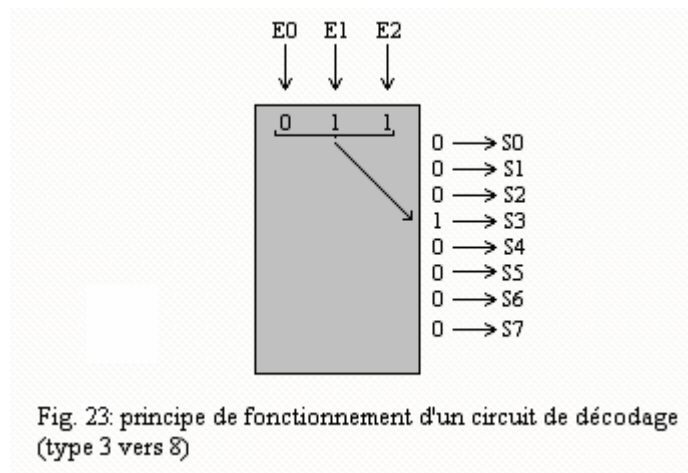
- 1) Le signal recueilli en sortie d'un circuit combinatoire dépend uniquement de ses signaux d'entrée et de ceux-là seulement.
- 2) Le signal de sortie d'un circuit séquentiel dépend non seulement des signaux reçus en entrée mais aussi des signaux d'entrée reçus précédemment (éventuellement, on prendra aussi en ligne de compte le temps de propagation des signaux dans ce circuit)

Modules de décodage (circuits combinatoires) :

Un décodeur est un circuit qui fait correspondre à un mot binaire²²⁰ entrant (codé sur n lignes d'entrée), une seule sortie parmi 2^n possibles (si, par exemple, il comporte quatre *inputs*, il aura donc 16 *outputs*). On dira alors qu'il est de type 4 vers 16 (ou, plus

²²⁰ Par exemple les 3 bits de poids fort d'un octet. Sur un octet tel que 11001001 par exemple, les trois bits de poids fort sont ceux qui se trouvent situés le plus à gauche de la séquence binaire, en l'occurrence 110.

généralement, que les décodeurs sont des circuits de type n vers 2^n). Il s'agit donc d'un dispositif qui opère, selon les usages que l'on peut en faire, une fonction de sélection ou de routage. Le principe général de fonctionnement d'un tel circuit (nous nous contenterons de le représenter ici sous la forme d'une *black box* car faire figurer ses composants fondamentaux et la manière dont ils sont câblés aurait pour conséquence de rendre difficilement interprétable son schéma), peut être illustré comme suit :



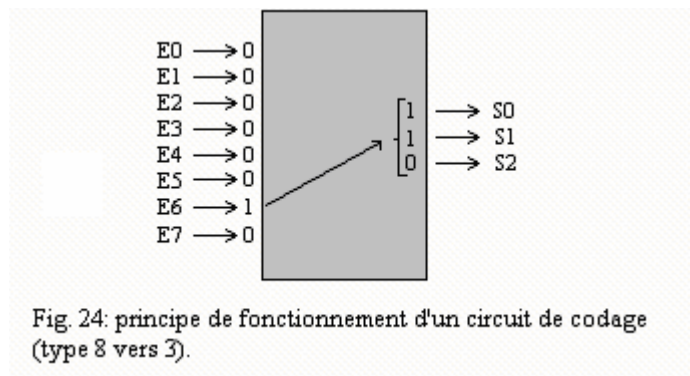
Etant donné qu'il s'agit dans notre exemple type d'un module 3 vers 8, ce dernier comportera $n = 3$ entrées (notées E0, E1 et E2), et 2^n outputs, soit $2^3 = 8$ sorties (S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7). Son *modus operandi* est fort simple : les trois entrées de ce circuit autorisent 2^3 combinaisons binaires possibles, ce qui, comme on peut le constater, correspond exactement au nombre de ses sorties. En fonction de l'état binaire, parmi les 2^3 possibles, que pourront prendre les lignes entrantes, une seule sortie sera activée (*i.e.* prendra la valeur 1). On ne manquera peut-être pas de s'interroger sur l'emploi réel des circuits de décodage dans les ordinateurs. A titre illustratif, que l'on nous permette de faire ici mention d'un exemple dont nous emprunterons les grandes lignes à Andrew Tanenbaum²²¹. Imaginons donc un petit ordinateur domestique, du type de ceux qui pouvaient exister au milieu des années 80, doté de huit barrettes de mémoire vive ayant chacune une capacité de stockage de 1 méga-octets (soit en tout $8 \cdot 1048576$ octets ou encore $8 \cdot 1048576^2$ bits). Chacun de ces modules aura donc pour fonction le stockage de 1048576 octets. Le premier module mémoire, M0, contiendra les octets dont les adresses sont situées dans une plage de valeurs allant de 0 à 1 Mo. Le deuxième, M1, contiendra ceux dont les adresses vont de 1 à 2 Mo, et cela jusqu'au septième module (M7). En fonction de la valeur binaire des trois bits de poids fort des octets devant

²²¹ In [Tanenbaum, 2001], p. 131.

être routés au moyen du décodeur, le signal sera acheminé vers une sortie et une seule parmi les huit possibles, à savoir précisément la sortie connectée à la barrette mémoire qui stocke la plage d'adresses de laquelle relève cet octet. Concrètement, cela revient à dire que si le signal entrant est, par exemple, 010 (soit 2 en base 10), c'est le boîtier M2, c'est-à-dire le troisième, qui sera alors sélectionné pour conserver cet octet.

Modules de codage (circuits combinatoires):

Les modules de codage accomplissent la fonction inverse de celle qui est opérée par les décodeurs. Possédant 2^n entrées dont une seule est active à un instant t donné, le décodeur fait correspondre à celle-ci un signal logique qui est ensuite codé sur n lignes de sortie (les décodeurs sont des circuits dits de type 2^n vers n).



Modules de multiplexage (circuits combinatoires):

Les circuits multiplexeurs sont des dispositifs un peu plus complexes que ceux qui nous ont été donnés à voir jusqu'à présent. Entendons par là qu'en plus des lignes d'entrée et de sortie que comportent habituellement tous les circuits combinatoires, ils admettent également en entrée des lignes supplémentaires, nommées lignes de commande ou de sélection, qui participent à la détermination de leur état de sortie. Un multiplexeur possède une ligne de sortie, 2^n lignes d'entrées (ici également appelées lignes de données), et n lignes de commande. Ces n lignes de sélection (notées L_{cn} sur notre schéma), permettent de choisir une entrée, et une seule, parmi les 2^n qu'un multiplexeur est généralement susceptible

d'admettre²²² (on dira qu'il est de type 1 parmi 2^n). Une fois cette ligne d'entrée choisie, élection qui est fonction des états logiques courants des n lignes de commande du circuit, celle-ci est alors dirigée vers la sortie S :

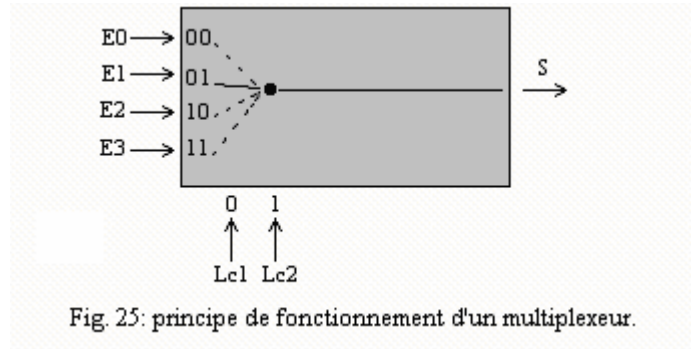


Fig. 25: principe de fonctionnement d'un multiplexeur.

Un multiplexeur n'est en fait rien d'autre qu'une sorte de centrale de triage qui réalise, si $n = 2$, la fonction mathématique suivante : $S(p, q) = E0 \sim p \cdot \sim q + E1 \sim p \cdot q + E2 p \cdot \sim q + E3 p \cdot q$, où p et q sont des variables représentant les états logiques possibles des lignes de commande Lc1 et Lc2. Sur notre exemple, qui présente un multiplexeur de type 1 parmi 4, celles-ci sont respectivement mises à 1 et à 0. C'est donc le circuit qui concorde avec cette configuration particulière d'états logiques qui est activé, l'entrée qui lui est raccordée étant alors transmise vers l'unique ligne de sortie. Les applications que permet la mise en oeuvre des multiplexeurs – ou celle de combinaisons de multiplexeurs – sont nombreuses. Parmi les plus intéressantes cependant, nous pouvons notamment citer la conversion du mode parallèle au mode sériel²²³ ou encore la réalisation de fonctions logiques à n variables (on pourra ainsi, au moyen de multiplexeurs à 2 variables – 2 lignes de commande - réaliser toutes les fonctions à 2 variables de la logique booléenne). Les modules de démultiplexage (également des circuits combinatoires), ne possèdent qu'une seule ligne de données, n lignes de commande et, généralement, 2^n lignes de sortie. En fonction des états logiques caractérisant les n lignes de commande à un instant t , la variable logique de la ligne d'entrée est dirigée vers une seule des 2^n lignes de sortie du circuit.

²²² L'inéquation $2^n \geq d$ définit le rapport existant entre le nombre n de lignes de commandes et le nombre d de lignes de données. Dans le cadre de notre illustration, n possède la valeur 2 et d vaut 4. Etant donné que $2^2 \geq 4$, ce principe est bien vérifié.

²²³ Il suffirait de procéder ainsi pour réaliser une telle conversion : supposons les 4 bits constitutifs d'un demi-octet présentés simultanément (parallèlement), sur les 4 lignes de données E0, E1, E2, et E4 d'un circuit de multiplexage. En modulant séquentiellement les états logiques de ses lignes de commande (les valeurs passées successivement sur Lc1 et Lc2 seront ainsi 00, 01, 10 et 11), chacun des bits présentés sur les lignes d'entrée seront successivement (à la suite les uns des autres, *i.e.* en série) dirigés sur la ligne de sortie.

Additionneurs binaires (circuits arithmétiques de type combinatoire) :

Comme leur désignation l'indique, les additionneurs (en fait des couplages de demi-additionneurs), sont des circuits arithmétiques qui permettent de réaliser la somme de deux ou plusieurs nombres exprimés sous forme binaire. Sur le plan logico-arithmétique, ces montages matériels respectent les principes spécifiés par la table suivante :

$p + q$	Somme	Retenue
$0 + 0$	0	0
$1 + 0$	1	0
$0 + 1$	1	0
$1 + 1$	0	1

On reconnaîtra là sans grande difficulté la table de l'addition binaire dont nous avons illustré plus haut l'intégralité du fonctionnement en recourant pour les besoins de notre démonstration à un diagramme figurant un petit automate fini. Or ce dont il faut bien se rendre compte ici, c'est que les *adders* (circuits additionneurs), réalisent physiquement cet automate qui, sous une modalité spécifique que nous pourrions peut-être qualifier de « grapho-logico-mécanique », représentait lui-même, et très précisément, l'économie particulière de cette table d'addition. Comprenons encore à partir de cet exemple très significatif qu'une opération mathématique, quelle qu'elle soit, peut faire l'objet de représentations extrêmement diversifiées qui toutes, et ce malgré leurs différences phénoménales indéniables, demeurent inscrites les unes par rapport aux autres dans un rigoureux rapport d'isomorphie: forme tabulaire, forme diagrammatique, expression logique, circuits logiques, circuits matériels et forme logicielle d'une quelconque opération sont à ce titre absolument équivalents les uns aux autres et renvoient tous, selon leurs modes propres, à une seule et même chose : la fonction qu'ils instancient chacun à leur manière. En jouant simultanément sur les deux sens du terme « modèle », nous dirons qu'un additionneur est un modèle (physique) de la table de sommation logique et que celle-ci constitue le modèle (logique) de l'additionneur physique ; l'un et l'autre réalisent ainsi la même fonction arithmétique.

Concrètement, les circuits additionneurs sont construits en couplant les uns aux autres un certain nombre de circuits de base que l'on nomme demi-additionneurs (ou encore « étages

d'additionneurs »). C'est la présence – éventuelle - d'une retenue dans le procès d'une sommation binaire qui a rendu absolument nécessaire la définition d'un pareil dispositif cumulatif (à moins que l'on ne souhaite additionner que deux nombres d'un bit seulement, auquel cas un demi-additionneur s'avère suffisant). Un demi-additionneur comporte deux portes logiques élémentaires : une porte XOR et une porte AND. La première permet de réaliser la somme des états logiques présents sur les deux lignes d'entrée du circuit tandis que la seconde effectue, s'il y a lieu, la fonction *carry* (retenue), de cette addition. Il possède également une ligne de sortie (à partir du XOR) et une ligne de retenue (à partir du AND). En plus des portes XOR et AND, un additionneur complet comprend aussi une porte OR qui permet de calculer une retenue de sortie. La figure n présente les circuits logiques correspondant à un demi-additionneur et à un additionneur complet.

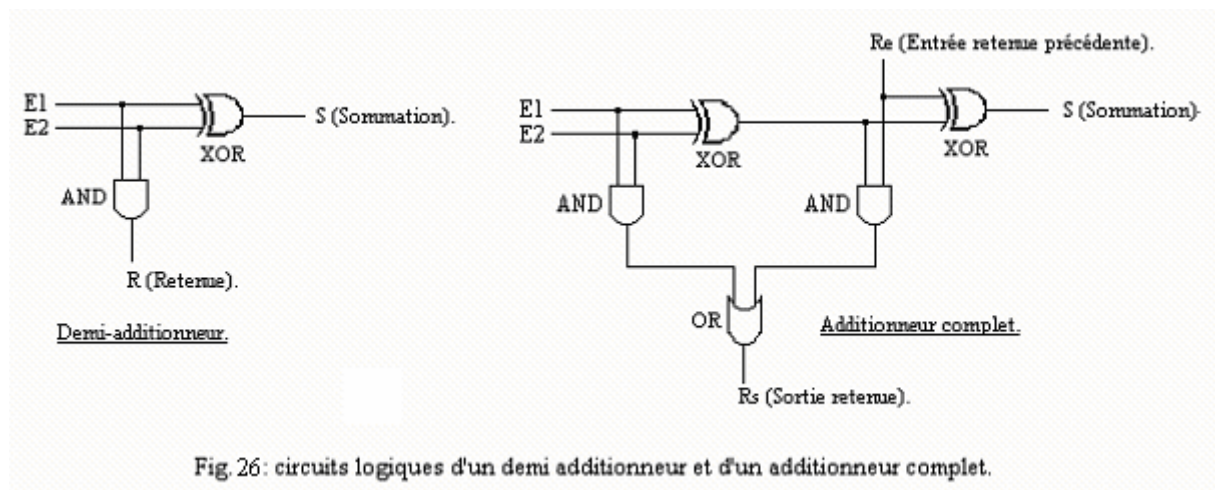


Fig. 26: circuits logiques d'un demi additionneur et d'un additionneur complet.

Supposons que les états logiques des entrées E1 et E2 du demi-additionneur (à gauche sur la figure), soient 1 et 0. La consultation de la table de vérité de ce circuit logique nous apprend que la somme de 1 et de 0 (états logiques de E1 et E2), vaut 1 et que dans cette configuration logique particulière, la retenue est égale à 0. L'état logique de la sortie S sera donc (0)1, c'est-à-dire 1. Si les états logiques de E1 et E2 sont tous deux égaux à 1, alors l'état logique de la sortie S est mis à 0 et la retenue vaut 1. Le résultat de cette opération est donc 10 (en base dix, 1 + 1 est égal à 2, soit 10 en base deux). Comme nous pouvons le constater au moyen de cet exemple simple, un demi-additionneur est un dispositif qui, considéré du point de vue de sa seule individualité, ne possède qu'une puissance de calcul fort limitée : en effet, il ne permet d'additionner l'un à l'autre que deux nombres binaires formés chacun d'un bit seulement. Pour effectuer l'addition de nombres binaires plus longs, c'est-à-

dire de nombres formés de n bits tels que $n > 1$, il est nécessaire de coupler autant de demi-additionneurs qu'il existe effectivement de bits composant les nombres binaires devant être sommés (deux demi-additionneurs forment un additionneur complet). Les retenues de sortie générées par l'addition de bits intermédiaires lors d'un calcul de ce genre se trouvent dirigées vers l'entrée de retenue du demi-additionneur suivant. Une telle structuration étagée permet ainsi la mise à jour et la propagation d'une éventuelle retenue pendant tout le processus de calcul et ceci jusqu'à ce que ce dernier soit entièrement effectué. Le résultat final de l'opération d'addition est déterminé à la fois par les états logiques des lignes d'entrées du circuit ainsi que par celui de la ligne de retenue d'entrée. La table de vérité d'un additionneur peut être représentée de la manière suivante :

E1	E2	Retenue d'entrée	S (Sommmation)	Retenue de sortie
1	1	1	1	1
1	1	0	0	1
1	0	1	0	1
1	0	0	1	0
0	1	1	0	1
0	1	0	1	0
0	0	1	1	0
0	0	0	0	0

Comme on peut le voir ci-dessus, l'état logique de la retenue de sortie d'un additionneur est mis à 1 si les valeurs logiques des entrées E1 et E2 sont égales à 1 ou encore si l'une ou l'autre (ou éventuellement les deux), valent 1 et que la valeur de la retenue d'entrée vaut 1. Quant à l'état logique de la sortie S, il est égal à 1 si le nombre de valeurs logiques positionnées sur 1, pour les entrées E1, E2 et la retenue d'entrée, est impair. Dans le cas contraire, S vaut 0.

Les additionneurs (*adders*) sont, avec bon nombre d'autres circuits (par exemple ceux qui réalisent les fonctions logiques élémentaires ET, OU et NON, les codeurs, les décodeurs, les multiplexeurs, les démultiplexeurs et des dispositifs arithmétiques tels que les décaleurs), les composants intégrés de base permettant de fabriquer les unités arithmétiques et logiques (UAL) de nos ordinateurs.

Bistables (circuits séquentiels ou circuits « à mémoire ») :

Nous avons déjà précisé ceci, les circuits séquentiels voient l'état logique de leur ligne de sortie déterminé non seulement par les états logiques de leurs entrées courantes, mais aussi par les états logiques de leurs entrées antérieures. En cela, ils diffèrent donc considérablement des circuits combinatoires. Les circuits séquentiels sont élaborés au moyen d'agencements fort élémentaires indifféremment nommés bascules, bistables ou *flip-flops* (il est également courant, dans la littérature informatique, de les rencontrer désignés sous le terme générique de *latches*). Fondamentalement, ces bistables sont des automates simples susceptibles de ne posséder que deux états d'équilibre: soit ils se trouvent positionnés à l'état logique 1, soit ils se trouvent positionnés à l'état logique 0. Cette spécificité a pour conséquence directe que les bascules, qu'elles soient du reste de type *Delay*, *Reset-Set*, *Trigger flip-flop* ou J-K, peuvent toutes être employées comme de minuscules dispositifs autorisant le stockage temporaire d'un bit (notons justement qu'à ce titre, les bascules sont aussi nommées « points mémoire »). Ceci, tout au moins dans un premier temps, paraîtra sûrement négligeable en regard des méga-octets ou des centaines d'octets de capacité qu'offrent désormais couramment les mémoires centrales et les mémoires cache des machines que nous sommes accoutumés à utiliser. Aussi rudimentaires qu'elles soient, ou qu'elles paraissent être, les bistables figurent pourtant parmi les composants fondamentaux les plus essentiels qui soient pour la construction des ordinateurs, que l'on pense ici à nos machines transistorisées les plus modernes ou bien à celles, comme E.N.I.A.C., qui ont été effectivement mises en service au sortir de la deuxième guerre mondiale: en montant un grand nombre de bistables en parallèle, il est en effet possible de construire de véritables circuits de mémorisation (pour exemple on citera les différents types de registres des C.P.U. ou encore, justement, les mémoires cache et les mémoires de masse), capables de stocker autant de bits qu'il se trouve effectivement de *latches* connectées de la sorte. La capacité de rétention de chacune de ces bascules, considérée individuellement, est bien entendu presque dérisoire (que l'on se souvienne par exemple que la représentation - et donc le stockage - d'un entier décimal tel que 4 nécessite déjà 3 bits pour être réalisée). Le formidable pouvoir d'accueil, de conservation et de restitution de l'information qu'offrent pourtant les circuits mémoire des calculateurs digitaux, lesquels sont principalement constitués de ces éléments à la désarmante simplicité, procède en fait conjointement de la multiplication du nombre de ces derniers et de leur structuration en réseau. C'est, encore une fois, la mise en œuvre d'une combinatoire d'éléments à la puissance propre singulièrement limitée, l'élaboration à partir d'eux de figures réticulaires extrêmement composées, hautement

intégrées, qui permet à un pouvoir individuel initialement positionné à la bordure de l'insignifiance – la mémorisation d'un simple bit - de se voir démultiplié de manière considérable jusqu'à finalement former un tout – le circuit mémoire – qui autorise le stockage d'images, de sons, de textes ou encore de programmes fort sophistiqués.

Bistable R-S (circuit séquentiel) :

De façon générique, les bistables sont construits au moyen de deux portes logiques élémentaires montées en opposition. Les portes utilisées pour fabriquer ce genre de dispositifs peuvent indifféremment être des portes NOR ou bien encore des portes NAND. Peu importe du reste car ces deux solutions techniques sont en fait logiquement équivalentes l'une à l'autre. La figure 27 présente le schéma universel d'un bistable R-S. Ce dernier, comme on peut le voir, possède deux entrées distinctes notées S et R. L'entrée S (pour *Set* : configurer établir, fixer, régler), permet de mettre le bistable à l'état logique 1. L'entrée R (pour *Reset* : régler à nouveau, remettre à 0²²⁴), autorise quant à elle la mise à l'état 0 du système. Chacune de ces lignes constitue une des deux entrées des deux portes XOR de la bascule R-S. Celle-ci possède en outre deux lignes de sortie respectivement désignées par les lettres Q et $\sim Q$.

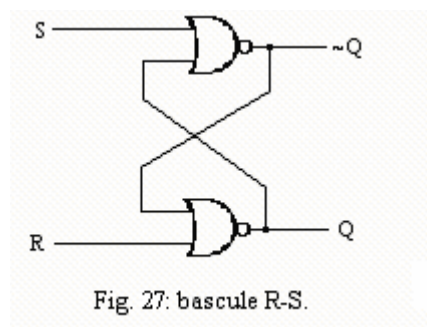


Fig. 27: bascule R-S.

On remarquera que les lignes de sortie Q et $\sim Q$ de chacune des portes NOR de cette bascule, puisqu'elles sont câblées de manière croisée sur une des deux entrées de la porte NOR opposée, permettent donc de déterminer l'état logique de celle-ci par effet de rétroaction. Un premier cas de figure nous permettra de mieux saisir l'économie générale de ce dispositif. Si S, R et Q sont toutes trois positionnées à 0, alors, et en vertu même de la table de vérité du NOR, la valeur logique de la sortie $\sim Q$ sera 1. Cette valeur est alors transmise en entrée à la porte NOR inférieure. Etant donné que R vaut 0 et que $\sim Q$ vaut 1, la sortie de cette porte se

²²⁴ Le bouton *reset*, sur un ordinateur, permet de relancer (on dit aussi *rebooter*), celui-ci en cas d'incident.

trouve forcée à 0. Cette configuration logique particulière constitue un des états d'équilibre du système. Si maintenant nous supposons que $Q = 1$ (avec S et R toujours égaux à 0), alors $\sim Q$ vaudra 0. Puisque l'entrée R de la porte NOR inférieure est mise à 0 et que sa deuxième ligne d'entrée reçoit la valeur logique de $\sim Q$, à savoir 0, la sortie Q est par conséquent forcée à la valeur 1 (R et $\sim Q$ valent 0 donc Q vaut 1). Cette combinaison logique constitue également un des états de stabilité de la bascule. L'ensemble des configurations logiques permettant de spécifier entièrement le comportement d'un bistable de type R-S peut être résumé au moyen de la table de vérité suivante :

R	S	Q	$\sim Q$	Mise à jour de Q (Q+)	Etat.
1	1	1	0	–	Indéterminé
1	1	0	1	–	Indéterminé
1	0	1	0	0	Effacement (<i>Reset</i>)
1	0	0	1	0	Effacement (<i>Reset</i>)
0	1	1	0	1	Etat mis à 1 (<i>Set</i>)
0	1	0	1	1	Etat mis à 1 (<i>Set</i>)
0	0	1	0	1	$Q+ = Q$
0	0	0	1	0	$Q+ = Q$

Dans tous les cas de figure présentés ici, y compris les états indéterminés, on se trouvera en mesure de noter que les sorties Q et $\sim Q$ ne peuvent jamais posséder le même état logique simultanément (lorsque Q est mis à 0, $\sim Q$ vaut bien évidemment 1 et inversement). Si deux valeurs logiques identiques étaient présentée ensemble sur les lignes d'entrée croisées des deux portes NOR du bistable – ce qui est parfaitement impossible – alors leurs sorties respectives en seraient modifiées en conséquence : Q et $\sim Q$ mis à l'état 1 amèneraient Q et $\sim Q$ à passer à l'état 0 (et non à l'état 1) ; réciproquement si Q et $\sim Q$ valaient 0, alors Q et $\sim Q$ seraient forcés à prendre la valeur 1, (et non la valeur 0). Dans ces deux cas, le fonctionnement de ce dispositif se révélerait absolument contradictoire et il ne pourrait en aucun cas remplir son rôle qui, principalement, consiste à mémoriser un bit, c'est-à-dire un élément simple d'information. Ainsi, et pour un bistable R-S, si R passe de l'état logique 0 à l'état 1 (on effectue ainsi un *reset* ou une remise à 0 du système), celui-ci passera ou bien se maintiendra à la valeur 0 ($Q = 0$). Si S passe de l'état 0 à l'état 1 (*set* ou mise à 1 du système), le bistable passera ou se maintiendra à la valeur 1 ($Q = 1$). Tout se passe alors comme si le

bistable R-S se « souvenait » des états logiques antérieurs de R et de S en prenant pour ainsi dire ces derniers comme autant de solides « points d'appui » afin de déterminer son nouvel état. C'est cette propriété particulière qui permet de dire, par abus de langage s'entend, que les bascules sont des composants élémentaires capables de « mémoriser » des informations.

La machine univers, l'ordinateur, peut être appréhendé, nous l'avons déjà dit, comme une entité technique présentant de multiples niveaux. Au cœur de cet objet pourtant si rigidement stratifié qu'est le calculateur digital à mémoire interne, les différentes frontières autorisant l'identification des couches logicielles et matérielles qui le constituent tendent parfois, lorsque l'on tente de les saisir afin d'en donner une exacte définition, à se dérober et à se fondre les unes dans les autres pour ressurgir aussitôt sous des modalités qui ne sont autres que celles de l'interdéfinitionnel et de l'interdétermination. Ceci, immédiatement, évoque en nous une métaphore géométrique qui relève à la fois des registres de l'étrangeté et de la familiarité. Voici là un ruban de Möbius dont la/les face(s) serait/seraient simultanément *physique* et *logique*, et qui, en un vertigineux mouvement d'entrelacement, viendraient littéralement s'amalgamer l'un dans l'autre, perdant et maintenant dans ce déconcertant procès leurs identités et leurs différences respectives. Nous sommes désormais habitués à la présence de l'ordinateur. Pendant plus d'une cinquantaine d'années l'état courant des technologies électromécaniques et électroniques, associé à des exigences de rendement et de performances sans cesse plus élevées – d'abord dans les secteurs de la recherche militaire et civile, puis dans celui de l'industrie et des affaires - ont contribué à faire de l'ordinateur la machine que nous connaissons tous à ce jour. Mais qu'on ne s'y trompe pas. L'ordinateur a beau être un instrument d'une exceptionnelle efficacité, il ne représente qu'une des possibles instanciations matérielles de son essence, laquelle est d'ordre logico-mathématique.

1.3.6. La machine universelle de Turing ou l'essence de l'ordinateur.

C'est dans un article daté de 1936 et intitulé « *Sur les nombres calculables avec une application au problème de la décision*²²⁵ » qu'Alan Mathison Turing, mathématicien, logicien, informaticien et cryptanalyste de génie, a pour la première fois décrit la célèbre

²²⁵ Alan Mathison Turing, « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungs-Problem », *Proceedings of the London Mathematical Society*, Series 2, 42, 230-65; trad. fr. J.-Y. Girard et A. M. Turing, *La machine de Turing*, Paris, Seuil, 1995.

« machine » qui, depuis, porte son nom. Ce travail d'un très haut niveau technique s'inscrivait alors dans un programme métamathématique précis. Proposé par l'allemand David Hilbert au cours du congrès de Paris de 1900, celui-ci se présentait en gros sous la forme d'une liste de 23 questions qui touchaient directement au problème central du fondement axiomatique des mathématiques. Il s'agissait, entre autres choses, de parvenir à répondre aux trois questions suivantes :

1°) Les mathématiques sont-elles consistantes ? (ou si l'on préfère sont-elles non contradictoires ?).

2°) Les mathématiques sont-elles complètes ? Autrement dit permettent-elles oui ou non de toujours démontrer une proposition ou son contraire ?

3°) Enfin, les mathématiques sont-elles décidables ? Ceci revient à se demander s'il existe ou non une méthode de calcul, encore appelée procédure effective ou algorithme, permettant de démontrer ou d'infirmer une proposition quelconque en un nombre fini d'étapes.

C'est le mathématicien autrichien Kurt Gödel qui, usant d'une méthode de démonstration particulièrement innovante dans son fameux théorème d'incomplétude, devait se charger d'apporter une réponse négative aux deux premières questions. La solution du problème de la décidabilité, elle, fut du ressort, de Turing. Les machines de Turing, au moins à l'origine, sont des outils destinés à un usage logico-mathématique. Sous leur forme universelle, elles représentent aussi le schéma abstrait, idéal, canonique, d'un artefact physique devenu aujourd'hui absolument incontournable, l'ordinateur. Inversement, l'ordinateur peut être perçu comme une des réalisations physiques possibles – mais forcément finie puisque concrète – d'une machine universelle de Turing. Dans *La machine en logique*, Pierre Wagner rappelle que la découverte d'une solution négative au problème de la décidabilité exigeait que l'on se dote d'une définition formelle de ce que recouvraient précisément les expressions « procédure effective » ou « algorithme ». Or, note le philosophe, l'exemple type d'une procédure effective ou algorithmique est celui d'un calcul arithmétique portant sur des nombres entiers. Dans ce cas de figure en effet :

« ...les conditions auxquelles l'opération est possible sont bien définies, chaque étape du calcul peut être achevée en un temps fini et détermine parfaitement l'étape suivante, en

sorte qu'à chaque moment, on sait sans ambiguïté si l'opération est achevée ou si, au contraire, une opération supplémentaire est requise... Tout calcul arithmétique usuel est donc l'application d'une procédure effective²²⁶.».

Quant un calculateur humain exécute une addition nous apprend Turing, il ne procède pas autrement. Selon lui l'humain part ainsi d'une situation initiale de calcul puis parcourt mentalement et de manière discrète un certain nombre d'étapes jusqu'à ce qu'il ait complété sa tâche. Chacune de ces étapes ou positions dans le calcul est dénuée de toute ambiguïté et est achevable en un temps fini. On sait donc si oui ou non elle représente la dernière opération à exécuter pour terminer le calcul. Dans tous les cas sauf celui-là, une étape du calcul détermine entièrement celle qui doit lui succéder.

Une machine de Turing n'est en fait rien d'autre qu'une construction abstraite, qu'un automate mathématique idéalisé, capable, en opérant discrètement sur une suite finie de symboles formels, de calculer tous les nombres qui peuvent l'être. Sous sa forme canonique, une telle machine se compose de plusieurs éléments de base :

- 1°) un ruban, que l'on suppose infini et qui est régulièrement découpé en cases adjacentes de dimensions identiques.
- 2°) une tête dite de lecture/écriture/effacement, capable de parcourir cette bande de façon discrète, de la droite vers la gauche ou inversement.
- 3°) un ensemble fini d'états et un alphabet fini de symboles.

A chaque machine de Turing, se trouve encore associé une matrice d'états ou un tableau de commande qui spécifie, pour chacune des combinaisons état rencontré/symbole lu dans lesquelles elle est susceptible de se trouver à un instant t , le type précis de l'action qu'elle doit effectuer. Selon l'état rencontré et le symbole lu, la machine pourra effectuer tout ou parties des actions suivantes :

- 1°) le signe lu par la tête de lecture/écriture/effacement pourra être laissé intact, être effacé ou encore se voir remplacé par un autre signe appartenant à l'alphabet de la

²²⁶ In [Wagner, 1998], p. 33.

machine.

2°) la tête de lecture/écriture/effacement pourra rester sur la case qui vient d'être lue ou bien se déplacer d'une case vers la gauche ou d'une case vers la droite.

3°) la machine pourra changer d'état ou bien demeurer dans celui dans lequel elle se trouve déjà.

Tout le comportement de la machine de Turing, tous ses possibles, viennent se condenser dans son tableau de commande. C'est son programme – lequel se ramène finalement à une suite ordonnée de signes binaires et d'instructions formellement exprimables - qui dit ce qu'elle devra faire, quelles que soient les configurations particulières qu'elle sera amenée à rencontrer. Parmi les nombreux résultats importants auxquels est parvenu Turing, il en est un qui nous intéresse tout particulièrement. Le mathématicien a ainsi démontré que pour toute machine particulière – fut-elle excessivement complexe - il était possible d'en construire une autre, nommée machine universelle de Turing, capable de produire le même résultat que la première, pourvu seulement que soit lui fournie une description précise de celle-ci.

Cette description, exprimée de façon symbolique et présentée à son tour sur un ruban, correspond en fait au contenu du tableau de commande de la première machine de Turing. Il suffira alors, si l'on veut, de présenter le ruban supportant la description de n'importe quelle machine de Turing devant la tête de lecture/écriture/effacement d'une machine universelle de Turing pour voir cette dernière se comporter exactement comme la machine que spécifie justement la suite de symboles présente sur le ruban qu'elle est en train de lire. Pour paraphraser John von Neumann, on dira qu'une machine de Turing est universelle si, quant on lui fournit les fonctions définissant une machine de Turing spécifique, elle fonctionne comme l'objet décrit. Remarquons alors que si l'ordinateur est une instantiation *finie*²²⁷ de machine universelle de Turing, ses programmes, eux, constituent des machines de Turing spécifiques. De ce point de vue, un programme informatique n'est rien d'autre qu'une construction logique conçue pour réaliser une tâche particulière. Quant un ordinateur exécute un programme, il devient donc, pendant un intervalle de temps fini, la machine logique

²²⁷ Puisque matérielle, et donc nécessairement limitée en puissance de traitement et en capacité de stockage (alors que la longueur de la bande de la machine universelle est posée comme étant infinie).

Qu'est-ce qu'un ordinateur ?

spécifique que *représente* ce programme. Il fait alors exactement ce pour quoi celle-ci a été conçue. Ceci est valable pour tout ordinateur existant, et pour tout programme informatique.

Partie 2.

Du calculateur à l'ordinateur.

« *First look backward in order to look forward.* »

- Thomas J. Watson Sr.

Avant propos.

Surprenante situation en vérité que celle dans laquelle se découvre l'épistémologue lorsqu'il entreprend d'interroger ce que l'on a déjà nommé ailleurs le « phénomène » informatique²²⁸ en vue d'en reconstruire ou d'en retracer non pas l'Histoire, mais, plus humblement, et par la force des choses aussi, *une* histoire. Vouloir œuvrer dans ce domaine, vouloir procéder à la cartographie circonstanciée de ce milieu, c'est en effet se retrouver d'emblée positionné dans un registre caractérisé précisément par une bien étrange bipolarité : d'un côté en effet, l'on est confronté à une réelle profusion de matériaux extrêmement diversifiés, tous susceptibles à un titre ou à un autre d'être légitimement soumis à l'investigation scientifique et de se voir intégrés comme tels dans l'étude dont l'élaboration est à faire. Nous voici alors placés en quelque sorte aux antipodes de la situation dans laquelle peuvent se trouver pris, dans une certaine mesure, le paléographe, le paléontologue ou bien encore, pour reprendre la belle expression d'André Brahic, « l'archéologue du ciel²²⁹ ». Sorte de contraste saisissant entre une rareté fréquemment extrême du matériau nourricier déterminant de façon impérative l'économie expérimentale et théorique de ces disciplines et la prodigalité excessive du gisement dans lequel peut puiser sans vraiment craindre de l'épuiser l'archéologue de l'informatique. Ecart prodigieux aussi entre la vastitude des régions spatiales et temporelles que ces sciences de tous les lointains parcourent pour arracher leurs

²²⁸ Chazal, G., *op. cit.*, p.7.

²²⁹ In Yves Michaux et Al., *Qu'est-ce que l'Univers*, Coll. « Université de tous les savoirs », Vol. 4, « Enfants du Soleil ? Histoire de nos origines. » par André Brahic, 189^{ème} conférence, Paris, Odile Jacob, février 2001, p. 298.

objets exceptionnels, dispersés et engloutis par la terre ou le vide sidéral, et la très brève séquence constituée par les quelques décennies communément consacrées où vient se condenser la kyrielle de données à laquelle nous faisons référence plus haut. Dans cette conjoncture apparemment avantageuse, profitable, la tâche de l'archéologue se trouve en réalité compliquée, voire même menacée, par l'étendue considérable et le caractère réellement inextricable de cette surabondance d'informations dont une très grande partie est pourtant si commodément accessible²³⁰. Le risque d'indécision, celui de la décision aussi, la confusion, l'étouffement, le débordement liés au surgissement de la multitude enchevêtrée au cœur de l'espace discursif pèsent ainsi de tout leur poids sur le projet scientifique, menaçant de violer à la fois la précision et la rectitude qui en assurent la solidité et la stabilité. S'il s'agissait encore et seulement de trier, de classer, de sélectionner, de répertorier, d'agencer, bref d'organiser ou d'*in-former*, au sens aristotélicien, le foisonnement et la voluminosité des données brutes disponibles selon des lignes d'ordonnement éprouvées et assurées – ordre linéaire chronologique par exemple - en vue de conférer à cet ensemble une structure susceptible d'être exploitée avec tout le bénéfice scientifique que l'on est en droit d'attendre d'une pareille démarche, la tâche serait sans nul doute immense, certes, mais néanmoins envisageable en droit. Ce minutieux processus de recueil, d'émondement et de distribution élémentaires serait plus concevable encore si l'on n'omet pas de prendre en ligne de compte le fait que l'artefact informatique et sa stupéfiante puissance de traitement, comme nous le notions plus haut, pourraient être convoqués à volonté pour le mener à terme. Or, à notre sens, les choses, lorsqu'il est question de l'informatique et *a fortiori* de son histoire, ne sauraient supporter de faire l'objet d'une saisie investigatrice opérée par le truchement d'une méthodologie aussi frontale et simplificatrice – laquelle possède cependant ses vertus propres - s'il l'on entend véritablement préserver dans leur plénitude et leur originalité les traits véritablement distinctifs du déploiement de cette florissante lignée technologique. Avouons à ce point, et là nous nous décalons pour désormais nous installer dans l'influence directe du second pôle du registre dont nous parlions plus haut afin de tenter d'en apprécier la composante paradoxale, que nous avons eu beau jeu de recourir peut-être un peu abusivement aux champs lexicaux du buissonnant, du multiple et de l'envahissant pour procéder à l'état

²³⁰ Nous précisons ici que cette affirmation peut être considérée comme tout à fait recevable tant qu'il s'agit strictement du *hardware*. Dès lors que nous évoquons le *software*, elle ne saurait être maintenue. En effet, dès le début des années 80, l'U.S. *Patent Office* a découvert qu'une très grande partie de ce que les praticiens américains désignent sous l'appellation d'*Art of Programming*, à l'instar d'ailleurs du *software* conçu durant les années 50, n'était que très peu ou pas du tout documenté. A cela vient s'ajouter le fait que la plupart des ordinateurs auxquels ces logiciels étaient destinés alors ont été déclassés et donnés, ou bien vendus, parfois incomplets, à des institutions qui les exhibent lors d'expositions. Si dans ces circonstances ils demeurent visibles à tous, ils ont été, bien évidemment, depuis longtemps désactivés.

des lieux de notre domaine de recherche puisque, en dépit de tout ce que nous nous sommes efforcés d'avancer brièvement jusqu'ici, nous n'avancions pas en territoire inviolé. C'est en fait très loin d'être le cas. L'examen, critique et détaillé, d'une méthodologie très répandue, en l'occurrence celle qui se fonde essentiellement sur la notion de « générations » d'ordinateurs pour rendre compte de l'histoire de l'informatique, nous permettra de prendre la mesure du travail - colossal - qui déjà a été accompli. En même temps, et surtout, la mise en lumière des incohérences et des déficiences radicales très précisément caractéristiques de ce singulier découpage qui ne saurait être ignoré tant il se trouve massivement diffusé au sein de la littérature consacrée à l'histoire de l'informatique nous servira non seulement à préciser la méthode d'approche qui sera la nôtre (et que nous souhaitons bien entendu exempte de pareilles imperfections), mais également à définir de manière plus détaillée l'une des dimensions principales de notre domaine d'investigation, à savoir celle des machines et de leurs modalités opératoires spécifiques. Il n'est pas question, dans ce qui suit, de se livrer purement et simplement au seul constat des insuffisances que ne manque pas, malheureusement, de receler l'omniprésent accès générationnel à l'histoire des ordinateurs. Il s'agit, plus fondamentalement, de tenter de parvenir à circonscrire et à lever ce que nous croyons être une forme d'obstacle se dressant sur la route de la constitution d'une épistémologie de l'informatique véritablement soucieuse de préserver l'authenticité du développement historique de son objet. Une fois cette démarche de « déconstruction » effectivement opérée, une fois les insuffisances du découpage par générations dûment identifiées, nous nous trouverons en mesure de proposer un modèle taxinomique alternatif qui nous permettra, nous l'espérons, d'aborder l'histoire de l'informatique en en préservant à la fois la dynamique, la logique, et la vérité.

2.1. Définition et critique de la notion de « génération » d'ordinateurs : confusions et déficits fondamentaux d'une approche normative de l'histoire des ordinateurs.

Nombre d'explorateurs, dont certains praticiens de grand renom, ont foulé avant nous le sol encombré de cette « contrée informatique » immense et ont défini en nous précédant de la sorte des itinéraires plus ou moins larges, des sentes plus ou moins praticables, lesquels constituent autant de pistes offertes, autant de balises possibles, pour quiconque souhaite s'aventurer dans cet espace embrouillé en économisant conjointement son souffle et ses pas. Alors certes l'orientation et la mobilité dans ce domaine de recherche se trouvent grandement facilitées par la préexistence de ces parcours, par la prédéfini-tion de grandes structures et de secteurs aisément repérables ainsi que par le marquage rassurant que lui impriment certaines lignes de force persistantes qui le découpent en le sillonnant. Mais, bien entendu, toute médaille, et celle dont nous nous préoccupons est de taille, possède son revers : la plupart des travaux qui aspirent à retracer l'histoire de l'informatique procèdent finalement d'une matrice régulièrement partagée qui admet nombre de degrés possibles de variabilité. Ce schème récurrent, pour en illustrer ici sommairement le principe général de fonctionnement, consiste initialement en une collecte de l'information, laquelle est fréquemment réalisée par une volonté dont la faculté sélective est déjà à l'œuvre, consciemment ou non d'ailleurs. Ce recueil ou amas-sement patiemment accompli, l'allègement se poursuit alors. L'adventice, ou ce qui est estimé tel, est écarté, émondé. On s'efforce, en reprenant l'expression imagée de François Dagognet, « d'extraire l'or du sable²³¹ » et, ce faisant, on abandonne souvent trop vite dans ce processus de criblage mené parfois au moyen d'un tamis à la maille bien lâche, quelques belles pépites sur la grève. Ce qui est maintenu, saisi, et pour ainsi dire sélectivement confisqué à la matière disponible fait alors fréquemment l'objet d'une distribution chronologique ou géographico-chronologique exagérément simplifiée en se voyant ordonnancé conformément aux impératifs formels de cadres organisationnels peu divergents les uns par rapport aux autres, qui, tous, se trouvent déjà bien ancrés et par conséquent largement acceptés par la « communauté informatique ». Ainsi en est-il par exemple de cette singulière modalité d'accès à l'histoire de l'informatique, maintes fois

²³¹ Dagognet, F., *Mémoire pour l'avenir, vers une méthodologie de l'informatique*, Paris, Vrin, 1979, p. 42.

usitée²³², que Jérôme Ramunni désigne – et dénonce du même coup - avec grande justesse comme « le mythe publicitaire des générations d'ordinateurs²³³ ». Ce « mythe publicitaire», pour reprendre à notre compte l'expression utilisée par cet auteur, si largement répandu au point même qu'il trouve tout naturellement une place de choix dans nombre de dictionnaires d'informatique ou de micro-informatique²³⁴, ordonne avec une certaine fixité – et un appauvrissement qui bien sûr va de pair - le milieu informatique en vue de rendre compte de son histoire, ou plus précisément de celle du développement de ses machines. Il fonde essentiellement son discours sur une assise consolidée et finalement très peu sujette à la variation, l'architecture de type Von Neumann²³⁵, et sur la succession, présupposément continue mais encore distinctement partitionnée, des différentes techniques dont procédaient et procèdent encore²³⁶, selon cette classification de type résolument évolutif²³⁷ et linéaire, les

²³² Paul E. Ceruzzi (*A History of Modern Computing*, Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1998) a lui aussi parfois recours à la notion de génération d'ordinateurs, mais lorsqu'il fait cela (par exemple au chapitre I de cet ouvrage, page 44, il parle de "*first generation*"), M. Ceruzzi ne manque pas d'employer les guillemets. A. Tanenbaum, lui, ne les emploie pas et distingue, comme il convient, quatre "générations" : celles de tubes à vide (1945-1955), celle des transistors (1955-1965), celle des circuits intégrés (1965-1980) et, enfin, celle V.L.S.I. (1980- ?). In A. Tanenbaum, *op. cit.*, pp. 14-22.

²³³ Ramunni, J., *La physique du calcul, histoire de l'ordinateur*, Coll. « Histoire et Philosophie des Sciences », Paris, Hachette, 1989, chapitre IV., pp. 112 et 113. Précisons que M. J. Ramunni utilise malgré tout cette notion (les titres des chapitres IV, VI et VII de son ouvrage, par exemple, s'y réfèrent explicitement), mais, ce faisant, il a parfaitement conscience des erreurs et des insuffisances dont est porteuse cette approche et il ne manque donc ni d'éviter les premières, ni de combler les secondes.

²³⁴ Voir par exemple De Schryver, J., *Dictionnaire Micro-Informatique*, Coll. « Mégapoche », Paris, Sybex, 1997, entrée « Générations (d'ordinateurs) », pp. 194 et 195.

²³⁵ Les caractéristiques théoriques du dispositif architectural destiné à améliorer l'efficacité des calculateurs électroniques, lequel devait être désigné rétrospectivement comme « architecture de type Von Neumann », ont été pour la première fois exposées dans le « *First Draft of a Report on the EDVAC* », de John Von Neumann, daté du 30 juin 1945.

²³⁶ Nous nous situons, à ce jour encore, dans ce que nous conviendrons de nommer, à défaut d'une expression peut être moins sujette à controverse, « l'ère du microprocesseur ». La technique implémentée dans nos calculateurs demeure celle des semi-conducteurs de type V.L.S.I. ou U.L.S.I. tandis que le nombre de transistors par unité de surface, en vertu de la pseudo loi de Gordon Moore, double tous les dix-huit mois. La première version de cette « loi » fut formulée par G. Moore dans le numéro d'avril 1965 de la revue *Electronics Magazine*. Elle énonçait alors un doublement annuel de ce nombre et prédisait que cette tendance se poursuivrait une dizaine d'année encore. En 1975, G. Moore reconsidéra ses observations et modifiait son énoncé en conséquence : le doublement du nombre de transistors par unité de surface s'effectuait désormais tous les deux ans. Des collègues électroniciens de G. Moore réévaluèrent à la baisse cette estimation, la réduisant à dix-huit mois. C'est cette valeur qui est généralement retenue lorsqu'on évoque la « loi » de Moore (voir à ce sujet J.-P. Delahaye, « Jusqu'où l'ordinateur calculera-t-il ? », in *Pour la Science*, n°283, mai 2001, pp. 100-105). La technique employée est donc toujours celle du microprocesseur. Ce sont les techniques de lithographie optique et les longueurs d'onde utilisées à cette fin (aujourd'hui entre les ultraviolets et les rayons X ; le microprocesseur *Pentium 4* d'Intel, introduit sur le marché en décembre 2000 fut gravé avec une longueur d'onde de 180 nanomètres) qui font véritablement l'objet d'un perfectionnement continu. Les calculateurs quantiques, moléculaires, ou encore ceux à base d'acide désoxyribonucléique (A.D.N.) ou de nano composants, tous encore très largement au stade pré-expérimental, pourraient constituer la base d'un nouveau saut qualitatif – et quantitatif - dans la technique des calculateurs digitaux.

²³⁷ Chaque saut technologique, donc « générationnel » selon cette conception, s'accompagne d'un gain quantitatif d'ordre multidimensionnel. Ainsi, non seulement on est en mesure de constater une augmentation certaine de la fiabilité, de l'intégration, et donc de la vitesse ou puissance des matériels concernés mais ces accroissements s'accompagnent également d'une baisse significative de la taille et de la consommation

composants élémentaires qui furent tour à tour utilisés pour la construction des unités logiques et arithmétiques²³⁸ et/ou celle de la mémoire des calculateurs. Ainsi, conformément aux réquisits de cet accès trop commodément reçu, la première « génération » d'ordinateurs, à laquelle se trouve généralement assignée la période allant de 1946 à 1960, est celle qui consacre le règne sans partage de la technique des tube à vide (*vacuum tubes*) et qui voit l'apparition, entre autres dispositifs conçus alors pour la mémoire principale, des lignes délai acoustiques (*mercury delay lines* ou *magnetostrictive delay lines*), des mémoires thermiques ou magnétiques de type tambour (*thermal memory drum* ou *magnetic memory drum*), des tubes Wynn-Williams (*thyatron* ou *Cathode Ray Tubes*) et des mémoires à tores de ferrite (*core memory*). La deuxième soi-disant « génération » d'ordinateurs, qui est censée couvrir quant à elle l'intervalle 1958–1967, est fondée sur l'utilisation de transistors (*transfer resistor*), isolés et fichés de manière individuelle sur des cartes (on parle alors de *discrete transistor technology*). La troisième période, ou « génération » est celle qui s'étale de 1964 à 1977. Elle se trouve caractérisée par l'avènement du microprocesseur (*chip*), c'est-à-dire, par extension, des machines comportant des circuits intégrés (*integrated circuit technology*; utilisation de la lithographie optique; techniques M.O.S²³⁹, L.S.I.²⁴⁰). La quatrième « génération » de calculateurs (1971–2001...) repose quant à elle sur l'usage de composants de type V.L.S.I.²⁴¹ et U.L.S.I.²⁴².

Une première chose, assurément capitale pour la suite de notre propos, se doit d'ores et déjà d'être signalée à partir de ce point. Si l'on s'efforce de considérer avec circonspection et attention les différents dispositifs supposés caractériser successivement, et donc du même fait démarquer chronologiquement les uns par rapport aux autres les quatre grands stades historiques/techniques susmentionnés, il devient alors possible de procéder à la formulation de deux remarques préliminaires absolument essentielles. D'abord, nous constatons que ce sont *les éléments premiers fondamentalement constitutifs des unités dédiées au calcul ainsi que ceux participant des systèmes supportant la mémoire des calculateurs digitaux électroniques qui, sans conteste, composent, en les circonscrivant avec une certaine précision*

énergétique des calculateurs en même temps que décroissent les coûts de fabrication de ces derniers. Ces facteurs conjugués concourent bien évidemment à la diffusion massive des calculateurs dans les différents secteurs de l'espace social.

²³⁸ *Arithmetic and Logical Unit*. ou A.L.U.

²³⁹ Acronyme pour *Metal-Oxyde Semiconductor*.

²⁴⁰ Acronyme pour *Large Scale Integration* (intégration à grande échelle). Les composants de type L.S.I. sont caractérisés par une densité de transistors allant de 2300 (Intel 4004 - 1971) à 10⁵ unités par *chip*.

²⁴¹ Acronyme pour *Very Large Scale Integration* (intégration à très grande échelle). Pour les éléments V.L.S.I., la densité de transistors s'élève jusqu'à 10⁶ unités sur une seule puce.

²⁴² Acronyme pour *Ultra Large Scale Integration* (intégration à ultra grande échelle). Catégorie de composants à gravure submicronique.

temporelle – cette résolution tend parfois à varier légèrement d'un auteur à l'autre - *les contours des deux foyers primordiaux d'évolution de cette lignée technique*. C'est vers ces centres déterminés, où s'enracinent les problématiques informatiques premières que sont respectivement celles de la mémoire centrale et des circuits logiques et arithmétiques, que viennent essentiellement converger les formidables poussées innovatrices qui ont conféré au milieu informatique le modelé de sa courbe et la dynamique caractéristiques de son déploiement durant les soixante dernières années. Le *design* architectural des ordinateurs, quant à lui, tend à persister invariablement dans son identité, laquelle fut assez tôt cristallisée en principe, c'est-à-dire fixée en terme de structure logique²⁴³ et non pas du point de vue de la stricte réalisation matérielle, dès le milieu de l'année 1945 par John Von Neumann²⁴⁴ et certains des acteurs qui oeuvrèrent à ses côtés lors de la mise au point de l'E.N.I.A.C. et de la définition conceptuelle quasi synchronique de l'E.D.V.A.C. Précisons incidemment qu'en ce qui les concerne, les mémoires secondaires et les autres matériels périphériques (*input/output devices*), bénéficient encore assez régulièrement d'améliorations notables qui portent de

²⁴³ Dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*, John Von Neumann – le rapport ne fut pas cosigné pas les autres membres influents de l'équipe de la *Moore School* - présentait les grandes lignes théoriques d'une nouvelle machine : un *very high speed automatic digital computing system*. Ce texte ne constitue en fait rien de moins que l'acte de naissance, du point de vue théorique, de l'ordinateur moderne. Dans la deuxième partie de ce travail fondateur (*2.0 Main Subdivision of the System*), sont ainsi définis les concepts essentiels de *central arithmetical part (CA)*, de *central control (CC)*, de *memory (M)*, d'*outside recording medium (R)*, d'*input (I)*, d'*output (O)*. La notion centrale d'*element*, les principes gouvernant les interactions de ces sous-systèmes et le fonctionnement arithmétique de l'ensemble y sont également définis avec précision. Ce schéma général et détaillé, dont l'ordinateur de l'*Institute for Advanced Study* – et non l'E.D.V.A.C. - représentera la véritable concrétisation matérielle, constitue à ce jour encore l'embase conceptuel sur lequel est fondée la construction de la très grande majorité des ordinateurs existant, y compris bien entendu celle de nos *personal computers (P.C.)*.

²⁴⁴ On omet assez fréquemment, dès lors que l'on évoque le célèbre *draft* de Von Neumann, de mentionner le fait qu'Alan Mathison Turing rédigea à peu près à la même époque – son rapport définitif, qui ne connut pas moins de six versions successives, fut officiellement daté du 19 mars 1946 - un texte « concurrent » destiné aux autorités britanniques et qui définissait les lignes théoriques fondamentales d'une machine à calculer automatique qui fut par la suite réalisée au département de mathématiques du *National Physical Laboratory*. Il s'agissait du « *Proposal for Development in the Mathematics Division of an Automatic Computing Engine (ACE)* ». On sait que Turing eut accès, par l'entremise de J.R. Womersley, le directeur du département de mathématiques du N.P.L., au travail fondateur de J. Von Neumann (Womersley, comme le rappelle Jean Lassègue, fut en effet la première personne issue du vieux continent officiellement conviée à voir fonctionner l'E.N.I.A.C. *in situ* et, du même coup, à lire le *First Draft*). Au sortir de la deuxième guerre mondiale coexistaient par conséquent deux conceptions différentes de l'ordinateur, ou, plus exactement, deux compréhensions théoriques distinctes de ce que, sous peu, il deviendrait. Une des dissemblances capitales qui de fait séparaient radicalement ces deux ententes théoriques de l'ordinateur concernait la manière dont devrait être réalisé le câblage de la machine. Le projet américain impliquait en effet un recours massif au câblage électronique des fonctions pouvant être accomplies par la machine, ceci concernant tout particulièrement les opérations mathématiques les plus élémentaires. Le projet de Turing divergeait de cela puisque le câblage s'y trouvait réduit à l'extrême, l'accent étant principalement mis ici sur ce que le mathématicien de Cambridge appelait encore, en 45-46, les « tables d'instructions » (Turing emploiera le terme « programme » à partir de 1948)... En ce sens donc, et finalement de manière assez peu surprenante, l'*Automatic Computing Engine* était plus proche d'une machine universelle de Turing – dont l'intégralité du comportement est entièrement décrit par sa « table de configurations-m » - que ne l'était l'E.D.V.A.C., machine où l'aspect proprement programmation était en quelque sorte « relégué » au second plan au profit de l'implémentation matérielle des fonctions mathématiques et logiques fondamentales.

manière non exclusive sur les divers matériaux employés pour leur construction, sur leur fiabilité, leur intégration, leur temps d'accès aux données ou leur capacité de stockage, sans qu'ils fassent pour autant l'objet de mutations ou, plus simplement, de modifications techniques véritablement substantielles. Ensuite, et ce sera là la seconde observation d'importance que nous formulerons ici, remarquons que *les innovations véritables que nous nous trouvons effectivement en mesure de distinguer ne concernent, et ne concernent strictement, que ce que nous avons convenu jusque-là de désigner comme les deux premières « générations » d'ordinateurs digitaux électroniques*. Ainsi, la première « génération » d'ordinateurs, initialement caractérisée par les omniprésents tubes à vide (lesquels étaient utilisés conjointement afin de construire les unités logiques et arithmétiques et les ensembles mémoriels), se vit progressivement pénétrée par des dispositifs de mémorisation plus fiables et moins coûteux tels que les lignes délai acoustiques à mercure, les lignes délais magnétostrictives²⁴⁵, ou encore les tubes Wynn-Williams (les tubes à vide continuant cependant d'être largement employés à cette époque pour la fabrication des A.L.U.). Alors certes, de tels systèmes se trouvaient être nettement moins susceptibles de défection que ces derniers, extrêmement fragiles. Ajoutons qu'en plus de ce gain qualitatif fort appréciable qu'ils introduisaient par rapport aux délicats *vacuum tubes* ils autorisaient conjointement une capacité de stockage et une vitesse d'accès aux données nettement plus élevées. Cependant, la fonction que ces dispositifs étaient de fait appelés à remplir, à savoir celle de support mémoire, demeurait rigoureusement la même que celle qui avait été initialement assignée aux *vacuum tubes*. Plus important encore, il est primordial de constater que la manière dont ils satisfaisaient effectivement cette charge fonctionnelle particulière ne saurait être assimilée ou comprise comme un véritable facteur de mutation technologique : ainsi, leur *modus operandi* demeurait celui de la sérialité (sous la forme de la propagation ou du *scanning*²⁴⁶). Si de pareils systèmes permettaient effectivement d'accroître de manière appréciable la fiabilité, la vitesse et la capacité mémoire des calculateurs, leur introduction ne s'accompagna ni d'une refonte véritable du schéma théorique d'accès aux données à traiter, ni d'une réduction notoire de leurs dimensions spatiales (les C.R.T. étaient des objets très volumineux), et encore moins d'une simplification de la structure à laquelle ils devaient être intégrés (à titre simplement illustratif, rappelons que chaque mécanisme à lignes mercure de 10³ bits de capacité mémoire que comportait l'E.D.V.A.C.²⁴⁷ ne nécessitait pas moins de 11 tubes à vide

²⁴⁵ Conçues en 1951 par *Booth et Ferranti Co.*

²⁴⁶ Balayage.

²⁴⁷ *Electronic Discrete Variable Arithmetic Computer.*

entièrement dédiés au contrôle - détection, modulation, démodulation, *reshaping* et amplification - des signaux acoustiques représentant les données en traitement). En outre, leur manufacture n'était pas aisée et ils posaient bon nombre de problèmes techniques²⁴⁸, notamment *in situ*, qui, la plupart du temps, s'avéraient fort délicats à surmonter. Apparurent alors, et c'est là *le premier moment de véritable révolution technologique* que connaîtra selon nous l'informatique, les mémoires à tores de ferrite²⁴⁹ (*core memory*). Ces dispositifs de stockage de l'information présentaient deux propriétés absolument inédites par rapport à tous leurs prédécesseurs. Tout d'abord, il s'agissait de mémoires non volatiles. Autrement dit, l'information qui s'y trouvait stockée était maintenue dans la durée sans cependant nécessiter d'alimentation électrique permanente en vue de son rafraîchissement (et ceci à la différence des lignes délai ou des tubes). Ensuite, les mémoires à tores de ferrite étaient de type *Random Access Memory*²⁵⁰. Comme sa désignation ne l'indique décidément pas, dans une mémoire à accès aléatoire, l'accès en lecture ou en écriture à n'importe quel *bit* stocké ou devant être stocké dans le treillis mémoriel, qu'il soit par ailleurs bi ou tridimensionnel, est effectué aussi rapidement que pour n'importe quel autre. Ceci, à l'époque, constituait une amélioration absolument considérable par rapport au mode opératoire caractéristique des autres systèmes mémoriels alors en service dans la mesure où celui-ci impliquait nécessairement l'introduction d'un délai, extrêmement pénalisant pour la durée effective du calcul, lorsqu'une requête d'accès ou d'enregistrement concernant une information particulière se présentait dans un programme. Cette information spécifique – une valeur nécessaire pour effectuer une phase de calcul ou le résultat d'une opération par exemple - en même temps que les nombreuses autres données conservées dans les mémoires étaient en effet placées, selon le cas, dans une succession de cycles mécaniques ou acoustiques dont la synchronisation, quelquefois inconstante, se trouvait assurée par l'unité de contrôle du calculateur. Il était donc indispensable, comme cela se produit par exemple lorsque l'on recherche une séquence musicale spécifique sur une bande magnétique de cassette audiophonique ordinaire, de laisser le flux d'informations sauvegardées se défaire séquentiellement, avant d'atteindre

²⁴⁸ Pour les *mercury delay lines*, il s'agissait principalement des problèmes engendrés par le contact acoustique entre le mercure et les cristaux de quartz piézoélectrique et par la dépendance thermique de la vélocité du son dans le mercure.

²⁴⁹ Les mémoires à tores de ferrite furent inventées, conjointement et indépendamment, par Jay Forrester – qui en 1940, avec Gordon Brown, devait fonder le *Servomechanism Laboratory* au M.I.T. – et Andrew D. Booth, de l'Université de Londres. La phase de développement proprement dite fut menée, toujours séparément, par ce même Jay Forrester – au *Digital Computer Laboratory* du M.I.T., structure qu'il fonda en 1951 et dirigea jusqu'en 1956 – et Jan Rachman, du groupe *Radio Corporation of America*.

²⁵⁰ Mémoire à accès aléatoire, type de dispositifs mémoire plus couramment désigné au moyen de l'acronyme R.A.M.

« l'emplacement » où devait être lue ou inscrite l'information requise ou restituée par la tâche calculatoire en cours d'effectuation. Les mémoires à tores de ferrite permettaient de surmonter ce défaut majeur étroitement lié à l'accès sériel puisque, grâce à l'accès de type *aléatoire* qu'elles offraient, elles contribuaient à réduire de façon tout à fait considérable l'écart éminemment stratégique – et de ce fait largement pénalisant – qui existait effectivement entre la vitesse de fonctionnement des unités qu'elles composaient et celle des unités logiques et arithmétiques de l'ordinateur. Par voie de conséquence, non seulement la rapidité avec laquelle le calcul pouvait être mené à son terme se trouvait très sensiblement améliorée mais leur non volatilité assurait en plus la sécurisation de ce dernier, y compris en cas de panne générale du système.

La *seconde révolution technologique* que connût l'informatique est celle que permirent l'invention et l'implantation progressive du transistor (l'introduction des matériaux semi-conducteurs dans le champ informatique devait concerner dans un premier temps la seule partie électronique des ordinateurs, plus particulièrement les unités arithmétiques et logiques, puis, plus tard, la mémoire centrale). La stupéfiante montée en puissance de cet agencement inédit entraîna, outre une réduction considérable de la consommation énergétique des ordinateurs (et donc des contraintes de refroidissement qui lui étaient nécessairement attachées²⁵¹), une diminution cruciale de la taille de ces derniers (on sera désormais autorisé à parler de *miniaturisation* des composants), ainsi qu'un accroissement formidable de leur fiabilité et de leur vitesse ou fréquence de fonctionnement (les distances que les électrons avaient à parcourir entre les éléments s'amenuisèrent spectaculairement). Plus profondément encore, trois effets décisifs pour la suite de l'histoire de l'informatique devaient s'ensuivre du développement et de l'utilisation du transistor.

Très rapidement, on comprit que cet élément ne pouvait être directement et simplement substitué aux tubes à vide comme cela avait pu être par exemple le cas pour les lignes délais à mercure, les C.R.T., ou les mémoires à tores qui remplacèrent tout ou partie des tubes à vide employés dans les systèmes mémoire. Leur implantation dans les calculateurs nécessitait au contraire que l'on identifie d'abord avec précision la structure existante devant être effectivement transformée puis que l'on procède ensuite à son portage vers la toute nouvelle technique des semi-conducteurs en tenant précisément compte des contraintes

²⁵¹ Plus une machine consomme d'électricité, plus elle génère de chaleur. Or celle-ci est très fréquemment à l'origine de pannes qui peuvent être, sinon sérieuses, du moins considérablement incommodes (l'E.N.I.A.C., par exemple, consommait 150 kWh et comportait 17468 tubes à vides. Si l'un d'entre eux venait à claquer, sa localisation pouvait s'avérer très fastidieuse alors que paradoxalement son remplacement ne nécessitait que quelques minutes à un opérateur expérimenté. Le temps de calcul en était proportionnellement affecté).

physiques propres à cette dernière. Cette opération n'impliquait donc, ni plus, ni moins, qu'un processus de refonte intégral de la conception des circuits logiques et arithmétiques des machines. Dès lors, on l'aura compris, il ne s'agissait plus, *mutatis mutandis*, d'opérer une simple substitution destinée à remplacer un certain type d'éléments matériels constitutifs d'une unité fonctionnelle par un autre, plus performant, plus fiable, éventuellement moins onéreux, mais bel et bien, en vue précisément de rendre cette substitution possible, d'identifier puis de repenser le schéma fondamental des structures où elle devrait finalement prendre place. Une autre conséquence notable de l'utilisation des éléments transistorisés – un peu plus tardive celle-là - fut l'homogénéisation croissante des machines dont le transistor permettait désormais l'élaboration. Jusqu'à l'advenue de celui-ci, les calculateurs électroniques digitaux consistaient en effet en des assemblages à la fois extrêmement massifs et composites. On y voyait fréquemment coexister, dans des assemblages qui avaient décidément tout de pesants Léviathans, à la fois baroques et fragiles, une multitude combinée de tubes à vide, de lignes délais mercurielles ou magnétiques, de mémoires à tores de ferrite, de C.R.T., etc. Le transistor, en remplaçant progressivement ces dispositifs à la fois lourds et par trop diversifiés, contribua à spectaculairement réduire cette hétérogénéité complexe jusqu'à finalement parvenir à instaurer un véritable régime d'uniformisation des composants des unités fonctionnelles principales des machines. Le substrat employé pour construire d'abord les mémoires puis les unités arithmétiques et logiques fut désormais le même, avec tous les bénéfices de rapidité, d'intégration et de fiabilité que l'on pouvait attendre d'un pareil processus d'unification.

Enfin, le transistor, par le biais de la miniaturisation qu'il impliquait nécessairement du fait même de sa conformation, introduisit conjointement la notion de modularité (ou d'interchangeabilité) et celle d'automatisation de la fabrication dans le secteur informatique. Modularité puisque les circuits électroniques complexes constitués de transistors (comme par exemple pouvait l'être un circuit additionneur), pouvaient être méthodiquement réduits à des sous-ensembles plus simples et aisément interconnectables (des cartes par exemple). Ces sous-ensembles étaient par conséquent facilement remplaçables par d'autres éléments totalement identiques pour le cas où l'un d'entre eux viendrait fortuitement à tomber en panne. Automatisation ensuite puisque l'un des traits saillants qui pouvait bien caractériser le transistor, il en est toujours ainsi aujourd'hui d'ailleurs, à savoir ses dimensions extrêmement modestes, constituait parallèlement le talon d'Achille de son propre processus de confection. Les jonctions entre les éléments transistorisés étant minuscules, leur fabrication était donc extrêmement délicate et forcément très sensible à de mauvaises manipulations. L'introduction

d'une procédure de production en série recourant à la technique de la lithographie pour fabriquer ces éléments permit de remédier efficacement à ce problème délicat en même temps qu'elle conforta le principe de leur interchangeabilité. Dans un dernier temps, c'est l'ordinateur transistorisé lui-même qui fut utilisé pour contrôler non seulement son propre assemblage mais également travailler à son propre perfectionnement matériel. Comme l'écrivait récemment Ray Kurzweil:

« *The first computers were designed on paper and assembled by hand. Today, they are designed on computer workstations with the computers themselves working out many details of the next generation's design (sic) and are produced in fully automated factories with human guidance but limited direct intervention*²⁵² ». Voyons là, encore, un très bel exemple de récursivité !

Afin de résumer ce que nous venons d'énoncer, et en schématisant quelque peu bien entendu, il ne serait nullement excessif d'affirmer que les deux premières « générations » d'ordinateurs furent commandées et travaillées en profondeur par l'impérieuse nécessité de résoudre promptement les difficultés techniques à la fois primitives et capitales posées par la mise au point et l'interaction des dispositifs mémoriels et des circuits arithmétiques et logiques employés dans les premiers dispositifs digitaux électroniques. C'est alors dans l'ouverture de la troisième « génération » que vinrent effectivement se condenser dans la matérialité des machines les solutions les plus optimales qui avaient été apportées antérieurement à ces problématiques. Et c'est dans cette même ouverture que se firent jour à leur tour les interrogations attachées à la fois à la gestion de cette structure formidablement complexe qu'était l'ordinateur et au développement du logiciel²⁵³ qui non seulement en permettait, mais, également, en simplifiait l'emploi. La « génération » suivante, s'il faut encore la distinguer²⁵⁴, ne constitue en fait que l'aboutissement, en terme d'intégration, de perfectionnement des dispositifs et des concepts qui leur sont directement liés, des processus initiés et continués lors des « trois premiers moments » de l'histoire de l'informatique. Nous affirmons par conséquent que si le concept de « génération d'ordinateurs », avec tout ce qui le fonde et l'accompagne, doit encore être provisoirement accepté, le nombre de celles-ci ne

²⁵² Kurzweil, R., *The Age of Spiritual Machines : When Computers Exceed Human Intelligence*, New York, Penguin Book, 1999, p.32.

²⁵³ Nous entendons ici non seulement les compilateurs/interpréteurs, les O.S. (*Operating Systems*), les langages de haut niveau, mais également le *software* dédié à des applications spécifiques.

²⁵⁴ Nous en nions l'existence et la pensons plutôt comme la continuation, dans le perfectionnement, des processus réellement novateurs initiés plus tôt.

saurait aucunement prétendre équivaloir à quatre. Comme nous venons en effet de le voir, l'informatique n'a connu que deux moments technologiques révolutionnaires : ceux que bornent respectivement l'avènement et le développement des mémoires à tores de ferrite et du transistor, et ceux-là uniquement. Ce sont ces deux types de dispositifs inédits, dont le premier sera utilisé comme support privilégié de la mémoire centrale des calculateurs et l'autre comme élément constitutif de leurs unités arithmétiques et logiques puis, ensuite, de leurs mémoires, qui, chacun, constituèrent les vecteurs d'introduction d'une transformation radicale, à la fois *quantitative* et *qualitative*, dans la complexion des machines que secrétait un milieu informatique alors en plein processus d'élaboration. Tous les autres éléments matériels fondamentaux dont nous avons pu faire mention jusqu'ici – comme par exemple les *vacuum tubes*, les lignes délai acoustiques, les mémoires tambour thermiques ou magnétiques, les tubes Wynn-Williams, les thyatron, les *Cathode Ray Tubes* ou encore les *chips* - et qui représentent usuellement les points focaux autour desquels viennent s'installer les différents champs chronologiques auxquels correspondent respectivement les quatre « générations » de calculateurs, n'impliquèrent aucunement, à proprement parler, la survenue d'une mutation technologique équivalente. Certes, ces dispositifs permirent souvent d'améliorer très sensiblement les performances des calculateurs auxquels ils se virent, tantôt successivement, tantôt conjointement, implantés. De la même manière, ils contribuèrent à réduire de manière notable, et de plus en plus certainement, leur contrariante faillibilité laquelle, assez « malicieusement » il est vrai, possédait la détestable tendance consistant à presque toujours se rappeler au bon souvenir des malheureux opérateurs de ces instruments aux moments les plus inopportuns. Mais le bénéfice véritable qu'ils autorisèrent finalement, puisqu'il s'en trouvait un qui fut effectivement identifiable, participait foncièrement de l'ordre du *quantitatif* – vitesse d'opération et fiabilité des machines se trouvaient parfaites – et non pas de celui du *qualitatif*. Entendons par là que l'économie fondamentale des ordinateurs digitaux électroniques, leur schéma fondamental même, leur structure logique, n'en furent pas bouleversés alors que ce fut indubitablement le cas lorsque mémoires à tores de ferrite et transistors furent successivement introduits et de plus en plus largement utilisés. .

2.1.1. De l'étrange chevauchement chronologique des « générations » d'ordinateurs.

Ceci ayant été spécifié, nous nous trouvons également en mesure de procéder au repérage d'un trait singulier qui ne manque pas d'être surprenant concernant le découpage somme toutes précis – qui ne saurait toutefois aucunement prétendre à une quelconque exclusivité puisqu'il ne constitue après tout qu'une instance possible de ce mode d'appréhension de l'histoire de l'informatique - proposé par M. De Schryver. Les différentes phases distinguées ici, sans exception aucune, débordent toutes les unes sur les autres avec une amplitude plus ou moins marquée. Ainsi la première « génération » couvre-t-elle la période allant de 1946 à 1960 – l'E.N.I.A.C. fut officiellement dévoilé à la presse américaine le 1^{er} février 1946 puis il fit l'objet d'une présentation formelle lors d'une cérémonie solennelle qui se tint le 15 février 1946 dans le Houston Hall de l'Université de Pennsylvanie - alors que la deuxième « génération » débute en 1958 et s'achève en 1967. La troisième « génération » de machines apparaît en 1964 et s'éteint en 1977. La quatrième « génération », celle-là même à laquelle appartiennent encore nos ordinateurs actuels, s'ouvre en 1971. Il est légitimement envisageable de rendre compte de ces empiètements répétitifs – qui tout de même vont de deux à six ans - en convoquant, tout au moins dans un premier temps, deux facteurs d'explication élémentaires. Ainsi, et ceci constitue le premier élément d'interprétation que nous avancerons, lors même qu'une technique (ou encore ses avatars amendés), peut effectivement être qualifiée de dominante, c'est-à-dire qu'elle constitue pendant un intervalle de temps donné la base technique fondamentale à partir de laquelle vont être élaborés les éléments primordiaux entrant dans la construction de la mémoire principale et des unités arithmétiques et logiques de calculateurs électroniques pleinement opérationnels (c'est le cas des tubes à vide et des lignes délai acoustiques pour la première « génération » de calculateurs), d'autres dispositifs élémentaires et fondamentaux (par exemple le transistor, qui fut inventé en 1947), sont conçus et font ensuite parallèlement l'objet d'un processus de développement. Ensuite, et c'est là le second facteur d'éclaircissement, ces derniers sont progressivement substitués²⁵⁵ aux éléments clefs des ordinateurs représentatifs de la « génération » en cours (ce fut le cas par exemple pour la mémoire principale de l'E.N.I.A.C., qui fut partiellement dotée d'éléments à tores de ferrite en 1953), tandis que dans le même

²⁵⁵ Concernant les matériaux semi-conducteurs, et plus spécifiquement le transistor à base de silicium, nous rappelons encore que leur introduction impliqua bien plus qu'un simple processus de substitution aux anciens éléments de base des calculateurs puisque leur emploi nécessita que l'on réétudie en profondeur, et à partir de leurs spécificités propres, le design des circuits logiques et arithmétiques des machines.

temps ils sont perfectionnés²⁵⁶, fiabilisés sans cesse, et s'imposent peu à peu, du fait même des gains de performance, d'intégration, et de réduction de coût qu'ils autorisent de plus en plus, comme le paradigme technologique sur la base duquel sont fabriqués des prototypes de machines préfigurant l'advenue d'une « nouvelle génération » d'ordinateurs. Pendant un laps de temps donné, qui peut en fait durer quelques années mais demeure néanmoins relativement bref, technique établie et technique embryonnaire, ou, si l'on préfère, technique en cours de développement, se trouvent donc de fait placées dans un singulier rapport de coextensivité chronologique au point même qu'elles viennent quelquefois coexister au sein d'une même machine. Il survient cependant un moment où il est possible de constater que la nouvelle technique commence graduellement à supplanter l'ancienne. Les prototypes, et surtout les machines de série qui en sont finalement dérivées, rendues extrêmement attractives à cause de leurs performances remarquables, investissent alors peu à peu les centres de recherche, les agences gouvernementales ou encore, quoique plus tardivement, les secteurs industriels et commerciaux. Mais cette pénétration ne s'effectue pas de manière brutale. Compte tenu du coût élevé des ordinateurs, des contraintes pesantes liées à la fois à leur mise en place et aux changements d'habitudes (toujours longues à définir et à acquérir), qu'implique leur exploitation optimale, leur déclassement²⁵⁷, et donc leur renouvellement au profit de dispositifs plus compétitifs, se voit fréquemment retardé au maximum. Ce sont là, très succinctement exposées, quelques-unes des raisons essentielles qui permettent de comprendre pourquoi il ne saurait être véritablement surprenant de voir coexister durant une même période et de façon de plus en plus concurrentielle, des lignées de calculateurs qui ne participent pas de la même technique fondamentale et, donc, qui n'appartiennent pas à la même « génération » de machines. Cela nous autorise également à rendre compte d'une façon qui serait nécessaire mais non pas suffisante des empiètements générationnels que nous nous sommes efforcés de signaler plus haut. La situation est en effet bien plus complexe que ce que nous l'avons jusque là laissé pressentir. Les « générations » d'ordinateurs, que l'on présente très fréquemment comme étant aisément repérables sur un *continuum* temporel couvrant *grosso modo* une soixantaine d'années, ne se plient pas aussi docilement que cela est trop souvent supposé au processus qui vise à leur affecter – en les définissant du même coup - des

²⁵⁶ Le transistor à base de germanium sera remplacé par le transistor à base de silicium, moins coûteux et plus facile à produire en masse, annoncé en mars 1954 par la firme américaine *Texas Instruments* lors de la *National Conference on Airborne Electronics*.

²⁵⁷ Le cas de certains calculateurs intégrés au système de défense américain S.A.G.E. (*SemiAutomatic Ground Environment*), parfois désignés sous l'appellation de Whirlwind II, est particulièrement explicite : le premier prototype fut livré par I.B.M. à l'armée américaine en 1955 tandis que la machine de série était disponible en 1956 (la première fut livrée à la *McGuire Air Force Base* en juin). Le dernier ordinateur original du système S.A.G.E. fut retiré en 1983 pour être remplacé par un modèle plus récent !

segments chronologiques précisément déterminés. On remarque au contraire qu'elles s'interpénètrent profondément (première, deuxième et troisième « génération »), voire se confondent d'une manière nettement plus durable (ainsi en est-il de la troisième et de la soi-disant quatrième « génération » au sujet de l'existence de laquelle nous émettons d'ailleurs de sérieux doutes tant elle semble n'être que le simple prolongement de la troisième). Ces enchevêtrements, généralement repérés mais ordinairement passés sous silence, ne sauraient se voir légitimement explicités en avançant simplement le fait qu'un certain nombre de phases historiques juxtaposées correspondant prétendument à autant de révolutions technologiques successives auraient vu leurs extrémités respectives, peu ou prou, déborder accidentellement les unes sur les autres. Loin d'être aussi indifférentes ou triviales que ce que la littérature consacrée nous enjoint souvent à penser, ces franges superposées, ces limites supposées qui se couvrent ainsi les unes sur les autres, sont en fait porteuses de singularités qui se révéleront tout aussi essentielles que profondément significatives pour la suite de notre propos.

2.1.2. De la contemporanéité des deux moments essentiels de l'histoire de l'informatique.

Si les intervalles assignés à ces quatre grands moments historiques²⁵⁸ de l'informatique peuvent sensiblement varier en extension d'un auteur à l'autre²⁵⁹, en fonction par exemple du niveau de « résolution temporelle et technologique » adopté par ceux-ci, il n'en demeure pas moins que le schème commun d'exposition s'apparente souvent à un déroulement chronologique très faiblement différencié, résolument linéaire et synoptique, et parfois modulé par des thématiques ou des critères²⁶⁰ qui répondent à des orientations d'ordre

²⁵⁸ Un projet d'ordinateur de « cinquième génération » fut initié en 1978 par le M.I.T.I. (Ministry of *International Trade and Industry*), ministère japonais de l'industrie et du commerce extérieur. Les fonds alloués étaient colossaux puisque le projet, qui devait aboutir dans les années 90 à une machine de type K.I.P.S. (*Knowledge Information Processing Systems*), bénéficiait d'un financement de 450 millions de dollars apportés par le M.I.T.I. tandis qu'une somme équivalente devait être investie par les industriels partenaires (*Fujitsu, Hitachi, N.E.C., Mitsubishi, Oki, Toshiba*). Nous reviendrons sur ce point plus tard.

²⁵⁹ Ce qui bien entendu ne manque pas de rendre ce découpage – ou plutôt ces découpages – encore plus suspects à nos yeux étant donnée l'absence d'une quelconque forme de consensus solidement établi et unanimement reconnu concernant les limites temporelles précises devant être définitivement assignées à ces périodes.

²⁶⁰ Par exemple, deux critères au moins peuvent être distingués qui permettent d'apprécier pleinement la variabilité saisissante à laquelle peuvent être effectivement soumis les bornages censés circonscrire en les démarquant les différentes périodes où sont habituellement inscrites les soi-disant générations d'ordinateurs. Si l'on adopte comme critère premier de sectorisation générationnelle la production de séries commerciales (proposée par J. Ramunni), la première génération d'ordinateurs trouve son lieu propre dans l'intervalle 1951 – 1959 (*L'Universal Automatic Computer*, c'est-à-dire l'UNIVAC I d'Eckert-Mauchly Computing Corporation est livré en mars 1951 à l'U.S. *Census Bureau*). A partir de là, on se trouve déjà en mesure de constater un net décalage avec l'intervalle correspondant que nous indiquions plus haut (1946 – 1960), qui est celui proposé par M. De Schryver dans son *Dictionnaire Micro-informatique*. Le choix effectué par M. De Schryver, consistant à proposer l'année 1946 comme borne inférieure de la période convenant à la première génération d'ordinateurs,

technique, industriel ou social par exemple. Tout se passe alors comme s'il était effectivement possible, et cela sans entraîner de préjudices réels pour le rendu fidèle de la dynamique de l'évolution historique de cet objet composite et étonnamment hétérogène qu'est l'ordinateur, d'inscrire dans un processus de succession continue, dépourvue d'aspérités, d'irrégularités ou de fractures, le cortège en vérité extrêmement disparate des multiples machines construites depuis le milieu des années quarante²⁶¹. Dans la plupart des cas de figure, le discours vient alors se conformer aux exigences inhérentes à ce type de distribution : la série, la linéarisation, en même temps que l'écrêtage des singularités ou des pics jugés insuffisamment significatifs prévalent absolument tandis que les ruptures, les écarts en apparence infertiles, les empiètements, la coextensivité, la réticularité, escamotés ou laissés à leur enfouissement pourtant à portée, décelable, sont ignorés. C'est alors, pour faire nôtre le terme de Gaston Bachelard, un véritable régime de *mutilation* qui s'instaure. Ce processus abrasif est opiniâtrement sélectif. Il désagrège et sépare en taisant trop fréquemment le complexe, en rejetant souvent les verticalités riches de complexités, les transversalités, les hybridations, les croisements et les simultanités, bref les spécificités, les saillies et les modelés, qui par leur

indique clairement qu'il y inclut l'E.N.I.A.C. (ce calculateur électronique, nous l'avons déjà dit, fut dévoilé au public le 15 février 1946 à la *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie). Or, bien sûr, l'E.N.I.A.C. n'a *jamais* été – en fait il ne pouvait être – une machine destinée à être commercialisée (construit pour l'U.S. *Ordnance Department of the War Department* sous le numéro de contrat W-670-ORD-4926, l'E.N.I.A.C. fut principalement utilisé pour effectuer des calculs liés à des domaines sensibles par le *Ballistic Research Laboratory* et le *Los Alamos Research Lab*. Son impact sur les communautés industrielles, scientifiques et militaires, nous y reviendrons, fut considérable dans la mesure où il constituait la preuve matérielle de la faisabilité et de la supériorité indéniables – accroissement de la précision et de la vitesse des calculs – des calculateurs électroniques). De tout cela, il ressort clairement qu'en fonction des orientations spécifiquement adoptées par les auteurs en vue de rendre compte de l'histoire de l'informatique, l'étendue des séquences temporelles discriminées ne demeure jamais constante. Comme on vient de le constater, l'approche que l'on pourrait qualifier de globale – en l'occurrence celle de De Schryver – qui inclut donc l'E.N.I.A.C. – majore la première période remarquable de l'histoire de l'informatique de cinq années par rapport à la perspective qui privilégie l'abord fondé sur les séries commerciales. Un deuxième critère, parmi bien d'autres envisageables, autorisant une entrée différenciée en vue de procéder à un ordonnancement de l'histoire de l'informatique est celui qui consiste à privilégier la production de prototypes. Là encore, la durée des phases effectivement distinguées s'en trouve souvent sensiblement modifiée (on constatera, selon les cas considérés, un phénomène de « contraction » ou de « dilatation » des séquences chronologiques distinguées). Dans tous les cas, le choix initial de l'angle d'approche, fut-il composite, hybride, détermine de façon impérieuse la manière dont se voit élaborée cette histoire.

²⁶¹ A titre indicatif et en nous basant sur un travail effectué par Bruce Watson, qui s'est lui-même appuyé sur deux articles rédigés par le Dr. Kenneth E. Knight, parus dans la revue américaine *Datamation* (« Changes in Computer Performance », septembre. 1966 et « Evolving Computer Performance 1963-1967 », janvier 1968), nous nous sommes livrés à une énumération des calculateurs ayant existé de la fin des années 30 à nos jours. En complétant nous-mêmes ce listage, nous sommes parvenus à ce jour à dénombrer 1014 machines. Hans B. Pufal (1995, 1996, 1997) a enrichi d'une manière absolument remarquable le travail initié par Bruce Watson amenant le nombre de machines ainsi recensées à 4335 ! Pourtant, cette liste n'est encore pas close puisque bon nombre de calculateurs d'origine européenne – entre autres les machines de l'ère soviétique – n'y figurent pas encore. La liste de H. B. Pufal peut être intégralement téléchargée, en même temps qu'un dispositif de navigation intégré très fonctionnel, à partir de l'adresse suivante : <http://www.digiweb.com/~hansp/ccc/cclist.htm>. La *Big List* de Bruce Watson, toujours archivée, peut être consultée à partir des liens suivants : <http://gn.update.uu.se:70/0/chp/art/bwatson> ou <http://freeflight.com/fms/comp/misc/List.txt>.

existence même résistent peu ou prou au laminage d'un domaine d'étude dont il semble parfois qu'on le voudrait trop parfaitement glacé et orienté. Précisons qu'il continue à fonctionner dans l'épure temporelle horizontale qu'il vise à construire en triant encore, dans l'énorme population souvent frappée de « consanguinité théorique » des calculateurs électroniques, les machines qui lui paraissent les plus particulièrement dignes d'attention. Inutile bien entendu de préciser ici que dans nombre de travaux consacrés à l'histoire de l'informatique, quant il ne s'agit pas purement et simplement d'études intégralement dédiées au développement d'une seule machine, les calculateurs qui font l'objet de toutes les attentions sont très souvent les mêmes. La figure organisationnelle dominante est donc unidimensionnelle, lisse, sérielle, ne faisant pli sur elle-même qu'en de trop rares occasions. Elle oscille comme une longue corde aux nœuds parfois fort nombreux, très spécifiquement partitionnée selon la modalité générationnelle déjà mentionnée, sous les impulsions disjointes qu'impriment sélectivement sur ses séquences constitutives des transitions technologiques pensées comme étant de nature distributive mais qui ne sont parfois pas aussi instauratrices que ce qu'on le laisserait volontiers supposer. De toute façon elle persiste dans son unicité initiale, toujours accompagnée par l'ombre portée immense et homogène de l'architecture de type Von Neumann qui vient certifier à tout instant ses étranges prétentions continuistes ; ambitions que nous qualifions « d'étranges » puisqu'en même temps qu'elles visent à instaurer une succession chronologique quasi continue dans l'espace des artéfacts informatiques, elles informent ou discriminent en amont cette régularité supposée en la discrétisant ostensiblement à au moins quatre reprises afin d'en faire ressortir plus encore la nature prétendument consécutive. Le fil chronologique ainsi pourvu de marques saillantes commodément repérables est alors déroulé placidement, régulièrement, et scandé de manière arithmique par des références souvent très renseignées des points de vue historique et technique concernant directement les « machines qui ont vraiment compté », (*Milestones of the History of Computing* diraient les américains). Pourtant les éléments historiques – pour tout dire artéfactuels - ne manquent pas, qui permettent de révéler immédiatement et de façon très éclatante les défauts ou déficits fondamentaux dont sont intrinsèquement porteuses ces modalités d'appréhension pour le moins statiques et appauvrissantes de l'histoire de l'informatique.

La prise en compte privilégiée des séries prototypiques, dont les machines sont spécifiques par excellence, mises pour l'occasion en dialogue avec les séries commerciales, accomplit à cet égard une fonction révélatrice tout à fait intéressante en ceci qu'elle s'avère être tout particulièrement féconde dans le cadre de la problématique qui est la notre. Dès lors

que l'on accorde à ces lignées l'attention qu'elles méritent véritablement, autrement dit dès lors que l'on accepte l'éclatement, fut-il transitoire, du prisme courant qui établit et conforte les habitudes occurrentes de linéarité totalisatrice et de lissage, les choses ne se présentent plus de la même manière. Evidemment, la simplicité toute relative de leur mouvement rectiligne supposé se décompose – au sens organique du terme - en même temps que l'on s'établit de plein pied au confluent des zones d'influence des problématiques techniques, absolument fondamentales en informatique, relatives à la mémoire centrale et à l'unité logique et arithmétique. Un exemple tout particulièrement significatif peut être mentionné ici : en janvier 1954 les *Bell Laboratories* produisirent pour le compte de l'*U.S. Air Force* le tout premier ordinateur entièrement transistorisés. Il s'agissait du TRADIC (pour *TRANSistorized Digital Computer*). Cet ordinateur d'un genre nouveau fut d'ailleurs suivi en novembre de la même année par le TRANSAC (*TRANSistor Automatic Computer*) de la *Philco Corporation*, lui aussi équipé de diodes et de transistors à point de contact²⁶² au germanium. Or, ne manque pas de noter avec fort à-propos J. Ramunni, « *on constate que le premier ordinateur à tores de ferrite n'a été achevé qu'en novembre 1954*²⁶³ ». Que faut-il, dès lors, comprendre à la lumière de cela ? Qu'est-ce que ces faits techniques et historiques pour le moins surprenants impliquent au final pour une pensée qui a choisi de faire de l'histoire de l'informatique son champ et son objet d'investigation ?

La conséquence majeure - et incontestable - de ceci est la suivante : le transistor²⁶⁴ se voit largement employé dans des ordinateurs destinés aux laboratoires de recherche des forces armées américaines *avant* même que les mémoires à tores de ferrite, un peu plus anciennes²⁶⁵

²⁶² Il convient cependant de rappeler, comme le fait J. H. Felker (« Performance of TRADIC System », *Proceedings Eastern Joint Computer Conference*, 1954, pp. 46-49), que les transistors de contact (*junction transistor*) n'étaient pas des éléments très fiables et qu'ils étaient en outre extrêmement difficiles à produire en grande quantité. Cette précision permet de relativiser encore plus le propos.

²⁶³ J. Ramunni, *La physique du calcul*, op. cit. p.112. Il s'agit de la machine commerciale E.R.A. 1103 (*Engineering Research Associates* était une division de la *Remington Rand Corporation*), qui fut livrée à la fin de l'année 1954 au N.A.C.A. (*National Advisory Committee for Aeronautics*). Cette machine utilisait des mémoires à tores de ferrite en lieu et place des mémoires à tubes Williams qui avaient été initialement employées pour E.R.A. 1101 (destiné à des travaux scientifiques et d'engineering) et les premiers E.R.A. 1103 (deux versions du 1103 existaient dès le milieu de l'année 1952, une à vocation scientifique et l'autre commerciale. Quelques vingt machines de ce type furent construites et livrées à des agences militaires et des compagnies aérospatiales). Suivant les conseils du N.A.C.A., E.R.A. modifia substantiellement le 1103. Ces modifications furent ensuite implantées comme des caractéristiques standard sur le modèle 1103-A.

²⁶⁴ Le transistor (avec comme élément de base un cristal de germanium) fut élaboré aux *Bell Laboratories* par J. Bardeen, W.H. Brattain et W. Shockley en 1947. Une demande de brevet fut déposée l'année suivante.

²⁶⁵ Les mémoires à tores de ferrite, non volatiles, furent développées vers la fin des années 40 aux Etats-Unis (*I.B.M.*, Université de l'Illinois, Harvard, M.I.T., etc.). Héritières indirectes de dispositifs de contrôle de tir développés et utilisés par la marine allemande pendant la deuxième guerre mondiale (lesquels étaient basés sur des matériaux magnétiques exhibant la propriété d'hystérésis), elle furent installées dès 1952 sur le Harvard Mark IV, puis, en 1953, sur l'E.N.I.A.C. (pour le stockage des résultats intermédiaires et servir de *buffer* rapide aux unités d'entrée/sortie. Elles furent conçues pour cette machine par la *Burroughs Corporation*) et sur le

mais plus fiables et moins coûteuses, ne se voient implantées dans un ordinateur électronique commercial pleinement opérationnel. Selon cette perspective singulière – mais néanmoins entièrement légitime- la seconde génération d'ordinateur verrait donc le jour avant la première ! Bien entendu, un simple exemple, fut-il aussi sûrement et spectaculairement explicite, ne saurait ici comme ailleurs prétendre à être érigé en référent absolu. Mais à partir de la simple considération de ce dernier, on se trouve peut-être en mesure d'apprécier plus précisément et aussi plus pleinement les risques - simplification exagérée et écrasement de la dynamique de déploiement du milieu étudié - inhérents à une approche méthodologique de l'histoire de l'informatique, de celle de ses artefacts, qui aurait essentiellement recours, sans trop de discernement ni de précautions élémentaires, à la catégorie pourtant prépondérante de « génération d'ordinateurs » afin de conduire l'intégralité de son discours. Nous l'avons déjà affirmé précédemment, cet accès que nous qualifions plus haut de frontal pour tenter d'en souligner avec plus de force la nature que nous jugeons « abrupte » et dangereusement réductrice, recèle cependant des caractéristiques propres dont certaines se révèlent, jusqu'à un certain point, tout à fait profitables pour quiconque souhaite s'instruire ou faire oeuvre dans ce domaine technique particulier. Ainsi, il est sans nul doute permis de discerner une valeur opératoire indiscutable quant à l'immense travail de défrichage, d'éclaircissement, que cette multipartition générationnelle, à la fois fixatrice et fluente, renseignée et ignorante, a incontestablement permis d'accomplir dans ce champ formidablement embrouillé qu'était – et est toujours - l'histoire de l'informatique. Mais le prix à payer pour parvenir à un résultat qui demeure finalement très insuffisant du simple point de vue historique, pour ne pas dire scientifique, comme nous nous sommes précisément efforcés de le démontrer jusqu'à présent, est incontestablement celui correspondant à une simplification et une exténuation injustifiées du champ de recherche qui revêt bien trop souvent – à vrai dire presque systématiquement - un caractère outrancier qui nous paraît insupportable. En conséquence, et à la rigueur, qu'il nous soit alors permis de qualifier ce type d'approche de « prolégomènes sommaires », ou encore, pour reprendre l'expression kantienne, de simple « vestibule » d'une histoire des

Whirlwind I (Whirlwind Core Plane, M.I.T., 1953 et Whirlwind Core Memory Stack, M.I.T, 1953.). Dans les deux cas, il s'agissait d'*upgrades* ou de perfectionnements de machines précédemment équipées de tubes à vide. Notons qu'à la fin de l'année 1945, Whirlwind, projet initié en 1943, avait déjà fait l'objet d'une refonte théorique considérable puisque autrefois prévu comme un calculateur analogique (en fait une machine analogique couplée à un simulateur de vol devant opérer en temps réel), il avait été transformé en calculateur électronique digital (il utilisait des *Cathode Ray Tubes* (C.R.T.) spécialement développés au M.I.T., 4500 tubes à vide et 14800 diodes cristal). Le Harvard Mark IV constituait quant à lui une évolution du Harvard Mark III (mis en service en mars 1950 au *Naval Proving Ground de Dahlgren*, Virginie). Il reprenait bon nombre des caractéristiques techniques propres à cette machine hybride (Mark III utilisait en effet 5000 tubes à vide et 2000 relais électromécaniques) avec cependant une exception notoire : des mémoires à tores de ferrite y furent employées pour construire 200 registres.

ordinateurs, dont il n'offre à voir, en tentant de la constituer comme il le fait précisément, qu'une perspective tronquée, fragmentaire, diminuée et, par dessus tout, inconsistante. Dans ce qui précède, précisons-le, nous n'avons jamais eu l'intention de nourrir une perspective – présomptueuse à notre sens - qui aurait consisté à nous ériger définitivement en adversaires déterminés de cet accès amplement sanctionné. Notre dessein, assurément, était plus modeste : tout au plus s'agissait-il ici d'interroger ce découpage particulier afin de mettre en lumière les contradictions et les défauts fâcheux dont il est, de par sa nature même, assurément porteur. Nécessaire, il l'est, ou l'a été, sans nul doute possible. Mais il ne saurait néanmoins prétendre, en même temps, à la suffisance. Toutefois, à force de le ratifier de manière active ou passive, en l'acceptant sans jamais le remettre en question ou en y ayant recours sans précaution aucune, sans l'interroger pour le pousser dans ses derniers retranchements, nous courons finalement le risque, *nolens volens*, de concourir à institutionnaliser plus encore – si c'est encore chose possible – une forme de « myopie » théorique dont l'histoire de l'informatique ne pourra que souffrir au final.

Désormais pourvus de tous ces éléments de révision assurément saillants, nous nous trouvons en position de comprendre avec netteté la nature fondamentalement « mythique », au sens que l'on pourrait assigner à une construction de l'esprit ne reposant pas sur un fond de réalité mais qui serait néanmoins extrêmement populaire (donc forcément publique), du schème quadripartite qui prévaut de manière étonnement hégémonique – *Abusus non tollit usum* - sous une modalité ou sous une autre, dès lors qu'il est question d'étudier l'histoire de des ordinateurs et celle de l'informatique. Etrangement, l'apparente richesse qu'offre cet accès trop souvent entériné – il distingue comme nous l'avons déjà expliqué quatre divisions décisives au sein de cette fantastique aventure technologique – sacre en la masquant la simplification immodérée qu'il tend, assez malheureusement à notre sens, à diffuser massivement. Comprendons par là que l'approche bimodale que nous lui avons opposé, en identifiant seulement deux fractionnements essentiels dans ce mouvement en lieu et place des quatre « attracteurs » courants, préserve en fait l'originalité et la complexité propres d'un processus dynamique qui, invariablement, tend à se désagréger, à se déformer et à s'aplatir, bref à se dénaturer, sitôt qu'il se trouve saisi dans un schéma pareillement simplificateur. Le délaissement de la figure quadripartite au profit de la distribution bipartite - articulée autour de ces deux révolutions technologiques que furent selon nous l'apparition des mémoires à tores de ferrite et du transistor - en vue de rendre compte de l'histoire et de l'irrésistible montée en puissance de l'informatique ne saurait alors être compris et assimilé à l'élection d'une visée encore plus réductrice que celle à laquelle elle est censée se trouver substituée.

Elle est même tout le contraire de cela puisqu'en s'établissant de la sorte, elle ouvre sur un espace pourtant déjà largement parcouru dont la teneur profonde, labyrinthique et composée, demeurerait désespérément tue ou déformée. D'une certaine manière, ici, une approche épistémologique qui privilégiera une taxinomie du « moins » se révélera très certainement plus riche, plus féconde et plus fidèle à la vérité de son objet qu'une épistémologie qui se constituera préférentiellement sur la base d'une classification du « plus », laquelle, en définitive, conduit quasi invariablement, on l'a vu, à faire trop bon marché de la variété quelque peu « embarrassante » qui caractérise justement l'espèce technique au sein de laquelle elle est censée mettre bon ordre.

2.1.3. Vers la spécification d'une nouvelle méthode pour appréhender l'histoire de l'informatique: éléments de réflexion sur les trois informatiques, leur interdépendance, et celle de l'histoire de l'informatique et des ordinateurs.

La question qui est la nôtre maintenant concerne fondamentalement la définition d'une taxinomie et d'une méthodologie alternatives – en ceci qu'elles sont supposées pouvoir être substituées avec un bénéfice certain au schéma générationnel quadripartite dominant dont nous nous sommes efforcés de dénoncer à la fois les insuffisances et les apories - qui permettraient de faire retour, en les préservant et en les garantissant du mieux qu'il serait possible, sur l'histoire des artefacts de l'informatique et celle de l'informatique. Cette problématique fondatrice, loin d'être triviale ou auxiliaire, est au contraire assurément cruciale : la ou les solutions que nous serons peut être en mesure de lui apporter détermineront de façon nécessaire notre compréhension de la manière dont s'est historiquement constituée l'informatique – autrement dit notre philosophie de l'informatique - et, par voie de conséquence, celle de la société massivement informatisée dans laquelle nous vivons aujourd'hui. Une intelligence véritable du phénomène informatique, fut-ce et peut-être surtout dans une perspective philosophique qui s'espère résolument actuelle, passera donc certainement par une prise en compte minutieuse, et autant que faire se peut fidèle, du faisceau de circonstances historiques, économiques, sociales, et scientifiques, pour ne citer que celles-là, qui ont formé le terreau formidablement fécond duquel devait enfin surgir l'ordinateur digital électronique et ses avatars fascinants. Conjointement, et pour ainsi dire d'une manière qui serait coextensive à la dynamique quelque peu tortueuse de ces ensembles conjoncturels aux frontières parfois incertaines, parfois fluentes, il sera impératif de

considérer avec l'attention la plus exigeante, la plus appliquée, les machines qu'ils ont, au gré de leurs changements nombreux et précipités, produits. Dans cette perspective, il ne faudra pas non plus omettre de prendre en considération le fait absolument saillant que ces dispositifs nombreux, une fois conçus, une fois pleinement opérationnels, ont, par un formidable effet de *feedback*, radicalement métamorphosé les foyers institutionnels et gouvernementaux desquels ils étaient fondamentalement originaires.

Nous affirmons qu'une philosophie de l'informatique qui prétendrait se constituer sans tenir compte concurremment des uns et des autres – c'est-à-dire des faits, des artéfacts et de leurs interactions complexes - serait inmanquablement vouée à manquer la réalité passée et présente, mais les deux sont forcément liées, de son objet. Nos sociétés occidentales, il semble assez déraisonnable à ce jour d'imaginer contester ceci, se trouvent aujourd'hui pleinement pénétrées par la culture – pour ne pas dire l'imaginaire - dont l'informatique est porteuse. Or toutes ces valeurs, ces attitudes, ces modèles, ces présupposés fondamentaux avoués ou non – parmi lesquels les moindres ne sont pas une certaine conception de l'Homme qui n'a de cesse d'affirmer en silence sa maladie imperfection originaire ainsi que la prétention à consacrer les modèles rationaliste et logiciste, pour le coup mécanisés, comme les formes les plus abouties et les plus efficaces de la pensée en oeuvre – qui forment en s'agréant ce que l'on conviendra de nommer de manière encore un peu vague la « culture informatique » ne datent pas, loin s'en faut, d'hier ou même d'avant-hier. On aurait d'ailleurs tort, à ce titre, de se laisser aller à confondre un peu rapidement et complètement culture informatique et culture de la micro-informatique. Certes, cette *invention française* – et non pas américaine comme on tend aujourd'hui trop souvent à le croire - fut indiscutablement le vecteur privilégié qui permit enfin à l'informatique de diffuser largement dans toutes les couches et tous les secteurs de la société, modifiant ainsi irréversiblement, sûrement pour le meilleur mais peut-être aussi pour le pire, l'image que l'opinion publique pouvait bien avoir à l'époque de ces machines intimidantes, énigmatiques et de toute façon inaccessibles. Pour faire usage ici de quelques analogies un peu élimées, nous pourrions dire qu'elle fut donc - et qu'elle est toujours - le fer de lance, la partie émergée de « l'iceberg » informatique, celle-là même à laquelle tout un chacun a finalement affaire sous une modalité ou une autre dans son quotidien le plus ordinaire. En se faisant ainsi instrument domestique, presque au même titre que le téléviseur, le réfrigérateur ou l'automobile, témoins matériels incontournables symbolisant pour les *middle classes* occidentales une certaine forme de réussite sociale, l'ordinateur, devenu *micro-ordinateur*, a considérablement altéré et ébranlé les données sociales et politiques qui

caractérisaient les grandes démocraties industrialisées de la deuxième moitié des années 70, à commencer bien évidemment, on s'en doute, par celles des Etats-Unis d'Amérique.

Avec l'avènement annoncé et inévitable de l'informatique particulière, l'ordinateur, miraculeusement réduit à quelques unités fonctionnelles hautement intégrées aisément manipulables et utilisables, se fit docile, enfin apprivoisable par tous. Les enfants et les adolescents qui grandirent durant cette époque dorée ne s'y trompèrent d'ailleurs pas puisqu'ils furent souvent les premiers à être fascinés par ces machines un peu étranges, un peu sibyllines, dont ils ne tardèrent pas, parfois au grand dam et à l'étonnement des adultes, à faire leurs indéfectibles compagnons de jeux. A partir de 1977, si l'on songe par exemple et entre autres machines au TRS 80 Model 1 de Tandy Radio Shack ou à l'Apple II, construit et vendu par la célèbre firme éponyme, il devint effectivement possible, pour quiconque le souhaitait, d'acquérir en échange d'une somme relativement modeste une machine de ce genre toute prête à l'emploi²⁶⁶. Demeurait alors à se procurer les rares logiciels qui à cette époque étaient disponibles sur le marché pour ces machines, ou bien à les programmer soi-même en fonction

²⁶⁶ Peut-être nous reprochera-t-on ici de ne pas évoquer deux machines – le MITS Altair et l'IMSAI 8080 – autour desquelles devaient venir, à partir du milieu des années 70, se cristalliser certaines innovations techniques, aussi bien matérielles que logicielles, qui devaient plus tard caractériser véritablement les micro-ordinateurs. Concernant la micro-informatique, on sera peut-être ainsi tentés de distinguer – bien que là encore il faille bien s'entourer de quelques précautions – trois périodes successives. La première, celle à laquelle appartenaient justement l'Altair et l'IMSAI 8080, correspondrait ainsi à la phase « expérimentale » de la micro-informatique. Des micro-systèmes tels que le TRS 80, l'Apple II ou encore le Commodore PET seraient quant à eux représentatifs de la deuxième époque, celle où les machines de ce genre commençaient à bénéficier d'un niveau élevé d'intégration, où elles étaient souvent dotées en série de moniteurs, d'unités de stockage sur bande, d'un système d'exploitation élémentaire et d'un langage de programmation de haut niveau (très souvent un BASIC directement implanté sur une ROM). Quant à la troisième phase on pourrait considérer qu'elle s'ouvre en août 1981 avec l'annonce faite par I.B.M. de l'introduction imminente d'une nouvelle machine qui fera date, le *Personal Computer*, plus communément désigné sous l'acronyme P.C. C'est cependant vers l'Altair, une machine américaine qui fut pour la première fois proposée à la vente dans le numéro de janvier 1975 du magazine américain *Popular Electronics* sous la dénomination de *minicomputer* (il empruntait en effet nombre des caractéristiques « esthétiques » au mini computer Nova de Data General), que convergèrent pour la première fois les forces qui devaient finalement donner naissance au champ prolifique de la micro-informatique. Rappelons que c'est pour cette machine, construite autour d'un microprocesseur Intel 8080, que Bill Gates et Paul Allen développèrent dès 1975, sur un D.E.C. PDP-10 de l'université d'Harvard, un BASIC qui devait faire la fortune de Traf-O-Data, une entreprise créée en 1972 et qui devait devenir en juillet 1975 la firme Microsoft (forme abrégée de *Micro-computer* et de *Software*). C'est pour cette machine également (en fait c'était pour l'IMSAI, un clone légèrement amendé de l'Altair), que Gary Kildall développa en 1977 une version révisée du CP/M (pour *Control Program for Micro*) qu'il avait créé en même temps que le PL/M (*Programming Language for Machine*), pour le microprocesseur Intel 8080 sur un I.B.M. System/360. Cette version spéciale du CP/M, qu'il appela BIOS (pour *Basic Input/Output System*) permettait de piloter en mode textuel plusieurs lecteurs de disquettes de 8 pouces. En moins de trois mois, la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems*, la firme d'Albuquerque qui commercialisait l'Altair, enregistra plus de 4000 commandes qu'elle eut d'ailleurs bien du mal à honorer. Ce phénomène sans précédents contribua cependant à constituer un solide noyau de passionnés qui ne tardèrent pas à s'organiser en club (dont le plus fameux fut peut-être le célèbre *Homebrew Computer Club* de Menlo Park, en Californie), pour s'échanger des conseils ou bricoler, le terme n'est pas trop fort ici, diverses interfaces destinées à cette machine. Nous aurons largement l'occasion de revenir là-dessus plus tard mais qu'il nous soit permis de dire ici pourquoi nous n'avons pas fait mention plus haut de l'Altair : vendu d'abord par correspondance, il était essentiellement proposé en kit et devait donc être assemblé dès réception. Il s'adressait donc en tout premier lieu à un public de spécialistes, amateurs ou professionnels, qui possédaient de solides connaissances en électronique.

de ses besoins propres, ce qui eut été de toute façon absolument unimaginable seulement quelques années auparavant...

De cela il résulta progressivement, mais inévitablement, l'émergence de nouvelles attitudes, de nouvelles postures désinhibées et audacieuses face à un artefact autrefois secret et effrayant, ainsi que la définition de nouveaux usages – révolutionnaires - pour celui-ci. Cette irrépressible inscription de l'ordinateur dans cet espace social et politique principal qu'est la cellule familiale devait, comme l'écrit très justement Philippe Breton : « *bouleverser le paysage*²⁶⁷ »: « *Les changements qu'il [i.e. le micro-ordinateur] a introduits à partir de 1975 concerneront l'ensemble de l'informatique et pas seulement les « petites » applications*²⁶⁸ ». Mais la micro-informatique, sa « culture », et toutes les valeurs et idéologies – souvent réactionnaires, souvent farouchement individualistes et anti-centralistes voire même franchement libertaires - qu'elle a pu ou peut bien encore véhiculer aujourd'hui grâce à Internet n'ont pas surgi comme ça, *ex-nihilo*, de la volonté de quelque génial illuminé réchappé du *Flower Power* que les improbables muses de l'ingéniosité, peut-être séduites par le doux et généreux soleil californien, auraient tout soudainement inspiré. Comprenons par là qu'elle n'a pas fait, loin s'en faut, *tabula rasa* de cette histoire, de cet héritage, qu'elle jugeait tout à la fois encombrants et dangereux.

Dans *Une histoire de l'informatique*²⁶⁹, Philippe Breton a procédé au repérage de trois grandes périodes – qu'il nomme respectivement première, deuxième et troisième informatique – pour rendre compte du déploiement, des métamorphoses et de la montée en puissance ininterrompue de l'informatique, une notion « *vague*²⁷⁰ » comme il le rappelle lui-même, très sûrement irréductible à la seule histoire des ordinateurs électroniques digitaux tant il est nécessaire, pour prétendre l'appréhender vraiment, de tenir compte de bien plus de choses que les seuls facteurs techniques qui ont pu à un moment ou à un autre caractériser les dispositifs auxquels elle a donné naissance. Ce faisant, il démontre fort bien comment la micro-informatique – laquelle participe, avec les réseaux et les compatibilités matérielles et logicielles, de la définition de la troisième informatique - et la (contre-)culture extrêmement riche qu'elle a peu à peu secrétée s'est progressivement construite en réaction contre la première et la deuxième informatique, lesquelles se distinguaient par une propension immodérée au secret et une tendance quasi pathologique à retenir l'information qu'elles détenaient de façon exclusive et hégémonique. Aux vénérables figures du militaire, de

²⁶⁷ [Breton, 1990], p. 223.

²⁶⁸ *Ibidem*.

²⁶⁹ *Ibidem*.

²⁷⁰ *Ibidem*, p. 10.

l'ingénieur et du mathématicien (première informatique), à celle, incontournable, de l'informaticien expert et gestionnaire (deuxième informatique), devaient tout d'abord se trouver opposée celle de l'activiste contestataire devenu fortuitement « informaticien » et « technophile » pour les besoins de la cause, puis, un peu plus tard, celle de l'amateur compétent. La micro-informatique naissante devait ainsi trouver dans certaines couches de la population américaine, tout particulièrement dans la strate estudiantine protestataire que l'horreur et l'intolérable gratuité de la guerre du Vietnam avaient définitivement sensibilisée aux mensonges d'Etat et à l'impérative nécessité de voir l'information, quelle qu'elle soit, circuler enfin librement dans la société, un sol particulièrement favorable sur lequel prendre pied et s'épanouir pleinement. Révolution informatique au coeur de la révolution informatique en marche, la micro-informatique, frondeuse par excellence, s'est précisément forgée et élaborée contre l'informatique d'Etat, contre l'informatique de l'armée et des laboratoires qu'elle subventionnait, contre celle des grands groupes industriels et des multinationales marchandes, contre celle, pour finir, des savants, des technocrates et des experts, que ces derniers soient par ailleurs civils ou militaires. L'information, ou plutôt sa libre circulation, sa disponibilité pour tous, c'est-à-dire finalement la communication de cette information, était l'enjeu véritable et ouvertement revendiqué de cette étrange guerre civile « politico-socio-technologique », tout ou presque s'étant en effet déroulé à l'origine aux Etats-Unis. L'histoire, à ce qu'il semble, ne paraît pas dénuée d'un certain sens de l'ironie puisque c'est avec leurs propres armes revisitées pour l'occasion, les ordinateurs - ces machines ultimes permettant de traiter mais aussi de concentrer l'information - que les radicaux californiens fréquemment issus du mouvement pacifiste combattirent et défirent jusqu'à un certain point leurs adversaires puissants et impersonnels. Nous aurons très largement l'occasion de revenir plus tard et en détail sur le rôle fondamental que joua ici le micro-ordinateur aussi bien dans le domaine de l'informatique que dans celui de l'espace social. La question est assurément d'importance dans la mesure où l'apparition de la micro-informatique, le contexte dans lequel cela s'est produit, les raisons profondes qui en furent à l'origine, représentent certainement quelques-uns de facteurs les plus essentiels permettant de comprendre comment, d'une société de l'information en train de se faire – par le biais des première et deuxième informatiques - on est finalement passé à une société de la communication (bien que l'on persiste quasi inlassablement à employer des qualificatifs tels que « société de l'information » pour définir les communautés où nous vivons aujourd'hui, celles-ci sont en fait plus certainement des sociétés de la communication, autrement dit des sociétés où l'information, sauf exception remarquable, se trouve être totalement libérée et par

là même accessible à tous. La société nord-américaine, de la fin des années quarante au milieu des années soixante-dix, pour ne pas remonter ici jusqu'à la dernière décennie du 19^{ème} siècle, *était* une société de l'information : celle-ci s'y trouvait en effet complètement centralisée et, si elle devait se trouver d'une façon ou d'un autre distribuée, c'était de manière rigoureusement contrôlée et à destination des seuls organismes ou personnes dûment qualifiés). En attendant de reconsidérer cette question de manière plus circonstanciée, une chose, dans l'immédiat, se doit d'attirer notre attention. Si la micro-informatique s'est effectivement bâtie en réaction contre les excès – parfois justifiés - de la première et de la deuxième informatique, elle en est cependant, d'une façon qui mériterait d'être qualifiée selon le cas de « positive » ou de « négative », la directe descendante. De ces informatiques étatiques, froides et congénitalement marquées du sceau du secret contre lesquelles elle s'éleva avec tant de véhémence, et, il faut bien le concéder, de succès, elle hérita non seulement les techniques, qu'elles soient matérielles ou logicielles et, parfois aussi, les hommes²⁷¹. Là, sans doute, pourront être repérés les signes les plus patents de son legs « positif », de tout ce qu'elle doit effectivement à ces informatiques marmoréennes et impénétrables dont la dangerosité présumée ou réelle qu'elles faisaient peser sur les libertés individuelles fut à la fois, tout au moins initialement, son principe et son moteur. En plus de cela, et d'une certaine manière, elle contenait et contient peut-être même toujours en négatif, sous une forme assimilée et résiduelle, toutes ces valeurs, toutes ces postures décisionnelles, toutes ces organisations pesamment hiérarchisées et contrôlées qu'elle combattit et qui constituèrent tout en même temps sa raison d'être et son intarissable source nourricière.

La troisième informatique s'inscrit par conséquent dans la directe continuité des deux premières – celles-ci la contenaient en germe et elles en précipitèrent finalement le surgissement lorsque les conditions techniques, sociales et culturelles furent enfin réunies- en même temps qu'elle constitue une rupture technique et sociale radicale avec ces dernières. A la lumière de cela, on comprendra peut-être tout naturellement que ces trois informatiques ne sauraient être raisonnablement dissociées tant elles se trouvaient viscéralement liées les unes des autres. L'exercice consistant à les analyser de manière disjointe, bien sûr, pourra sûrement être mené avec un certain succès pour la première informatique, c'est-à-dire celle des précurseurs immenses que furent entre autres John Von Neumann, Prosper J. Eckert, John W.

²⁷¹ Nous songeons par exemple à Joseph Weizenbaum qui, en plus d'avoir sérieusement posé la question du bien-fondé même de la tendance logiciste « dure » (*hard A.I.*) poursuivie par l'intelligence artificielle – une discipline dont il fut une des figures dominantes et qu'il attaqua très durement dans son ouvrage *Computer Power and Human Reason* – fut un des premiers hommes de métier à s'interroger en profondeur sur les usages qui étaient faits des ordinateurs dans le champ du social.

Mauchly, Herman H. Goldstine, Maurice Wilkes ou encore Alan Mathison Turing. Sa primauté chronologique sur les deux autres informatiques semble, au moins en principe, parfaitement autoriser la conduite d'un tel projet. Mais vouloir étudier la deuxième et/ou la troisième informatique en faisant avarement l'économie des phases qui les ont de fait précédées est une entreprise de recherche qui selon nous est irrémédiablement vouée à une certaine forme d'échec. C'est en effet à une totalité presque organique que nous avons à faire ici, et non à un ensemble certes complexe mais qui se prêterait sans risque de dommages pour son intégrité et sa bonne compréhension aux assauts cumulés d'investigations dont la sectorisation excessive et une certaine propension à «l'isolationnisme» seraient les instruments de prédilection. Ceci, cependant, n'interdit nullement la mise en oeuvre d'entrées globales ou de perspectives diagonales et circonstanciées pour pénétrer et soumettre ce domaine à l'examen. Il convient seulement de garder à l'esprit qu'en cette matière, et autant que faire se peut, l'arbre ne doit jamais cacher la forêt et qu'en juste retour, celle-ci ne doit pas dissimuler ce dernier à la vue de l'explorateur.

On aura peut être également compris, à la lecture de ce qui vient juste d'être précisé, que nous considérons l'accès à l'informatique ménagé par M. Philippe Breton comme extrêmement pertinent. Ce découpage de l'histoire de l'informatique en trois phases, pour tout dire en «trois informatiques», nous paraît en effet être tout aussi fonctionnel qu'il peut nous sembler légitime sur le plan théorique. Nous n'attendrons donc pas plus pour affirmer clairement que nous le ferons nôtre et, qu'à ce titre, nous l'intégrerons – en bonne place – dans notre propre méthode d'approche. Sur ce point donc, nous nous réclamons ouvertement de cet auteur et reconnaissons sans difficulté aucune la dette intellectuelle que nous contractons ainsi envers lui. En revanche, nous ne saurions le suivre plus avant lorsque, tout juste avant d'introduire et de présenter son approche tripartite de l'histoire de l'informatique, il écrit la chose suivante:

« Chacun sait que jusqu'à présent les grandes étapes du développement de l'ordinateur étaient décrites en terme de « générations ». On parlait ainsi de « première génération » pour les machines à tubes électroniques, de « deuxième génération » pour les ordinateurs à transistors, jusqu'à la fameuse « cinquième génération » annoncée par les constructeurs japonais. Cette classification reste tout à fait opératoire pour scander le rythme de l'évolution des composants électroniques.²⁷² ».

²⁷² Ibidem.

En effet, pour « nourrir » son modèle – l'histoire de l'informatique n'est pas *seulement* l'histoire des ordinateurs mais on ne peut raisonnablement revenir sur la première sans faire nécessairement appel à la seconde – M. Breton recourt au classique schéma quadri-générationnel, ce qui, du coup, ne manque pas de faire courir à son discours, au demeurant fort éclairé et réellement très intéressant, le risque de se voir entaché des erreurs et des raccourcis indésirables que propage implicitement et quasi inéluctablement ce type d'entrées²⁷³. On aura d'ailleurs bien soin de noter en passant que dans la citation qui vient juste d'être produite, M. Breton fait systématiquement usage des guillemets lorsqu'il évoque, à plusieurs reprises d'ailleurs, les différentes « générations » d'ordinateurs. Ceci semble indiquer qu'en définitive il n'est pas dupe de la portée et de la valeur véritables de ce genre de découpages. Comme il l'écrit en fait un peu plus loin, cette classification, finalement, « *reste tout à fait opératoire* » pour rendre compte du développement et du perfectionnement des composants électroniques et des calculateurs dans lesquels ils furent intégrés. D'un certain point de vue, qui serait global, intentionnellement « peu » regardant concernant le détail du déroulement véritable de cette histoire, cela est juste : l'emploi de ce modèle est dans une certaine mesure parfaitement justifié et force nous est faite de concéder encore qu'il remplit assez bien son office. Mais dans tous les cas de figure, il est capital de bien conserver présent à l'esprit le fait qu'en procédant de la sorte c'est inmanquablement à une *approximation* de cette histoire - plus ou moins recevable - que l'on parviendra finalement et non à un compte rendu qui lui serait vraiment fidèle et en permettrait ainsi une analyse solidement fondée, c'est-à-dire, autant qu'il est possible, une analyse qui serait à la fois sûre d'elle-même et de son objet. Remarquons qu'il ne s'agit pas ici pour nous de soutenir - un peu inconsidérément - la position qui consisterait à affirmer que la seule et unique méthode sérieusement envisageable pour parvenir à saisir, s'il en est une, la Vérité de l'histoire du développement des calculateurs digitaux – et donc plus largement celle de l'informatique, puisque la première participe de la seconde et la construit pour ainsi dire de l'intérieur – consisterait à s'emparer par le « menu » de toutes les machines ayant existé jusqu'à ce jour, à en analyser les « entrailles » ainsi que les contextes multiples dans lesquels elles ont été fabriquées (avec une méticulosité qui devrait confiner à la maniaquerie), puis, sur la base de cet ensemble colossal de matériaux bruts patiemment collectés, à construire un système qui permettrait enfin d'en révéler puis d'en examiner toutes les subtilités relationnelles. Si en droit pareille entreprise – dont l'envergure même n'est pas sans comporter quelques connotations « hégéliennes » - nous

²⁷³ On a vu plus haut que, selon les auteurs, les bornes chronologiques assignées aux quatre phases qui y étaient couramment distinguées pouvaient parfois subir de surprenants déplacements.

paraît effectivement relever du domaine du possible, en fait, nous émettons certaines réserves quant aux conditions mêmes de sa réalisabilité tant la tâche envisagée nous paraît être tout aussi immense qu'elle peut être difficile (ne serait-ce que parce que certaines informations et travaux pourtant déjà anciens font encore l'objet d'une classification militaire outre-atlantique et outre-manche). Si un tel travail doit un jour se voir couronné de succès, et après tout pourquoi pas, ce sera à coup sûr le résultat du labeur patient et concerté d'une pluralité d'acteurs oeuvrant en réelle synergie - chercheurs, praticiens, utilisateurs professionnels et amateurs, industriels, militaires, etc. - et non celui d'un individu isolé qui serait exceptionnellement résolu et endurant. A notre sens, une approche transdisciplinaire de cette problématique toute aussi démesurée qu'elle peut être urgente constituera sûrement une des clefs de sa possible résolution.

Ceci étant posé, il nous faut encore signaler deux choses importantes. Pour commencer, les remarques que nous venons tout juste de formuler ne diminuent en rien la valeur et la légitimité propres qui sont celles, nous le croyons, de la découpe tripartite que Philippe Breton a proposé pour appréhender le champ de l'informatique en tant que celui-ci peut effectivement être pensé comme une totalité où sont susceptibles d'être reconnus de grands moments placés les uns par rapport aux autres dans certains schémas relationnels impliquant à la fois succession et interdépendance. Ensuite, il est vrai que dans *Une histoire de l'informatique*, cet accès original se trouvait articulé à la répartition multi-générationnelle des ordinateurs, c'est-à-dire celle-là même que nous nous sommes efforcés de critiquer plus haut. Dans ce contexte précis, l'histoire des machines structurée en fonction de cette distribution quadripartite était ainsi appelée à jouer le rôle d'une infrastructure ou, si l'on préfère, d'un fond technique précisément balisé, à partir desquels pouvait être entretenue et illustrée l'analyse des trois informatiques précédemment distinguées par l'auteur. Mais il est impératif de bien voir que ceci ne saurait aucunement impliquer que pour prétendre à comprendre l'une - à savoir l'informatique et ses trois grandes figures consécutives - il faille impérativement convoquer l'autre, c'est-à-dire l'approche générationnelle courante. Le fait que cette dernière soit aujourd'hui prépondérante ne signifie pas, loin s'en faut, qu'elle soit définitivement incontournable. Réaffirmons-le encore ici, l'informatique et son histoire ne se résument pas, tout du moins totalement, dans celle pourtant fondamentale des ordinateurs digitaux électroniques qu'elle a successivement ou concurremment engendrés en se développant. Non pas qu'il faille ici obligatoirement, pour tenter d'appréhender avec justesse l'informatique et son histoire, « remonter » à des dispositifs calculatoires aussi anciens et vénérables que peuvent l'être l'abaque ou le boulier ou encore, à l'inverse et de façon tout

aussi radicale qu'insoutenable, évacuer purement et simplement la totalité de leurs multiples productions matérielles pour ne se consacrer qu'à l'étude de leurs aspects sociaux ou culturels par exemple. Faire cela, pour user ici d'une analogie qui emprunte à un autre champ du technique – au demeurant lui aussi grand consommateur de puissance de calcul, embarquée ou non - ce serait comme aspirer à réfléchir sur l'histoire de l'aviation, depuis le Wrights/Flyer I des frères Wright jusqu'aux derniers prototypes de chasseurs américains X-32 ou X-35 préfigurant les appareils de combat de la future famille des *Joint Strike Fighters*, en imaginant pouvoir faire l'économie d'un discours circonstancié sur les aéronefs qui ont marqué d'une façon ou d'une autre cette formidable épopée technique et humaine. Ce serait, nous le croyons, chose proprement inimaginable. Ce que l'on nomme « informatique », certes, recouvre bien d'autres choses, bien d'autres « dimensions », que les seules machines auxquelles elle a tour à tour donné naissance. Mais ceci ne signifie nullement qu'il faille, ou plus simplement encore que l'on puisse, se passer de considérer l'histoire des ordinateurs pour construire ou reconstruire celle de l'informatique : en effet ce sont ces dispositifs, rétroactivement et parmi d'autres facteurs essentiels, qui ont façonné ses configurations consécutives, qui ont autorisé ou provoqué ses spectaculaires mutations. La nécessité de cette prise en compte possède par conséquent tout d'une absolue exigence et nous nous faisons un devoir de la recevoir comme telle. En revanche ce qu'il est permis de clairement discerner ici, c'est qu'une histoire de l'informatique qui chercherait à se composer ainsi – mais pourrait-il en être autrement ? - ne se trouverait aucunement mise en demeure de le faire sur la base exclusive de telle ou telle histoire des ordinateurs ou, plus précisément, de telle ou telle distribution permettant d'organiser l'histoire de cette lignée technique. En d'autres termes, s'il s'avère absolument indispensable de comprendre et d'intégrer l'histoire des ordinateurs à celle de l'informatique pour prétendre rendre compte fidèlement de cette dernière - et inversement, puisque rétroactions nombreuses et absolument décisives il y a entre cet édifice et la multiplicité de ses productions techniques - il ne s'avère cependant nullement impératif de recourir à un schème organisateur spécifique pour ordonner cette classe de machines afin de parvenir enfin à l'intelligibilité du domaine plus vaste duquel elle participe foncièrement, c'est-à-dire l'informatique. Partant, on pourra par conséquent « faire » une histoire de l'informatique en se basant par exemple sur une distribution générationnelle et quadripartite des machines. C'est là justement la démarche générale suivie par M. Philippe Breton dans l'oeuvre précitée. Hormis le fait que cet accès particulier nous paraît être très incertain pour les raisons que nous avons avancées plus haut, nous ne trouvons là rien à redire. De la même manière, et toutes choses étant égales par ailleurs, il sera tout à fait envisageable de tenter de

retracer l'histoire de l'informatique, en y distinguant éventuellement les mêmes grandes phases décisives que celles qu'a selon nous fort justement repérées cet auteur, en fondant le discours exploratoire sur une classification des ordinateurs qui obéirait cette fois-ci à une modalité de répartition différente de celle que nous venons de mentionner en la critiquant. Rien, ni en droit ni en fait, ne semble devoir s'opposer à pareille opération de substitution : il s'agit simplement de remplacer ici une perspective largement partagée – mais qui n'a strictement rien d'essentiel ni non plus d'idéal - dont nous croyons que la preuve de ses déficiences majeures a largement été faite précédemment, par une autre modalité organisationnelle qui nous semble nettement plus à même de faire justice à la suite des ordinateurs, à leur histoire, et, par là même, à la totalité de l'édifice informatique.

L'histoire de l'informatique ne s'épuise pas complètement dans celle des ordinateurs ou, pour le dire encore différemment, la prise en compte de l'histoire des machines est nécessaire mais cependant insuffisante pour prétendre dire ou couvrir totalement celle de l'informatique. Toutefois, l'une et l'autre ne sauraient non plus véritablement prétendre à se constituer de manière autonome tant elles se trouvent intimement liées, tant elles se sont profondément déterminées par le passé tout de même qu'elles continuent à s'interpénétrer et à se façonner mutuellement aujourd'hui. Vouloir penser l'histoire de l'informatique conduira ainsi nécessairement à penser celle des ordinateurs, et inversement. En conséquence, la façon dont nous ordonnerons le déploiement de cette lignée technique, en même temps qu'elle déterminera évidemment la manière dont nous nous trouverons en mesure de saisir sa dynamique propre, décidera également de notre compréhension du phénomène informatique dans son ensemble. Demeure maintenant, en tenant minutieusement compte de tout ce que nous venons d'énoncer, à nous acheminer vers la définition de notre méthode.

2.1.4. Des calculateurs à l'ordinateur : quelques considérations préalables sur les différents types de machines à calculer ayant existé durant la première moitié du 20^{ème} siècle.

Notre entreprise d'exploration de l'histoire de l'informatique, jusqu'à présent, nous a amenés à critiquer l'accès méthodologique qui prévaut généralement dès lors qu'il est question d'appréhender l'histoire des ordinateurs en vue de la rendre intelligible. Privilégiant et banalisant de façon quelque peu inconsidérée l'emploi systématique du concept très incertain – et selon nous illégitime - de « générations » d'ordinateurs, la modalité d'organisation dominante qui préside usuellement à l'ordonnancement de cet espace technoscientifique aujourd'hui si essentiel – voire consubstantiel - à nos sociétés occidentales conduit ainsi quasi invariablement la plupart de ceux qui en font usage à procéder en son sein à des coupes claires et approximantes qui représentent autant d'éléments mutilants et perturbants interdisant au final une saisie qui en serait fidèle. Entendons ainsi que là où se trouve instauré un pareil régime d'appropriation, l'omission, le raccourci rapide, l'amalgame, bref une certaine forme de défektivité, ne tardent pas à s'installer pour venir finalement grever la solidité du projet scientifique qu'il est censé porter. Pourtant, et aussi imparfaite qu'elle puisse être, cette modalité distributive paraît s'être imposée comme allant de soi, d'une manière qui pourrait presque être qualifiée de naturelle, à la très grande majorité de ceux qui ont choisi de faire œuvre de théorisation en ce domaine. Comment rendre compte alors de la déconcertante évidence avec laquelle se présente ce cadre à celui qui décide de penser l'informatique, lequel l'accueille généralement sans même songer à remettre en question sa pertinence ou sa validité tant il est communément reçu ? Comment expliquer encore que les insuffisances multiples dont est saturé ce mode de catégorisation, et dont on a pu mesurer à quel point elles pouvaient se révéler lourdement handicapantes pour une pensée s'efforçant de pénétrer avec exactitude ce champ de l'activité humaine, tendent ainsi à demeurer si constamment inaperçues ou impensées alors que dans le même temps il se trouve si largement convoqué ? Nous ne croyons pas, justement, qu'il faille voir en son usage amplement répandu la raison majeure permettant de rendre compte de l'agrément quasi unanime dont il paraît bénéficier. En effet, une des choses les plus paradoxales qui puissent peut-être être relevées concernant ce point particulier est que l'histoire de l'informatique, lorsqu'elle se voit appréhendée selon une perspective holistique – ce qui paraît constituer un préalable nécessaire à la mise en œuvre d'un examen plus circonstancié - semble précisément appeler un tel schème de distribution pour être adéquatement pensée.

Le surgissement précipité puis le développement consécutif et ininterrompu de la technologie informatique constituent, nous nous sommes déjà employés à tenter de faire ressortir ce fait, un moment d'une densité et d'une complexité extrêmes, et ce en dépit - ou peut-être plutôt à cause - de la surprenante brièveté de la période au cours de laquelle tout ceci s'est effectivement produit. Durant les années 1946-1951, le paysage primitif d'une informatique qui taisait son nom faute de le savoir encore vraiment devait subir un certain nombre d'évolutions et de transformations importantes dont la plupart allaient s'avérer absolument décisives non seulement pour son devenir mais également pour celui de nos communautés humaines. C'est en effet au cours de cet intervalle essentiel, et sous l'impulsion assurément déterminante de la *Eckert-Mauchly Computer Corporation*²⁷⁴, que l'ordinateur digital électronique à programme interne - même s'il était toujours en construction²⁷⁵ - commença à se désolidariser d'avec la sphère militaro-scientifique de laquelle il était fondamentalement issu pour venir progressivement - mais sûrement - investir les domaines commerciaux, industriels et scientifiques civils. Le succès que rencontra dès 1951 cette machine formidable qu'était l'U.N.I.V.A.C. I, le premier ordinateur commercial qui ait jamais été vendu dans le monde, conduisit rapidement un certain nombre d'acteurs industriels majeurs de l'époque - parmi lesquels figuraient notamment I.B.M., l'*Engineering Research Associates*²⁷⁶, la *National Cash Register*, *Honeywell* et la *Burroughs Corporation* - à s'engouffrer promptement dans la brèche financièrement prometteuse qui venait tout juste

²⁷⁴ Quant elle fut créée en juin 1946, la société d'Eckert et Mauchly s'appelait l'Electronic Control Company. La société Eckert-Mauchly Computer Corporation fut quant à elle fondée le 22 décembre 1947 afin de lever les capitaux additionnels qui étaient nécessaires à la poursuite du projet d'ordinateur électronique militaire B.I.N.A.C. (*Binary Automatic Computer*) que cette firme menait alors pour le compte de la *Northrop Aircraft Company*. C'est la complétion de cette machine - et donc ses ventes futures - qui devait ensuite déterminer la continuation de la mise au point de l'U.N.I.V.A.C. I. pour le développement duquel un contrat formel avait pourtant été signé en septembre 1946 avec l'U.S. *National Bureau of Standards* (financement d'une étude de spécification de l'ordinateur à hauteur de 75000 dollars) et l'U.S. *Census Bureau* (300000 dollars devant être alloués pour ce projet au *Census Bureau* par l'U.S. *Army Ordnance Department*). Cependant, dès 1947, Eckert et Mauchly avaient estimé que le coût final de l'U.N.I.V.A.C. I serait très sûrement supérieur à 400000 dollars, une somme que les différents contrats gouvernementaux ne pouvaient bien entendu suffire à couvrir. La situation financière dans laquelle se trouvait la E.M.C.C., nous y reviendrons, était par conséquent extrêmement préoccupante.

²⁷⁵ Ainsi, l'E.D.V.A.C. de l'université de Pennsylvanie ne fut opérationnel qu'en 1952. L'I.A.S. *Computer* de l'*Institute for Advanced Study* de Princeton, dont la construction fut démarrée en 1946 sous la direction de John Von Neumann, n'entra en fonction qu'en 1951. Mais il est vrai que l'E.D.S.A.C. (*Electronic Delay Storage Automatic Calculator*) que le britannique Maurice Wilkes, s'inspirant notamment des plans que Von Neumann avait dressés pour l'E.D.V.A.C. dans son *First Draft*, avait commencé à élaborer en 1946 pour le compte de l'université de Cambridge fut pour la première fois présenté dans le cadre d'une démonstration publique au cours du mois de mai 1949. Un an auparavant cela, la Manchester Baby - une version pilote réduite de la Manchester Machine construite dans cette université par le *Royal Society Computer Laboratory* - avait elle aussi été exhibée. Cependant il ne s'agissait là que d'un dispositif prototypique et non d'une véritable machine électronique de type E.D.V.A.C., c'est-à-dire d'un ordinateur.

²⁷⁶ Bien que spécifiquement orientée vers la production d'ordinateurs militaires, cette société fut une des seules, avec l'E.M.C.C. bien sûr, à se tourner pour leur construction vers des composants électroniques.

d'être ouverte - avec force hardiesse d'ailleurs - par la société de Prosper J. Eckert et John W. Mauchly (laquelle avait fait l'objet d'un rachat par la *Remington Rand Corporation* en 1950). Avant-guerre, quelques-unes de ces grandes compagnies américaines, on s'en souvient, s'étaient féroce­ment disputées le marché mondial florissant²⁷⁷ des machines de bureau mécaniques ou électromécaniques. Toutes, par conséquent, possédaient déjà une longue et solide expérience dans le domaine du calcul automatique, même si, bien évidemment, les dispositifs de calcul qu'elles avaient jusque-là développés et distribués dans le monde entier ne pouvaient prétendre avoir grand chose en commun avec l'instrument qui allait les détrôner définitivement quelques années seulement après la fin de la seconde guerre mondiale. Leur capacité d'expertise se trouva accidentellement renforcée et même considérablement étendue lorsque, la guerre venue, la totalité de ces firmes furent mises d'office à contribution par les autorités gouvernementales et militaires américaines dans les cadres conjoints de l'état d'urgence national illimité proclamé le 26 mai 1941 par Franklin D. Roosevelt et du *War Production Board* de Donald Nelson, qui fut décidé la même année. Entre 1941 et 1945, *International Business Machines* – pour ne citer ici que cette seule compagnie - devait ainsi concevoir plusieurs gros systèmes automatiques de calcul à destination des militaires (on se contentera ici de faire mention des seuls calculateurs à relais de la série P.S.R.C.²⁷⁸ qui furent construits à partir de 1944 à la demande expresse de l'armée américaine²⁷⁹, le « cas » de l'I.B.M. *Automatic Sequence Controlled Calculator* – l'Harvard Mark I d'Howard Aiken – qui fut également employé à des fins militaires à partir de mai 1944 étant un peu plus compliqué).

La conversion de l'ensemble de l'industrie américaine à l'effort de guerre fut, pour reprendre le terme employé ailleurs par Pierre Miquel²⁸⁰, spectaculaire. Plus de la moitié du revenu national de ce pays – soit quelques 150 milliards de dollars de l'époque – devait être ainsi investi dans le *Victory Program* pour permettre la constitution progressive ce que Roosevelt avait pu appeler « l'arsenal des démocraties ». Pour ces grandes compagnies américaines, l'attaque surprise que mena traîtreusement la flotte aérienne japonaise commandée par l'amiral Chuichi Nagumo sur la base aéronavale de Pearl Harbor le 7 décembre 1941 – provoquant ainsi l'entrée en guerre des Etats-Unis - devait entraîner un

²⁷⁷ A l'exception de la société E.R.A. (*Engineering Research Associates Inc.*) qui, rappelons-le, ne fut fondée qu'en 1946.

²⁷⁸ *Pluggable Sequence Relay Calculator*.

²⁷⁹ Deux P.S.R.C. furent mis en service entre 1944 et 1945 à l'Aberdeen Proving Ground afin d'y calculer des tables de tir balistique. L'année suivante, la construction de cinq machines supplémentaires fut achevée et trois d'entre elles furent installées au Naval Proving Ground de Dahlgren.

²⁸⁰ [Miquel, 1986], p. 443.

certain nombre de conséquences tout à fait notables qui devraient se révéler par la suite absolument déterminantes pour la mise en place et le devenir d'une informatique encore à peine embryonnaire, voire même totalement inexistante²⁸¹. Pour commencer, l'entrée en guerre des Etats-Unis signifiait que toutes ces corporations se trouvaient désormais contraintes d'adapter une part importante de leur outil de production à la fabrique d'armements. Tout au long de la guerre, et à côté des « traditionnelles » *electric accounting machines* (E.A.M.) qu'elle continua à fabriquer ou encore à perfectionner essentiellement pour le secteur militaire, I.B.M. fut ainsi amenée à produire des instruments de contrôle de tir embarqués pour les avions et les navires de guerre, des dispositifs d'aide automatisée à la visée pour les canons antiaériens de 90 mm et le largage aérien de bombes, des compresseurs et, on le sait peut-être moins, des munitions de types divers, des fusils automatiques Browning et des carabines de calibre .30 (notamment des M1 Garand). A côté de cette participation industrielle à l'effort de guerre - que l'on pourrait dans une certaine mesure qualifier de « conventionnelle²⁸² » - nombre de ces grandes compagnies furent également conduites à collaborer étroitement avec les organisations militaro-industriales-académiques²⁸³ qui avaient été précocement mises en place en Amérique du Nord au tout début du conflit - principalement à l'initiative de Vannevar Bush, alors membre influent du prestigieux *Massachusetts Institute of Technology*. - afin de participer activement au développement de projets militaires fréquemment classifiés. I.B.M., encore une fois, devait ainsi mettre au point un certain nombre de dispositifs extrêmement innovants à destination exclusive des militaires. On en mentionnera ici seulement quelques-uns, jugés tout particulièrement significatifs pour notre étude bien qu'en général il ne s'agisse pas de calculateurs électroniques et que leur relation avec ceux-là, quant effectivement il en est une, ne soit pas forcément perceptible de façon immédiate :

- La *Mobile Machine Record Unit*. Produite au total à 274 exemplaires pour le compte de l'U.S. *Adjutant General's Office* (de 1941 à 1945), cette machine compacte de type

²⁸¹ En dépit des idées et des réalisations de John V. Atanasoff et de Clifford Berry aux Etats-Unis et de celles de Konrad Zuse en Allemagne, il serait à notre sens bien peu avisé de prétendre qu'à cette époque, c'est-à-dire en 1940-1941, l'informatique existait véritablement.

²⁸² En Allemagne, des firmes telles que Siemens, Krupp, ou Schneider (ou encore Skoda en Tchécoslovaquie), furent également réquisitionnées par le pouvoir nazi afin de fabriquer des armements.

²⁸³ Evoquant cette coopération tripartite dans un article intitulé « *Why Build Computers ? The Military Role in Computer Research* », le Général William Westmoreland, ancien Commandant en chef des forces armées américaines au Vietnam, y faisait référence sous l'appellation explicite de « *Iron Triangle* », littéralement le « triangle de fer » (cet article peut être consulté ou téléchargé en format .pdf ou .html à l'adresse suivante: <http://www.si.umich.edu/~pne/PDF/cw.ch2.pdf>).

E.A.M. avait été spécifiquement conçue pour résister aux difficiles conditions d'utilisation que les soldats rencontraient communément sur les champs de bataille. Elle permettait de compiler les données liées à la gestion des troupes et des matériels engagés sur les théâtres d'opération.

- Des instruments de traitement de l'information acceptant en lecture des bandes de télétype ou des bandes télégraphiques classiques dont le contenu informationnel était automatiquement transcrit par ces mêmes machines sur un support matériel différent, en l'occurrence des cartes perforées I.B.M. autorisant chacune la représentation de 2^5 caractères ²⁸⁴. Ces cartes, une fois perforées, pouvaient bien entendu faire ultérieurement l'objet d'un traitement au moyen des autres *electric accounting machines* fabriquées par I.B.M. De tels systèmes permettaient ainsi d'apporter une solution plus que satisfaisante à l'intolérable problème que constituait en temps de guerre le lent acheminement de ces volumineux paquets de cartes d'un centre de traitement à un autre par des moyens de transport conventionnels en même temps qu'ils permettaient de contourner le problème plus que délicat que posait déjà avant le conflit le processus interminable du transfert manuel du contenu des bandes télégraphiques vers les cartes perforées (cette opération de transfert étant nécessaire pour que les informations reçues par voie télégraphique ou téléphonique puissent être ensuite exploitées avec des machines de bureau). Anticipant fortuitement la requête qui allait être formulée à son endroit par l'*Army Air Corps* à la fin de 1940, l'I.B.M. *Commercial Research Department* avait déjà mis au point une machine de ce genre à la demande de la *National Analine Company* au printemps de la même année. Seuls les désaccords commerciaux qui survinrent alors entre I.B.M. et l'*American Telephone and Telegraph Company* (AT&T devait en effet fournir les lignes télégraphiques et téléphoniques nécessaires au fonctionnement du système), empêchèrent le projet de se voir complètement finalisé. Avec l'entrée en guerre des Etats-Unis ces difficultés furent bien entendu rapidement rejetées au second plan et en août 1941 l'I.B.M. Type 40 *tape-to-card Punch Machine* (bande vers carte) sortait des lignes de production de l'usine I.B.M. d'Endicott. Six mois plus tard, l'I.B.M. Type 57 *card-to-tape Punch Machine*, un dispositif qui effectuait donc l'opération inverse, était également produite en série. C'était là sûrement un des premiers systèmes de transmission de

²⁸⁴ Ce qui était amplement suffisant pour représenter les 26 lettres que compte l'alphabet.

l'information à large échelle intégrant à l'une ou l'autre de ses extrémités, voire les deux, des machines permettant d'encoder ou de décoder automatiquement des données pour que d'autres machines automatisées, également intégrées à cette ligne de communication, puissent ensuite les exploiter. Outre l'*Army Air Corps* bien sûr, l'*U.S. Army* et l'*U.S. Navy* adoptèrent très vite ce système afin de faciliter et d'accélérer l'acheminement et le traitement de leurs données logistiques.

- Le *Radiotype* : le prototype de cette machine fut construit en 1931 par Walter S. Lemmon, alors président de la *Radio Industries Corporation*, et deux de ses associés. Un peu avant 1935, et à la demande de Thomas J. Watson qui s'était déclaré impressionné par la machine, ils rejoignirent la compagnie I.B.M. où ils continuèrent à œuvrer à sa mise au point²⁸⁵. A la fin de 1941, I.B.M. loua²⁸⁶ plusieurs de ces systèmes à l'*Army Signal Corps* (A.S.C.) qui en testa les capacités communicationnelles en les installant dans plusieurs de ses stations disséminées sur le territoire américain (il s'agissait des postes de Washington D.C., de Dayton dans l'Ohio, et de Chicago dans l'Illinois). La campagne de tests se solda par un vif succès et bientôt les centres de l'A.S.C. installés à San Francisco, à Honolulu, au Panama et sur l'île de Puerto Rico en furent pourvus. Le *Radiotype* comprenait entre autres éléments constitutifs une machine à écrire électrique (*electric typewriter*), un transmetteur radio à ondes courtes, et un appareil de réception (*receiving typewriter*). Par rapport à la transmission radio de messages codés en morse qui jusque-là avait été utilisée dans ces services, le *Radiotype* présentait des avantages certains: ainsi, le message à transmettre pouvait être entré sans codage préalable aucun au moyen de la machine électrique à clavier alphanumérique, transmis par signaux radio, puis reçu et « imprimé » immédiatement par l'appareil de réception. Celui-ci pouvait par conséquent être interprété au moment même où il était reçu. Ce *modus operandi* particulier impliquait donc qu'à l'un et l'autre bout de la chaîne de transmission, il n'était désormais plus nécessaire de recourir à des opérateurs spécialisés afin de passer du langage naturel au code Morse ou inversement (avec tout le gain de temps que cela pouvait bien sûr impliquer). Au cours de la guerre, le *Radiotype* se vit enfin adjoindre des appareils de cryptage et de

²⁸⁵ Il avait été prévu avant-guerre que le *Radiotype* servirait à assurer les communications entre les différents services d'une compagnie (à l'intérieur d'un grand bâtiment par exemple), ou entre une firme et ses usines et succursales.

²⁸⁶ Rappelons que la politique commerciale poursuivie depuis toujours par I.B.M. privilégiait la location à la vente. Elle fut maintenue durant les années de guerre.

décryptage électromécaniques, ce qui lui permettait d'acheminer presque instantanément des messages dont le contenu – forcément plus long à interpréter - était néanmoins sécurisé.

- Enfin, on évoquera les machines de cryptage et de décryptage qu'I.B.M. fournit de manière régulière aux différents départements de cryptographie de l'armée américaine, et tout particulièrement à celui de la *Navy* (La *Communications Supplementary Activity* de Washington, ou C.S.A.W.). Ces systèmes consistaient parfois²⁸⁷ en un calculateur à relais (du type de ceux qui avaient justement été utilisés pour la construction de l'Harvard Mark I - I.B.M. A.S.C.C.), couplé à une E.A.M. de type 405 A.A.M. (*Alphabetic Accounting Machine*). Ces ensembles se virent rapidement adjoindre des E.A.M. *Type 40 tape-to-card* dès lors que celles-ci furent effectivement disponibles, c'est-à-dire dans le courant de l'automne 1941. Parallèlement à cette filière d'approvisionnement, la *Navy* disposait également d'un centre spécial de recherche et de développement de machines cryptographiques - le *Naval Computing Machine Laboratory* (N.C.M.L.) sis à Dayton dans l'Ohio – qui fonctionnait sous la tutelle d'un des principaux concurrents d'I.B.M., la *National Cash Register*, et dont la mission consistait également à concevoir des systèmes de ce genre pour le C.S.A.W. A la différence de la très grande majorité des machines qui furent livrées à ce service par la firme I.B.M., les dispositifs qui étaient développés par la N.C.R. au N.C.M.L. faisaient massivement emploi de la technologie électronique (les unités d'entrée et de sortie de ces systèmes demeurant toutefois des E.A.M. classiques). Très peu de temps après la fin de guerre, et alors que la *National Cash Register* venait de décliner l'offre qui lui avait été faite par la *Navy* de poursuivre les activités de recherche qu'elle avait menées jusque-là au N.C.M.L. pour le compte du C.S.A.W., l'idée de mettre en place une compagnie commerciale pour poursuivre ces travaux commença à s'affirmer. En janvier 1946, et à la suite de cela, la société *Engineering Research Associates* fut fondée et légalement enregistrée (la plupart des membres de son personnel étaient d'anciens militaires démobilisés qui avaient servi pendant la guerre au C.S.A.W. ou au N.C.M.L.). La *Navy*, pour des raisons d'ordre juridique, ne pu participer à la création de cette entité « commerciale » dont elle était pourtant directement à l'origine.

²⁸⁷ Une autre configuration type consistait en un ensemble comportant trois trieuses (*sorter*) ainsi qu'un comparateur (*collator*), toutes ces machines étant des E.A.M. Cet ensemble pouvait être mis en œuvre par un seul opérateur.

Néanmoins, et dans un premier temps, elle fit en sorte d'assurer sa survie économique en lui attribuant très vite et de manière préférentielle un certain nombre de marchés extrêmement lucratifs. Par la suite, elle maintint à tel point son soutien financier à E.R.A. que dans les années qui suivirent l'immédiat après-guerre, cette société devint (pour un temps seulement s'entend), le principal fournisseur d'ordinateurs militaires aux Etats-Unis.

Cette énumération, pour brève qu'elle soit, nous autorise cependant à repérer - directement ou indirectement - quelques-uns des traits ou *patterns* distinctifs qui caractérisaient de manière précise la situation dans laquelle se trouvait le secteur du calcul automatique aux Etats-Unis durant les années de guerre (et ce bien qu'il n'ait nulle part été fait mention de l'ordinateur dans ce qui vient d'être recensé plus haut) :

- 1) Le « *iron triangle* », cette structure synergique qui avait été mise en place au tout début de la guerre entre les universités, les firmes industrielles et les officines gouvernementales américaines permit de réaliser dans des délais extrêmement brefs d'énormes progrès dans le domaine des technologies liées à l'armement²⁸⁸, cette dernière affirmation se vérifiant tout particulièrement lorsque l'on considère le secteur des instruments automatiques de calcul ou de traitement de l'information (dans ce dernier cas, il s'agissait toutefois assez fréquemment d'adapter et/ou de combiner entre eux certains appareils électromécaniques déjà existant en vue de l'effectuation d'une tâche – généralement le calcul de tables de tir balistique - pour laquelle ils n'avaient pas été initialement prévus).

- 2) Pendant toute la durée du conflit le gouvernement américain, par l'entremise du jeu complexe de ses divers organismes militaires, fit en sorte d'entretenir les rapports de compétitivité qui avaient existé avant-guerre entre les différentes firmes avec lesquelles il coopérerait maintenant étroitement (nous avons vu qu'I.B.M., par exemple, fournissait la *Communications Supplementary Activity* de Washington en *electric accounting machines* pour le décryptage de messages ennemis – allemands et

²⁸⁸ Nous songeons par exemple aux technologies du R.A.D.A.R., du S.O.N.A.R., ou bien encore à celles de la transmission d'informations par ondes radio, que celles-ci soient ou non cryptées. Même si nous n'y faisons pas référence explicitement, mais cela semble toutefois aller de soi, nous comprenons ici également l'E.N.I.A.C., l'A.S.C.C., les bombes électromécaniques, Heath Robinson, les machines Colossus ainsi que les bombes électroniques/électromécaniques anglo-américaines qui furent construites à la fin de 1942 après que les allemands aient mis en service leur Enigma à quatre rotors

nippons - tandis que de son côté, le *Naval Computing Machine Laboratory* administré par la *National Cash Register* mettait au point pour ce même C.S.A.W. des dispositifs électroniques – forcément plus performants que les E.A.M. d'I.B.M. - en vue de remplir exactement la même fonction).

- 3) La manière dont fonctionnait la collaboration tripartite que nous venons d'évoquer n'impliquait nullement que les grands groupes industriels qui travaillaient alors en partenariat avec le gouvernement et les centres universitaires de pointe américains devaient s'abstenir de faire des bénéfices financiers, tout au contraire. Pendant la deuxième guerre mondiale, ces derniers étaient ainsi parfaitement autorisés à gagner de l'argent mais ces profits devaient être réalisés dans le cadre exclusif des contrats de recherche, de développement et de production liés à la sphère de la défense nationale (le marché civil américain était de toute façon très limité et commercer avec l'étranger, dans une large mesure, complètement inenvisageable). Ceci, en aucun cas, ne saurait être considéré comme une donnée triviale ou superfétatoire car c'est bien au cours de cette période et en grande majorité grâce à ces contrats très profitables passés avec les institutions militaires que certaines de ces firmes, appelées ensuite à jouer un rôle absolument déterminant dans le domaine de l'informatique, confortèrent spectaculairement leur situation financière et assirent ainsi solidement leur (future) position de domination industrielle. Le tableau figurant ci-dessous récapitule le volume total des ventes (exprimé en millions de dollars), réalisé entre 1939 et 1946 par cinq des plus grands fabricants américains de machines mécaniques et électromécaniques :

Année	Burroughs	I.B.M.	Marchant	N.C.R.	Underwood
1939	32.49	39.5	3.89	37.08	24.15
1940	29.36	46.3	4.27	38.78	26.30
1941	41.28	62.9	7.46	52.40	36.49
1942	44.04	90.7	8.62	79.88	33.26
1943	44.48	134.9	5.69	99.17	47.60
1944	37.44	143.3	8.02	93.78	37.52
1945	37.59	141.7	9.05	68.44	28.98
1946	46.24	148,2	12.02	77.38	37.16

Tableau 1 : volume total des ventes, en millions de dollars, réalisé entre 1939 et 1946 par Burroughs, I.B.M., Marchant, N.C.R., et Underwood²⁸⁹

Comme il est permis de le constater en consultant ce tableau, tous ces fabricants américains, globalement, ont vu leurs ventes croître²⁹⁰ entre 1939 et 1944, les progressions enregistrées respectivement par I.B.M. et la N.C.R. étant sans conteste les plus spectaculaires. Le fléchissement ou la légère stagnation qui peuvent ensuite être relevés en 1945 (excepté en ce qui concerne la firme Marchant qui voit encore ses ventes sensiblement progresser cette année-là), correspondent bien entendu à la fin des hostilités mondiales et au gel - ou bien encore à l'arrêt pur et simple - de certains contrats gouvernementaux²⁹¹. En 1946 cependant, on remarque que les ventes totales de ces constructeurs furent uniformément relancées: la guerre terminée, la profession procéda bien entendu à sa réorganisation et les marchés civils nationaux et internationaux commencèrent progressivement à être réinvestis ; au moment même où ce retour à la normale des activités commerciales s'amorçait, Vannevar Bush²⁹² et ses influents collègues de l'O.S.R.D. (*Office of Scientific Research and Development*), appuyés par le gouvernement des Etats-Unis, initièrent à l'échelon national un vaste programme de recherche et de développement destiné, dans le contexte de la paix retrouvée, à poursuivre la collaboration qui avait été préalablement entreprise avec les laboratoires industriels et les centres universitaires américains. L'objectif de ce programme était triple: il s'agissait tout d'abord de conserver à tout prix la position de *leadership* technologique en matière d'armement que le pays, par la force des choses, avait chèrement acquise pendant la guerre (et ce notamment pour être en mesure de faire face à la nouvelle menace que faisait désormais peser sur le monde occidental la formidable puissance militaire de l'Union Soviétique). Ensuite, et dans cette perspective singulière totalement orientée vers le perfectionnement ou le renouvellement des moyens techniques dont disposait la défense nationale américaine, l'accent fut mis sur la nécessité d'employer désormais massivement la technologie électronique (l'E.N.I.A.C., bien qu'encore inachevé à cette période, constituait la

²⁸⁹ Source : Goldman, Sachs and Co., « *Burroughs Adding Machine Company* », *Report of August 28, 1947, Burroughs Papers*, reproduit dans [Cortada, 1993], p.209. Les informations financières relatives à I.B.M. sont quant à elles tirées de [Pugh, 1995], *Appendix A*, p. 323.

²⁹⁰ Burroughs, en 1940 et 1944, Marchant en 1943, la N.C.R. et Underwood en 1944 verront néanmoins

²⁹¹ Ceci inclut les contrats portant sur la production d'armements conventionnels tels que les fusils d'assaut ou encore les munitions.

²⁹² A cette époque, Vannevar Bush, en plus des lourdes responsabilités qu'il exerçait déjà au sein de l'O.S.R.D., était également professeur au M.I.T. et président de la Carnegie Institution. Il remplissait également, quoique qu'officieusement, le rôle de conseiller principal du Président Roosevelt pour les questions relevant des secteurs de la science, de l'ingénierie et de la technologie. Il fut l'un des acteurs majeurs qui poussèrent, après-guerre, l'industrie américaine à entrer dans l'ère électronique.

preuve matérielle de sa fiabilité et de ses performances extraordinaires). V. Bush lui-même, pourtant « père » de l'analyseur différentiel (une machine analogique), se fit l'ardent défenseur de son application au domaine du calcul automatique. Enfin, dernier point, l'injection massive de capitaux fédéraux dans ces secteurs clefs de l'économie américaine ne pouvait que stimuler sa croissance tout de même qu'elle permettait d'opérer une transition progressive entre l'économie de guerre et l'économie de paix. Ce qu'il convient de retenir ici en tout premier lieu, c'est que les conditions de possibilité *financières* de l'apparition et du développement de l'industrie informatique aux Etats-Unis furent principalement réunies pendant la seconde guerre mondiale (le bailleur de fond étant le gouvernement américain), *alors que l'ordinateur n'existait pas encore* – pas même sur le papier - et que les analyseurs différentiels, les E.A.M. et les grands calculateurs électromécaniques²⁹³ (comme le Bell *Complex Number Calculator* ou l'A.S.C.C. et les P.S.R.C. d'I.B.M.), régnaient sans partage sur le monde du calcul scientifique et/ou militaire. Les grands constructeurs d'ordinateurs que nous retrouverons aux Etats-Unis durant les années cinquante et soixante seront ainsi, dans une très large mesure, les firmes qui avaient collaboré avec le gouvernement et les universités de ce pays durant la deuxième guerre mondiale.

- 4) L'utilisation qui fut faite de la technologie électronique pendant la guerre demeura extrêmement marginale. A l'exception de l'E.N.I.A.C. et des systèmes de décryptage développés au C.S.A.W. (comme le *Selector* de Ralph L. Palmer), la très grande majorité des instruments automatiques de calcul qui furent construits et employés pendant la deuxième guerre mondiale étaient des dispositifs électromécaniques ou des machines hybrides combinant des relais et quelques composants électroniques (c'était par exemple le cas des « bombes » anglo-américaines qui apparurent à la fin de 1942). Ce scepticisme ouvertement déclaré quant aux possibilités de l'électronique ne s'éteignit pas avec la fin de la guerre (alors que l'E.N.I.A.C., encore une fois, constituait la preuve de la faisabilité d'une grande machine électronique, en même temps que celles de la fiabilité et du potentiel formidable de cette technologie). Cette défiance à l'encontre de l'électronique persista même jusqu'à l'orée des années cinquante. Ainsi, à la fin de 1945, Howard Aiken, le concepteur de l'Harvard Mark I – I.B.M. A.S.C.C.- se tourna sans guère d'hésitations vers des composants électromécaniques pour construire le Mark II, une machine que l'U.S. Navy lui avait

²⁹³ Nous nous souvenons que le calculateur électronique E.N.I.A.C. ne fut opérationnel qu'à la fin de l'année 1945 puis dévoilé en février 1946.

demandé de fabriquer pour le *Naval Proving Ground* de Dahlgren (Virginie). Chez I.B.M., la situation n'était guère différente de cela encore qu'il faille bien se garder de croire - comme a on effectivement tendance à le faire un peu vite parfois - que Thomas J. Watson Sr. était totalement hostile à l'idée de voir sa société s'orienter vers l'emploi de l'électronique alors que son fils, Tom Watson, « initié » à la nouvelle technologie par Charlie Kirk, James Bryce et Ralph L. Palmer²⁹⁴, était un partisan plus que convaincu de la vue contraire. Nous reviendrons sur cette question un peu plus tard. Qu'il suffise pour l'instant de dire que même si les gens de l'I.B.M. *Endicott Laboratory* (en l'occurrence Ralph L. Palmer et Bryon E. Phelps), avaient conçu dès 1941 un calculateur électronique (l'*Electronic Multiplier*), et que cette même société, en 1946, fut la première à mettre sur le marché un calculateur totalement électronique, l'I.B.M. 603 *Calculator*, sa migration vers un emploi plus large et plus systématique de la technologie électronique fut extrêmement timide jusqu'à ce que, finalement, la compétition entre les acteurs de l'industrie du *Data Processing* qui fut décidée et massivement financée après-guerre par le gouvernement américain bouleverse radicalement - et irréversiblement - cette situation.

Tel était, succinctement exposé, le contexte général dans lequel la phase expérimentale du calcul électronique²⁹⁵ se déroula au Etats-Unis pendant la deuxième guerre mondiale. Le surcroît de compétences techniques - et bien sûr les capitaux colossaux - que furent en mesure d'accumuler d'une manière casuelle toutes ces compagnies au cours de cette époque troublée en coopérant avec les institutions militaires et les centres universitaires américains devaient ainsi largement contribuer à « faire le lit » de la future industrie informatique de ce pays. A partir de 1946, date à laquelle l'*Electronic Control Company* (bientôt E.M.C.C.), et l'*Engineering Research Associates* furent fondées (la première par des « anciens » du projet E.N.I.A.C., J. P. Eckert et J. Mauchly, et la seconde par des vétérans de la *Communications*

²⁹⁴ Charlie Kirk était alors vice-président exécutif d'I.B.M. James Bryce avait rejoint la *Time Recording Division* en 1917 et se vit ensuite nommé ingénieur en chef de la *Computing Tabulating Recording Company* en 1922. Il devint le conseiller technique principal de Thomas J. Watson Sr. jusqu'à sa mort, en mars 1949. Ralph L. Palmer intégra l'*Electric Laboratory* de la société I.B.M. en janvier 1932. Comme nous l'avons dit plus haut, pendant la guerre, il servit comme lieutenant au C.S.A.W. C'est au sein de cette institution militaire qu'il perfectionna considérablement ses connaissances dans le domaine de la technologie électronique avant de réintégrer, au mois de février 1946, la société I.B.M. Il faut également mentionner le fait que pendant la guerre Tom Watson avait été pilote de bombardier dans l'*U.S. Air Force*. Dans ces conditions, il avait donc pu apprécier à leur juste valeur les performances des systèmes électroniques embarqués dans les appareils de combat (nous songeons bien sûr ici au R.A.D.A.R.).

²⁹⁵ Ce qui, selon la perspective générationnelle, pourrait très certainement correspondre à une hypothétique génération zéro d'ordinateurs.

Supplementary Activity de Washington bénéficiant de l'appui financier et politique officieux de l'U.S. Navy), la situation – jusqu'ici relativement claire - se compliqua progressivement. Certes, l'emploi de l'électronique était encore à cette époque chose assez peu répandue, mais cette conjoncture ne serait pas appelée à perdurer bien longtemps. Avec l'advenue imminente de l'ordinateur, l'aventure des grands calculateurs électromécaniques était sur le point de s'achever et lorsque l'*Harvard Mark I* / I.B.M. A.S.C.C. fut démantelé au laboratoire de calcul de l'Université d'Harvard durant le mois de juillet 1959, elle était terminée à tout jamais. Le 30 juin 1945, la rédaction du *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.*, autrement dit le document décrivant le modèle théorique de l'ordinateur électronique à programme interne – l'architecture Von Neumann - que John Von Neumann avait défini d'après les nombreux entretiens qu'il avait eus avec Presper P. Eckert et John W. Mauchly, était complètement achevée. Au début du mois de juillet 1945, quelques 24 copies du *First Draft* – qui en aucun cas n'avait été entendu comme une publication mais bel et bien comme un document à usage exclusivement interne - avaient déjà été expédiées par Herman H. Goldstine à des collègues scientifiques de J. Von Neumann sans que P. J. Eckert et J. Mauchly en aient été informés (d'après ce que rapporte Goldstine²⁹⁶, il s'agissait uniquement de personnes étroitement liées au projet PX). Dans les trois années qui suivirent, plusieurs centaines de duplicata de ce rapport circulaient dans le monde entier (à l'exception, semble-t-il de l'U.R.S.S.²⁹⁷). A cela, il convient d'ajouter qu'entre le 8 juillet et le 31 août 1946, un cycle de 48 conférences intitulé « *Theory and Techniques for Design of Electronic Digital Computers* ²⁹⁸ » fut donné à la *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie sous les auspices conjugués de l'*Office of Naval Research*, de l'U.S. Navy, et de

²⁹⁶ Ainsi Herman H. Goldstine, dans [Goldstine, 1972], p. 196, écrit-il: « *In fact, on 25 June 1945 copies were distributed to 24 persons closely connected to the project* ». Cette déclaration qui paraît minimiser l'affaire se doit toutefois d'être considérée avec une certaine circonspection. La distribution de ce rapport (qui pour le coup, P. Breton le rappelle, avait été doté d'une couverture et d'un titre), se fit en effet sans que Presper J. Eckert et John Mauchly n'aient été consultés au préalable alors que certaines des idées qui y étaient exposées étaient leurs. De plus, seul le nom de John Von Neumann figurait sur le document. Aux yeux du monde scientifique, il apparut donc comme le seul et unique auteur du *First Draft*. Eckert et Mauchly, à juste titre, s'estimèrent lésés et à partir de ce moment, de sérieuses tensions apparurent au sein de l'équipe de l'E.N.I.A.C. Ces querelles internes débouchèrent sur une querelle portant sur les brevets liés à l'E.N.I.A.C. et, finalement, entraînèrent le départ d'Eckert et Mauchly de la *Moore School*. Dans E.N.I.A.C., *The Triumphs and Tragedies of the World's First Computer*, Scott McCartney rapporte cependant que plus tard, Goldstine fit amende honorable en avouant que certaines libertés avaient été prises avec le *First Draft*, (in [McCartney, 1999], p.122).

²⁹⁷ J. Ramunni, in [Ramunni, 1989], p. 90, rappelle cependant qu'Herman H. Goldstine se souvient avoir reçu avant 1950 des demandes émanant de scientifiques soviétiques qui le pressaient d'expédier en U.R.S.S. des copies du *First Draft*. Concernant ce point, et plus généralement les premiers ordinateurs ayant été construits en U.R.S.S., les éléments d'information, on ne s'en étonnera guère, tendent souvent à faire défaut. En revanche, ce que l'on sait avec certitude, c'est qu'en 1953 les soviétiques possédaient plusieurs ordinateurs à architecture Von Neumann (le M.E.S.M. et le RR-409-2R en 1951, le B.E.S.M. et le M-2, en 1952, et les L.E.M.-1 et S.T.R.E.L.A. en 1953).

²⁹⁸ « *Théorie et technique pour la conception de calculateurs [d'ordinateurs] digitaux électroniques* ».

l'*Ordnance Department* de l'*U.S. Army*. Les conférenciers, dont certains, à l'instar de John W. Mauchly et John P. Eckert prononcèrent plusieurs discours, étaient les suivants : George R. Stibitz (*Bell Telephone Laboratories / National Defense Research Council*) ; Irven Travis (*Moore School of Electrical Engineering*) ; John W. Mauchly (*Electronic Control Company*) ; Derrick Henri Lehmer (*Ballistic Research Laboratory / Université de Berkeley*) ; Herman H. Goldstine (*Army Ordnance Department / Moore School of Electrical Engineering*) ; Arthur Walter Burks (*Moore School of Electrical Engineering*) ; John P. Eckert (*Electronic Control Company*) ; C. Bradford Sheppard (*Institute for Advanced Study de Princeton*) ; Howard Hataway Aiken (*Université d'Harvard*) ; T. Kite Sharpless (*Moore School of Electrical Engineering*) ; Hans Rademacher (*Université de Chicago*) ; Jeffrey Chuan Chu (*Moore School of Electrical Engineering*) ; John Hamilton Curtiss (*National Bureau of Standards*) ; Perry O. Crawford (I.B.M.) ; Samuel Byron Williams (*Bell Telephone Laboratories*) ; Jan Rajchman (*Radio Corporation of America*) ; C. N. Mooers (*Naval Ordnance Laboratory*) et, enfin, John Von Neumann (*Institute for Advanced Study / Ballistic Research Laboratory / Navy Bureau of Ordnance / Los Alamos Scientific Laboratory*). Il serait trop long ici de citer la totalité des intitulés des conférences qui furent données à cette occasion. Nous nous contenterons donc d'en mentionner seulement quelques-uns que nous considérons être particulièrement représentatifs des préoccupations majeures qui animaient les intervenants et l'assistance (majoritairement composée de scientifiques britanniques²⁹⁹ ou américains et de représentants de l'industrie et de l'armée américaine), qui participèrent à l'époque à ce séminaire absolument décisif:

- « *Digital and Analogic Computing Machines*³⁰⁰ », par John W. Mauchly.
- « *Numerical Mathematical Methods I, II, III, V, VI, VII* », par Herman H. Goldstine³⁰¹.
- « *Conversions between Binary and Decimal Number Systems*³⁰² » et « *Accumulation of Errors in Numerical Methods*³⁰³ » par John W. Mauchly.
- « *Types of Circuit – General*³⁰⁴ » et « *Reliability of Parts*³⁰⁵ » par P. J. Eckert.

²⁹⁹ Vingt-huit invitations pour assister aux *Moore School Lectures* furent envoyées aux parties intéressées aux U.S.A. et dans le reste du monde. On sait par exemple que Maurice Wilkes et certains de ses collègues de l'Université de Cambridge assistèrent à ces conférences tandis que I. J. Good représentait Max Newman pour l'Université de Manchester.

³⁰⁰ « *Machines à calculer digitales et analogiques* ».

³⁰¹ Les quatrième et huitième conférences sur les « *Méthodes mathématiques numériques* » furent prononcées par Arthur W. Burks.

³⁰² « *Conversions entre les systèmes numériques binaire et décimal* ».

³⁰³ « *De l'accumulation des erreurs dans les méthodes numérique* ».

- « *Memory Devices*³⁰⁶ » par C. B. Sheppard.
- « *Magnetic Recording*³⁰⁷ » par J. C. Chu.
- « *Electrical Delay Lines*³⁰⁸ » par P. J. Eckert.
- « *The Selectron* » par J. Rajchman.
- « *Description of Serial Acoustic Binary EDVAC*³⁰⁹ » par T. K. Sharpless.
- « *Reliability and Checking in Digital Computing Systems*³¹⁰ » par S. B. Williams.
- « *Code and Control – I, II, III, IV*³¹¹ » par C. B. Sheppard, J. Mauchly et C. N. Mooers.

Lorsque l'on procède à l'examen circonstancié de ces quelques titres choisis, qui rappelons-le à nouveau nous paraissent être parfaitement représentatifs de l'ensemble des conférences qui furent prononcées cet été-là à la *Moore School of Electrical Engineering*, il est permis de remarquer que se trouvent déjà appréhendées et mises en lumière – au milieu de l'année 1946 et alors qu'aucun ordinateur n'a encore été construit - les trois problématiques essentielles qui caractériseront, conditionneront et façonneront fondamentalement le développement de l'ordinateur et de l'informatique dans les six décennies qui suivront. Nous faisons ici référence à : 1) la question de la représentation des informations en machine et les problèmes appariés (notamment de celui de la perte cumulée de précision), liés à l'emploi des méthodes numériques dans le cadre du calcul automatique ; 2) celle de leur contrôle automatisé d'un bout à l'autre du processus de traitement machinal; 3) la question des supports mémoriels physiques susceptibles d'être utilisés pour stocker ces informations à la fois dans l'ordinateur et dans ses systèmes périphériques d'entrée et de sortie. De cela on peut conclure qu'avant même que le premier ordinateur ne soit effectivement mis en chantier, les problématiques essentielles dont les différentes solutions devaient présider à la fois à l'élaboration et au perfectionnement subséquents de ce type de machines (et donc plus généralement au développement de l'informatique), avaient été correctement identifiées et que l'on tentait déjà de leur apporter un certain nombre de réponses variées et appropriées à la fois sur les plans théoriques et expérimentaux.

³⁰⁴ « *Des différents types de circuits – vue d'ensemble* ».

³⁰⁵ « *Sur la fiabilité des composants* ».

³⁰⁶ « *Dispositifs pour la mémoire* ».

³⁰⁷ « *L'enregistrement [sur des supports] magnétique(s)* ».

³⁰⁸ « *Sur les lignes délai électriques* ».

³⁰⁹ « *Description d'un E.D.V.A.C. à fonctionnement binaire et sériel doté de lignes délai acoustiques* »

³¹⁰ « *Fiabilité et vérification [de l'erreur] dans les systèmes de calcul digitaux* ».

³¹¹ « *Code et contrôle I, II, III, IV* ».

Dans la foulée immédiate de ces deux événements majeurs, ou quelques années seulement après qu'ils aient eu lieu, de nombreux projets de machines scientifiques ou militaires furent parallèlement démarrés dans le monde, qui reposaient entièrement sur l'architecture logique que J. Von Neumann avait spécifiée et détaillée dans son célèbre rapport. On pourra citer, entre autres ordinateurs, la *Manchester Machine* élaborée à l'Université de Manchester (G.B.) ; le Ferranti Mark I, une version améliorée de la *Manchester Machine* construite par la firme *Ferranti Limited* (G.B.) ; l'E.D.S.A.C., de l'université de Cambridge (G.B.) ; le *Pilot A.C.E.*³¹² (la cinquième version de la machine du N.P.L., également appelée *test assembly*), construit par Alan M. Turing au *National Physical Laboratory* (G.B.) ; l'E.D.V.A.C. bien sûr, qui fut fabriqué à la *Moore School of Electrical Engineering* (U.S.) ; le B.I.N.A.C. fabriqué par l'E.M.C.C. pour le compte de la *Northrop Aircraft Company* (U.S.) ; L'*Institute for Advanced Study Machine* (I.A.S.M.) construit par Von Neumann à l'I.A.S. (U.S.), et ses très nombreuses variantes (le J.O.H.N.N.I.A.C. de la *Rand Corporation*, le M.A.N.I.A.C. de Los Alamos, l'A.V.I.D.A.C., l'O.R.A.C.L.E. de l'*Argonne National Laboratory*, l'O.R.D.V.A.C. et l'I.L.L.I.A.C. I de l'Université de l'Illinois³¹³, etc.). De manière parfaitement fortuite, il s'avère qu'à l'exception de l'A.C.E. du N.P.L., la liste que nous venons de dresser correspond exactement à celle établie par Philippe

³¹² Fondamentalement, le N.P.L. *Automatic Computing Engine* (le terme *Engine* étant bien sûr une référence directe aux machines construites au 19^{ème} siècle par Charles Babbage), était une machine dont l'architecture répondait au schéma logique qui avait été défini par J. Von Neumann en 1945. Cependant, et on ne saurait guère s'en étonner lorsque l'on sait qu'Alan M. Turing présida à sa destinée entre la fin de l'année 1945 et 1949 (moment où il rejoignit l'équipe du S.S.E.M. – *Small-Scale Electronic Machine* - dirigée par Frederic Williams et Tom Kilburn à l'Université de Manchester), elle s'écartait sensiblement de ce *design* dans la mesure où le logicien et mathématicien britannique, dans son rapport de 1945 intitulé *Proposals for Development in the Mathematics Division of an Automatic Computing Engine (ACE)*, avait choisi de privilégier nettement la programmation de la machine par rapport à sa circuiterie, la première devant selon lui déterminer largement les caractéristiques de la seconde. L'A.C.E., dont Turing suggéra que ses instructions pourraient être directement représentées sous forme numérique était susceptible de modifier ses propres instructions en cours de processus (l'idée d'une machine capable de s'auto-modifier en fonction de ses états passés et courants, c'est-à-dire « d'apprendre », était par conséquent présente ici). Une autre idée importante était la manière dont Turing définissait la notion d'instruction. Il ne s'agissait pas pour lui d'entités opératoires complètes, mais plutôt d'unités ou de composantes élémentaires dont la combinatoire permettait de construire des sous-programmes (éventuellement réutilisables par la suite). On peut légitimement considérer cela comme une forme première du concept de microprogrammation.

³¹³ La signification correspondant à chacun des acronymes précités est la suivante : E.D.S.A.C. : *Electronic Delay Storage Automatic Computer* ; A.C.E. : *Automatic Computing Engine* ; E.D.V.A.C. : *Electronic Discrete Variable Automatic Computer* (et non *Electronic Discrete Variable Computer* comme l'écrit P. Breton dans son index général) ; B.I.N.A.C. : *BINARY Automatic Computer* ; J.O.H.N.N.I.A.C. : *John [Von Neumann's] Integrator and Automatic Computer* ; M.A.N.I.A.C. : *Mathematical Analyzer, Numerical Integrator, and Computer* ; A.V.I.D.A.C. : *Argonne's Version of the Institute Digital Automatic Computer* ; O.R.A.C.L.E. : *Oak Ridge Automatic Computer and Logical Engine* ; O.R.D.V.A.C. : *Ordnance Discrete Variable Automatic Computer* ; I.L.L.I.A.C. : *ILLinois Automatic Computer*.

Breton lorsqu'il évoque dans son *Histoire de l'informatique* les « cinq machines [qui] furent véritablement les premiers ordinateurs ³¹⁴».

S'il faut maintenant retenir une date, tout au moins un intervalle chronologique, permettant de repérer avec une certaine précision historique le moment où l'ère de l'ordinateur débuta véritablement (et cela indépendamment de son instantiation matérielle), alors la période courant du mois de juillet 1945 au mois d'août 1946, c'est-à-dire la période dont les bornes inférieure et supérieure correspondent respectivement à la diffusion du *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.* et à la tenue des *Moore School Lectures*, nous semble tout à fait susceptible d'être avancée. C'est à partir de là, c'est-à-dire finalement à partir du moment où l'espace informatique commença à s'ouvrir et à s'épanouir vraiment avec la diffusion du *First Draft* et celle d'un « savoir » technique informatique en train de se former que la sphère du calcul automatique, comme nous l'affirmions plus haut, se transforma radicalement tout en se compliquant de façon de plus en plus perceptible. Avant que ne débute la seconde guerre mondiale, trois lignées de machines à calculer participant de deux genres techniques fondamentaux, le type analogique ou digital, avaient concurremment existé: les calculateurs mécaniques analogiques (comme les analyseurs différentiels construits par Vannevar Bush et installés au M.I.T., au B.R.L. et à la *Moore School* au début des années 30 ou encore leur version électrisée élaborée en 1942 par V. Bush et Samuel H. Caldwell), les petites et les grandes machines digitales électromécaniques (comme le B.T.L.C. Model I³¹⁵ de George R. Stibitz, l'Harvard Mark I / I.B.M. A.S.C.C. de Howard Aiken, la série des calculateurs Z de Konrad Zuse³¹⁶, ou encore les *electric accounting machines* produites par des firmes telles qu'I.B.M., Marchant ou Monroe) et, enfin, de très rares calculateurs électroniques digitaux qui en l'état, et malgré leur nature indubitablement révolutionnaire, tenaient plus du dispositif prototypique que de machines complètement opérationnelles (on mentionnera évidemment l'*Atanasoff-Berry Computer*, construit entre 1939 et 1942 à l'*Iowa State University* par le Dr. John Vincent Atanasoff et son étudiant, Clifford Berry, et dont le *design* devait par la suite tellement « inspirer » John

³¹⁴ In [Breton, 1990], p. 97.

³¹⁵ *Bell Telephone Laboratories Computer Model 1*: cette machine, également appelée *Complex Number Calculator*, fut le premier calculateur à relais binaires. Il fut construit entre avril et octobre 1939 sous la direction de George Stibitz.

³¹⁶ Notons que le calculateur Z3 de K. Zuse, dont la construction fut achevée au mois de décembre de l'année 1941 (ce qui correspond à peu près à la période à laquelle John V. Atanasoff terminait celle de l'A.B.C.), fut le premier calculateur digital « générique » programmable jamais construit. Le fait qu'il n'ait pas été électronique mais électromécanique explique peut-être pourquoi on s'en souvient si peu.

W. Mauchly³¹⁷ lors de la construction de l'E.N.I.A.C. ainsi que le « modèle » de Z2 à tubes à vide qu'Helmut Schreyer, un ami de Konrad Zuse, avait fabriqué en Allemagne entre 1937 et 1938³¹⁸). Le déclenchement de la seconde guerre mondiale, si l'on accepte provisoirement de ne pas tenir compte ici de l'E.N.I.A.C. et des autres projets militaires secrets conduits alors aux U.S.A. ou en Angleterre – n'altéra guère cette situation, tout au moins dans un premier temps. Au début des années quarante, comme du reste auparavant, il n'existait de par le monde que très peu d'analyseurs différentiels³¹⁹ (aux Etats-Unis comme en Grande-Bretagne ils furent d'ailleurs tous réquisitionnés par les forces armées pour calculer des tables de tir balistique), les *electric accounting machines* n'avaient généralement bénéficié que d'améliorations techniques fort limitées (l'effort principal consistant, lorsque cela s'avérait

³¹⁷ On sait en effet que John W. Mauchly, alors professeur de physique à l'*Ursinus College*, rencontra John V. Atanasoff au mois de décembre 1940 lors du congrès que tenait annuellement l'*American Association for the Advancement of Science*. A ce moment là, le travail de J. V. Atanasoff et C. Berry sur l'A.B.C. était déjà bien avancé. Au mois de juin de l'année qui suivit, J. W. Mauchly séjourna plusieurs jours à l'*Iowa State University* (où Atanasoff officiait comme professeur associé de mathématiques et de physique). Durant cette visite, Atanasoff lui fit part, apparemment de manière extrêmement détaillée, de ses idées novatrices concernant le calcul numérique électronique. A cette occasion, bien entendu, Mauchly eut aussi tout le loisir d'examiner minutieusement l'A.B.C. en même temps qu'il pu se faire expliquer son fonctionnement. A peu près au même moment, Mauchly quitta l'*Ursinus College* pour rejoindre la *Moore School of Electrical Engineering*. On ignore quelles furent réellement la portée et la profondeur véritables des discussions qu'eurent les deux hommes lors de cette rencontre. Toujours est-il qu'au mois d'août 1942, l'ébauche d'un projet pour la construction d'un calculateur électronique, intitulé « *The Use of High Speed Vacuum Tube Device for Calculating* » et signé par Mauchly, circula à la *Moore School*. Loin de nous ici l'idée d'affirmer que J. W. Mauchly vola purement et simplement ses idées à J. V. Atanasoff. Après tout, comme on dit parfois, celles-ci étaient dans « l'air du temps » (pas moins de sept brevets portant sur l'emploi de composants électroniques pour réaliser automatiquement les opérations arithmétiques élémentaires furent en effet déposés entre janvier 1940 et novembre 1942 par la N.C.R., la R.C.A. et I.B.M. et nous ne tenons pas compte ici des calculateurs militaires de ce genre qui furent secrètement développés à peu près à la même période). Un des arguments généralement avancés pour la « défense » de Mauchly portait sur le fait que l'A.B.C. était un calculateur électronique hautement spécialisé (en fait une machine spécialement conçue pour la résolution d'équations algébriques linéaires), alors que ce que Mauchly avait en tête en 1941-1942 était un instrument de calcul de portée plus générale (c'était là la version de l'histoire qui fut avancée par A. W. Burks et A. R. Burks). Concernant ce point, il est impératif de faire montre d'une extrême prudence puisque H. H. Goldstine, dans [Goldstine, 1972], p. 126, prenant justement le contre-pied de cette affirmation, a écrit la chose suivante : « *Atanasoff also apparently had ideas for a more general-purpose electronic digital computer and discussed his nascent ideas with Mauchly on this occasion.* »... Lors du retentissant procès qui, pour d'obscures questions de brevets, opposa de 1967 à 1973 *Honeywell* et la *Remington Rand* aux U.S.A., les travaux effectués par J. V. Atanasoff dans le domaine du calcul digital électronique furent « accidentellement » redécouverts et leur priorité historique reconnue par la justice américaine...

³¹⁸ Cette machine, qui en fait ne constituait qu'une partie seulement du calculateur Z2, fit l'objet d'une démonstration publique à l'Université des Techniques de Berlin en 1938. Cette ligne de développement, un temps envisagée pour construire le Z2, fut cependant assez vite abandonnée par K. Zuse étant donné que dans l'Allemagne d'avant-guerre, il était absolument inconcevable d'obtenir le millier de tubes à vide qui étaient nécessaires à sa construction. Helmut Schreyer ne perdit pas pour autant son intérêt pour la technologie électronique puisque sa dissertation doctorale, qu'il soutint en 1941, s'intitulait « *The Tube Relay and the Techniques of its Switching* ». Le Z2, tout comme le Z3, le Z4 et le Z5, furent tous des calculateurs reposant sur la technologie des relais. Il fallut attendre l'année 1956, et la série des Z22 et Z23, pour que Konrad Zuse construise une machine digitale électronique (une version à tubes à vide, puis une version transistorisée furent successivement produites entre 1956 et 1963 par la Zuse KG).

³¹⁹ Ainsi, à propos des analyseurs différentiels, le physicien britannique Douglas Hartree pouvait-il écrire en 1940 dans la revue *Nature* : « *There are now, as far as I know, altogether seven or eight full-size machines in operation in the world. There are also, in Great Britain, several smaller and less accurate model versions of the machine* », in *Nature*, vol. 146, 1940. Cité dans [Goldstine, 1972], p. 97.

effectivement nécessaire, à les adapter à de nouvelles tâches et, ici encore, il s'agissait principalement du calcul de tables de tir balistique) et les grands « monstres mécaniques », pour reprendre ici l'expression un peu colorée de Michael R. Williams, s'étaient également vus « mobilisés » par l'armée sitôt qu'ils avaient été opérationnels (ce fut par exemple le cas du Mark I / I.B.M. A.S.C.C. qui, lorsqu'il fut mis en marche à l'Université d'Harvard au mois de janvier 1944 fut immédiatement assigné à la réalisation de tâches relevant du domaine militaire). Quant aux rarissimes prototypes de machines électroniques qui avaient été conçus jusque-là dans le milieu universitaire, comme l'A.B.C.³²⁰, ils restèrent peu ou prou dans l'ombre jusqu'à ce que le projet PX (E.N.I.A.C.), soit démarré à la *Moore School of Electrical Engineering* à la toute fin du mois de mai 1943 pour le compte du *Ballistic Research Laboratory*.

S'il nous est encore permis ici de la rapporter d'une façon quelque peu abrégée, la situation à l'orée de la guerre et jusqu'en 1943 était donc la suivante : d'un côté on trouvait des machines analogiques en très faible nombre et, de l'autre, de nombreuses machines numériques mécaniques ou électromécaniques dont les dimensions et les performances pouvaient varier de façon sensible. Dans le sillage de ces dernières, comme nous l'avons vu, quelques rares calculateurs numériques électroniques avaient également été réalisés mais étant donné qu'ils étaient de petite taille, qu'ils étaient dépourvus de mémoire interne et qu'ils n'étaient pas programmables, leurs performances demeuraient fort modestes en regard de celles que pouvaient couramment afficher à l'époque la plupart des calculateurs numériques électromécaniques et des instruments analogiques (l'A.B.C., qui était une « petite » machine spécialisée à fonctionnement *binaire* et *parallèle*, ne pouvait réaliser directement que les opérations d'addition et de soustraction tandis que la fréquence de son *horloge interne* atteignait « seulement » 60 Hz). Compte tenu de leur nature spécialisée et prototypique, de leur vitesse de fonctionnement qui était somme toute assez limitée, et surtout de la méfiance que ne manquait jamais d'inspirer l'emploi de la technologie électronique à la plupart des constructeurs et utilisateurs de calculateurs, ces dispositifs marginaux, finalement, n'attirèrent que très peu l'attention sur eux. Après tout, les calculateurs mécaniques ou électromécaniques construits avant et pendant les premières années de la guerre, qu'ils aient été du reste analogiques ou digitaux, remplissaient parfaitement leur fonction et, à la différence des quelques systèmes électroniques qui pouvaient exister alors, ils permettaient d'effectuer des calculs complexes et variés dans des délais parfaitement acceptables. Jusqu'à ce que les

³²⁰ *Atanasoff-Berry Computer*.

impératifs de la guerre viennent à en décider autrement, il n'y avait donc pas véritablement lieu d'imaginer remplacer des machines efficaces dont on maîtrisait parfaitement à la fois la technologie et les processus de construction par des dispositifs d'un type nouveau qui, s'ils ne soulevaient guère d'enthousiasme, ne manquaient pas en revanche d'attirer sur eux toutes les suspicions du fait même qu'ils étaient électroniques. L'arrivée de l'ordinateur dans la période de l'immédiat après-guerre, si elle devait effectivement entraîner à court terme un bouleversement radical dans ce paysage demeuré jusque-là relativement stable, ne devait pas pour autant signifier l'extinction soudaine des deux grandes lignées techniques de calculateurs avec lesquelles ses quelques précurseurs électroniques avaient très discrètement cohabité. Après 1946 en effet, les calculateurs mécaniques ou électromécaniques de type analogique ou de type numérique continuèrent à être très largement exploités dans les centres universitaires de recherche scientifique et les instituts militaires de pointe américains ou britanniques. En vue de rendre compte de cet état de fait, on peut principalement avancer deux éléments d'explication. *Primo*, l'hostilité souvent marquée à l'égard de l'emploi de la technologie électronique³²¹ dans le domaine des instruments de calcul telle qu'elle avait pu être couramment rencontrée dans les milieux industriels³²² et scientifiques avant et pendant la deuxième guerre mondiale ne s'était pas été totalement dissipée avec la réalisation de l'E.N.I.A.C., preuve matérielle absolument magistrale, s'il en est, de la fiabilité, de la viabilité et des capacités extraordinaires pourtant promises par cette technologie. Ainsi, des personnages aussi influents que George R. Stibitz ou Samuel H. Caldwell restèrent pour un temps encore campés sur les positions prudentes, mais fortement sceptiques quant aux avantages réels offerts par l'usage de composants électroniques, qu'ils avaient pu officiellement exprimer au début des années quarante. Au *Massachusetts Institute of Technology*, qui de 1927 à 1942 s'était imposé comme l'un des pôles scientifiques majeurs dans le domaine du développement et de l'usage d'instruments de calcul analogiques, l'attitude dominante affichée vis-à-vis du possible emploi de composants électroniques dans les calculateurs ne différait guère de cela. A cet égard, Herman H. Goldstine nous semble assez bien résumer l'atmosphère qui régnait alors au sein de cette prestigieuse institution de recherche lorsqu'il écrit :

« *This program [i.e. le programme de développement de calculateurs analogiques mené au M.I.T. par V. Bush et S. H. Caldwell] was carried out in the period from 1927*

³²¹ Il s'agissait bien entendu des tubes à vide.

³²² Notamment, nous l'avons déjà dit, chez I.B.M.

*through 1942 and was quite successful. Perhaps its only defect was that it committed – at least intellectually – the engineers at M.I.T. to the analog point of view to the exclusion of the digital one for many years. This was, of course, subconscious but nonetheless present in the mind of Bush colleagues. It required the efforts of a subsequent generation centered around Jay W. Forrester to break with this tradition and push MIT into the modern era of electronic digital computer*³²³».

Que la résistante à l'approche digitale du calcul automatique - et aussi à l'emploi de l'électronique - dont pouvaient encore faire montre la plupart des ingénieurs du M.I.T. aussi tard qu'en 1945 ait été ou non de nature « subconsciente », ainsi que le suggère H. H. Goldstine dans ce bref extrait, nous importe finalement assez peu. Ce qui en revanche nous semble plutôt intéressant de retenir ici, c'est que quinze années passées à travailler – avec un certain succès il faut le concéder - sur la seule approche analogique du calcul avaient fortement contribué à instaurer au M.I.T. une forme d'opposition tout particulièrement marquée à l'encontre du calcul digital en général et de la technologie électronique en particulier. Cette tradition, désignons de la sorte une posture pareillement empreinte de ce genre de conservatisme, s'avéra extrêmement difficile à combattre et lorsqu'au mois de septembre de l'année 1945, il devint parfaitement évident qu'en l'état le *Aircraft Stability and Control Analyser Projet*³²⁴ - un simulateur de vol « universel » contrôlé par un calculateur analogique pourvu d'une *mémoire* et devant fonctionner en *temps réel* – ne pourrait jamais offrir les temps de réponse extrêmement brefs forcément requis par une tâche calculatoire aussi complexe et exigeante, il fallut toute l'opiniâtreté de Jay Forrester, Perry Crawford et Robert R. Everett, tous membres du *Servo Mechanisms Laboratory* du M.I.T., pour imposer l'idée que cette machine, afin de répondre à de telles contraintes techniques, devrait être à la fois digitale *et* électronique (le succès de l'E.N.I.A.C., comme de bien entendu, ne fut pas réellement étranger à ce changement de cap pour le moins radical). Cette ambiance de

³²³ In [Goldstine, 1972], p. 91.

³²⁴ Le projet de simulateur de vol analogique A.S.C.A. résultait d'un partenariat initié en octobre 1944 entre le *Massachusetts Institute of Technology* et l'*U.S. Navy's Special Devices Center of the Bureau of Aeronautics*. En 1948, l'A.S.C.A. (qui avait été renommé *Whirlwind* en 1946), était devenu un véritable ordinateur digital électronique sous l'impulsion décisive de Jay Forrester. A cette époque, il fut « récupéré » par l'*Office of Naval Research*. Cette machine militaire devait revêtir par la suite une importance considérable puisqu'elle permit entre autres avancées de révéler que les dispositifs mémoriels utilisés alors au cœur des machines électroniques digitales ne permettaient pas d'optimiser le calcul électronique. Le *Whirlwind* – ou plutôt ses versions subséquentes fabriquées par I.B.M., l'AN/FSQ7 et l'AN/FSQ 8 - constituèrent également les éléments de base du système américain de surveillance antiaérien distribué S.A.G.E. (*Semi Automatic Ground Environment*). Il inspira aussi, en même temps que l'I.A.S.C. de Von Neumann, les ingénieurs d'I.B.M. pour la construction des ordinateurs militaire et civil I.B.M. 701et 702. Etant donné le rôle fondamental qu'il joua dans l'histoire de l'informatique, nous ne manquerons pas de revenir plus longuement sur l'épopée formidable du *Whirlwind*.

défiance qui régnait au milieu des années quarante au M.I.T. ne saurait être considérée comme une sorte de cas isolé et, en vérité, nombreux étaient ceux qui, dans les instituts universitaires de recherche ou dans l'industrie du *Data Processing*, même convertis à l'approche numérique, affichaient une position semblable à l'égard de l'électronique. Quoi qu'il en soit, cet exemple très significatif nous permet de mesurer exactement à quel point l'acceptation de cette technologie, dans l'immédiat après-guerre, ne se fit pas aussi spontanément et aisément que ce que l'on est quelquefois enclins à croire. *Deusio*, la fin de la seconde guerre mondiale ne signifia pas pour autant que les énormes besoins en matière d'instruments de calcul puissants qui s'étaient pleinement révélés entre 1939 et 1945 s'étaient soudainement résorbés. Certes, en 1946, l'ordinateur avait été inventé et son schéma logique exactement spécifié, mais à cette date, bien évidemment, aucune machine de ce type n'avait encore été construite et de nombreuses interrogations, théoriques ou techniques, demeuraient encore en suspens. Dans les faits, il s'écoula généralement plusieurs années entre le moment où les premiers ordinateurs, ici ou là, furent mis en chantier et celui où ils furent totalement opérationnels³²⁵ et livrés aux institutions qui en avaient financé la construction. Entre temps bien sûr, la nécessité qui était faite aux militaires et aux scientifiques de disposer d'une très grande puissance de calcul n'avait pas, loin s'en faut d'ailleurs, diminuée (nous étions ne l'oublions pas à l'aube de la guerre froide). Les analyseurs différentiels et les grosses machines électromécaniques qui avaient été fabriquées avant ou pendant la guerre – comme l'I.B.M. A.S.C.C. / Harvard Mark I ou encore le *Relay Interpolator*³²⁶ et les Models III³²⁷, IV et V des *Bell Telephone Laboratories*. – continuèrent ou commencèrent donc, selon le cas, à être intensivement employées. Parallèlement à la construction des premiers ordinateurs qui venait tout juste de débiter de façon quasi simultanée aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne, de nouvelles machines participant de l'un ou l'autre des deux genres techniques précités furent également mises en chantier. Au M.I.T., et à côté de l'A.S.C.A.P., Vannevar Bush présenta par exemple en 1945 une machine analogique « *composée de 30 unités intégratrices, en mesure d'effectuer des calculs relevant du problème des trois corps*³²⁸ ... ». Si les calculateurs analogiques mécaniques ou électromécaniques continuèrent quelquefois à être utilisés dans certains

³²⁵ La construction de l'E.D.V.A.C. par exemple débuta en 1947 et fut achevée en 1952. La même année, J. P. Eckert et J. W. Mauchly commencèrent à fabriquer le B.I.N.A.C. qui fut terminé en 1949. A cette époque, le temps requis pour concevoir et compléter intégralement un ordinateur variait généralement de 2 à 5 ans.

³²⁶ Le *Relay Interpolator*, un calculateur numérique à relais conçu afin de simuler les mouvements d'une cible aérienne, vit sa construction achevée au mois de septembre 1943. Il fut originellement baptisé *Bell Model II Relay Calculator* avant d'être renommé *Relay Interpolator* un peu plus tard.

³²⁷ Le calculateur à relais *Bell Model III*, mieux connu sous la désignation plus évocatrice de *Ballistic Calculator*, fut terminé au mois de juin 1944.

³²⁸ In [Ramunni, 1989], p. 33.

centres de calcul jusqu'à la fin des années cinquante³²⁹, ils ne connurent cependant plus guère de développements qui puissent être réellement qualifiés de remarquables³³⁰. En 1941, Claude Shannon, l'auteur de la théorie de l'information, avait en effet publié dans le *Journal of Mathematics and Physics* un article d'une quinzaine de pages intitulé « *Mathematical Theory of the Differential Analyser*³³¹ » dans lequel il avait procédé à l'analyse des principes mathématiques fondamentaux sous-tendant le fonctionnement de cette famille de calculateurs. En plus d'avoir spécifié la classe de problèmes mathématiques qui était susceptible d'être traitée au moyen de la méthode analogique, Shannon avait très exactement évalué les limites physiques inhérentes aux instruments de calcul analogiques (vitesse de fonctionnement étroitement dépendante des caractéristiques mécaniques de la machine et apparition possible d'un phénomène de *clippage* pouvant atteindre un niveau tellement catastrophique qu'il finissait quelquefois par menacer l'effectuation de la procédure de calcul). Ce travail, élégamment mené par C. Shannon selon une approche logico-mathématique rigoureuse ne devait pas immédiatement signer l'arrêt de mort des machines analogiques mais leur sort, étant donné la démonstration théorique qui avait été donnée de leurs limites physico-mathématiques intrinsèques et indépassables, fut à partir de là définitivement scellé. Quant aux grands calculateurs digitaux à relais, ils continuèrent après-guerre à être régulièrement utilisés et ponctuellement construits pour les mêmes raisons (aucun ordinateur n'existait encore et les besoins en puissance de calcul demeuraient considérables). En marge de cela, et c'est peut-être tout aussi important, il ne faut pas non plus omettre de prendre en compte le fait que le coût total de la réalisation de machines numériques électromécaniques telles que le

³²⁹ Ce fut par exemple le cas de l'analyseur différentiel construit dans les années 30 au M.I.T. par V. Bush et qui fut cédé en 1954 à la *Wayne University* où il resta en fonction jusqu'en 1960. Soit dit en passant, il est assez difficile de ne pas se montrer admiratif devant la durée de vie qui fut celle de cet artefact, surtout quand on en vient à la comparer à celle de nos ordinateurs actuels laquelle, en l'état actuel des choses, dépasse assez rarement trois ans ou quatre ans.

³³⁰ Hormis un dispositif peu connu et de fait assez rarement mentionné dans les travaux consacrés à l'histoire du calcul automatique, le *Mischgerät*, qui fut construit entre 1941 et 1943 à Peenemünde par l'ingénieur allemand Helmut Hoelzer (lequel, soulignons-le, ne connaissait pas K. Zuse). Alors qu'il travaillait dans le centre ultrasecret de Peenemünde sous la direction de Wernher von Braun, H. Hoelzer contribua tout d'abord à la mise au point d'un système de guidage par faisceau radio (le *Leitstrahlverfahren*), destiné à permettre de contrôler à distance la trajectoire en vol des fusées à longue portée A4 (ou V2 – pour *Vergeltungswaffe* - comme elles ne tardèrent pas à être sinistrement renommées par le *Reichpropagandaministerium* à la suite des raids aériens américains sur Berlin). Il construisit ensuite un calculateur analogique digital *électronique*, le *Mischgerät*, qui devait être installé sur les fusées V2 pour permettre leur contrôle en *temps réel* (cette machine fut ainsi le premier calculateur embarqué à bord d'un engin volant). Enfin, et comme conséquence directe de ce travail, H. Hoelzer élaborait un calculateur analogique électronique qui fut employé pour *simuler* les trajectoires balistiques des lanceurs offensifs allemands en résolvant les équations du mouvement. Après la guerre, von Braun, Hoelzer et 116 scientifiques allemands gagnèrent les Etats-Unis pour « collaborer » à l'opération *Paperclip* (le projet de missiles balistiques américains mené à Fort Bliss, Texas). Par la suite, Hoelzer devint directeur du laboratoire de calcul du *Marshall Space Flight Center* et participa à la mise au point des fusées américaines *Saturn V*.

³³¹ « *Mathematical Theory of the Differential Analyser* », *Journal of Mathematics and Physics*, n° 20, 1941, pp. 337-354.

Harvard Mark I / I.B.M. A.S.C.C. ou le Bell Model V se situait généralement dans une fourchette de prix oscillant entre 400000 et 500000 dollars de l'époque alors que l'E.N.I.A.C., qui n'était pas un ordinateur mais un calculateur électronique encore appelé à faire ses preuves coûta au total 486804.22 dollars³³². En dépit de l'effort financier gigantesque qui fut consenti par le gouvernement américain à partir de 1946-1947 pour lancer la recherche et le développement des ordinateurs aux Etats-Unis, et compte tenu du climat de méfiance qui régnait encore autour de l'électronique dans ce pays, il n'est pas étonnant de constater qu'un certain nombre d'institutions militaires ou universitaires – prudentes ou frileuses, on jugera – aient finalement préféré investir dans des instruments automatiques de calcul peut-être moins performants et révolutionnaires que ce que pourrait être l'ordinateur – ceci restait cependant encore à démontrer - mais à coup sûr éprouvés, fiables, maîtrisés et, selon, toutes prévisions, nettement moins coûteux³³³ à fabriquer.

Les trois grandes lignées techniques d'instruments de calcul qui avaient été inventées et/ou développées avant la deuxième guerre mondiale – calculateurs analogiques, calculateurs numériques mécaniques ou électromécaniques et, dans une moindre mesure, calculateurs numériques électroniques - continuèrent donc à coexister une fois celle-ci terminée pour les raisons mêmes que nous venons d'exposer ci-dessus. Mais ce conflit guerrier global, tout de même qu'il devait transformer les hommes et bouleverser à jamais notre conception du monde et de l'humanité, devait modifier de manière toute aussi radicale l'ordre établi qui jusque-là avait prévalu dans la sphère des instruments de calcul automatiques. Les mutations conceptuelles et techniques qui présidèrent à ces changements profonds – bien que survenues dans un champ d'activités hautement spécialisé - à leur tour et rétroactivement allaient dans les quelques décennies ultérieures transformer progressivement, mais tout aussi fondamentalement, notre compréhension du monde, notre façon d'y exister, mais également et peut-être surtout notre rapport à nous-mêmes et aux autres.

Nous avons soutenu plus haut qu'à partir des années 1945-1946, ce que nous avons nommé le « paysage » du calcul automatique s'était considérablement compliqué. Pourquoi une telle allégation ? Qu'est-ce que cela peut bien signifier en vérité ? En quoi cette complexification consista-t-elle réellement ? Ainsi que nous l'avons indiqué antérieurement, il

³³² Alors que dans un mémorandum daté du mois d'octobre 1943, le professeur John G. Brainerd de la *Moore School of Electrical Engineering* avait informé Harold Pender, alors doyen de cette institution, que les coûts de développement pour cette machine s'élèveraient à peu près à 150000 dollars. L'E.N.I.A.C. coûta au final plus de trois fois cette somme.

³³³ Rappelons ici par exemple que l'ordinateur construit à l'Université de Cambridge par Maurice Wilkes, l'E.D.S.A.C., coûta un million de dollars. Le coût lié au développement et à la fabrication des premiers ordinateurs, que ce soit aux Etats-Unis ou en Grande-Bretagne, devait fréquemment atteindre une telle somme...

existait dans la période d'avant-guerre et pendant celle-ci deux genres fondamentaux de calculateurs automatiques, à savoir les machines analogiques et les machines numériques (nous examinerons un peu plus tard les traits spécifiques qui permettent de faire effectivement le départ entre ces deux grandes catégories de dispositifs). Sous ces deux genres différents pouvaient être subsumées plusieurs espèces de machines. La figure ci dessous, représente sous forme schématique l'ensemble de ces relations.

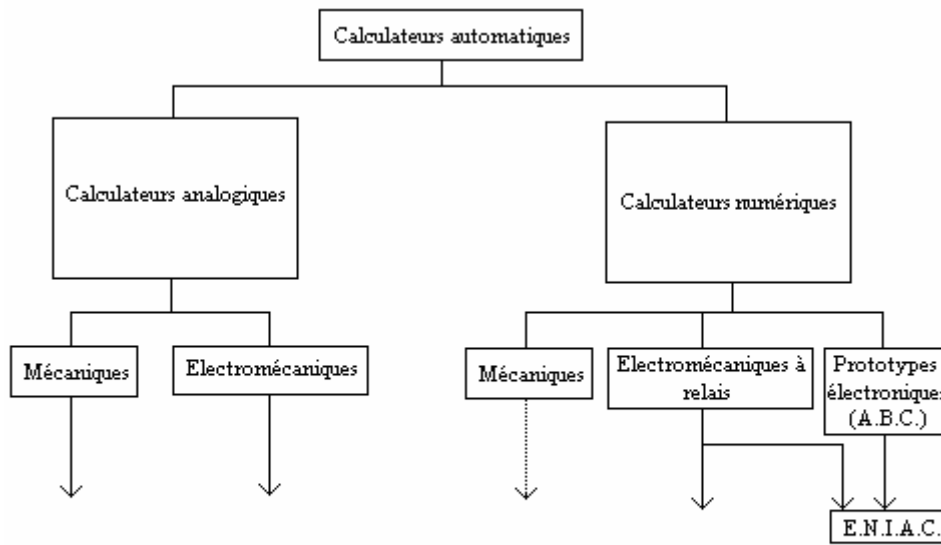


Fig 1.: genres et types de calculateurs automatiques construits avant et pendant la deuxième guerre mondiale.

Il doit tout d'abord être noté que le type technologique des composants employés pour construire ces différents calculateurs ne déterminait en aucun cas leur appartenance à l'un ou l'autre des genres analogique ou numérique (les critères fondamentaux qui permettent de les différencier ne se situent donc pas sur ce plan particulier). Inversement, le fait qu'une machine participe du type analogique ou numérique n'impliquait pas qu'elle doive nécessairement être composée d'éléments mécaniques, électromécaniques ou électroniques. Avant que l'ordinateur ne soit inventé, il existait donc des calculateurs numériques mécaniques, électromécaniques ou électroniques tout comme il existait des calculateurs analogiques mécaniques ou électromécaniques. Il doit être aussi mentionné que dans un cas au moins – il s'agissait en l'occurrence du *Rockefeller Differential Analyser #2*, ou R.D.A.2., fabriqué quelques temps avant la guerre par Vannevar Bush - des composants électroniques furent également utilisés dans la fabrication d'un analyseur différentiel (donc d'une machine à calculer de type analogique). Cependant cette machine n'était pas entièrement électronique. En vérité, seules les interconnexions mécaniques rencontrées usuellement sur les dispositifs

antérieures (celles servant à relier les axes des disques d'entrée à ceux des disques de sortie), avaient été ici remplacées par des composants électroniques (dans *The Computer and The Brain*, J. Von Neumann nomme « selsyns » de tels dispositifs électriques ou électroniques³³⁴). Tout le reste, et notamment ces unités essentielles des analyseurs différentiels qu'étaient les modules intégrateurs et différenciateurs, devait demeurer mécanique. En conséquence, le R.D.A.2. doit plutôt être considéré comme une machine analogique hybride mêlant éléments mécaniques et, dans une moindre mesure, éléments électroniques, et non pas, à proprement parler, comme un instrument de calcul véritablement électronique. En raison du très faible nombre de calculateurs de ce type qui furent effectivement construits et surtout de leur nature technologique mélangée, nous n'avons pas jugé véritablement indispensable de faire apparaître dans le schéma qui précède un champ « Electroniques » sous le genre « Calculateurs analogiques » et avons préféré ranger ceux-là – par défaut pour ainsi dire – sous la classe spécifique des calculateurs analogiques mécaniques. Une deuxième chose se doit maintenant d'être remarquée qui concerne à la fois les calculateurs numériques électroniques (ceux que nous avons en fait désignés comme étant des « prototypes »), et les calculateurs à relais (ou machines électromécaniques). De toutes les classes de calculateurs automatiques ci-dessus distinguées partent des droites verticales orientées vers le bas qui ont simplement pour fonction d'indiquer que la plupart de ces machines devaient connaître, à l'exception notable des calculateurs numériques mécaniques³³⁵, une descendance directe après-guerre. Notons que la notion de « descendance » n'implique pas nécessairement – et comme corrélativement – celles de mutation ou de perfectionnement technologiques. Ainsi les calculateurs électromécaniques numériques et les dispositifs analogiques, s'ils furent encore occasionnellement fabriqués et utilisés après la deuxième guerre mondiale, c'est-à-dire au moment où l'ordinateur fut inventé et commença à être construit, n'évoluèrent que très peu sur les plans purement architecturaux et technologique. Autrement dit, les principes théoriques et techniques essentiels sur lesquels leurs modalités d'opération respectives reposaient fondamentalement ne firent pas l'objet d'un authentique processus de

³³⁴ In [Von Neumann, 1958], p. 22.

³³⁵ C'est précisément ce que symbolise sur notre schéma la flèche hachurée qui figure sous cette catégorie. La lignée des dispositifs digitaux mécaniques s'éteignit en fait autour de 1945-1946, et les descendants des grandes machines numériques mécaniques qui avaient existé pendant de la guerre, comme l'I.B.M. A.S.C.C. / Harvard Mark I ou bien le Z1, furent le plus souvent des calculateurs à relais, nettement plus performants que ces dernières (les relais commutaient en effet beaucoup plus rapidement que les éléments mécaniques qui leur étaient fonctionnellement équivalents). Si ces calculateurs conservèrent la plupart du temps la dénomination des dispositifs qui les avaient précédés, la technologie sur laquelle ils reposaient désormais était donc celle des relais.

renouvellement³³⁶. Il n'en alla pas exactement de même en ce qui concerne les calculateurs électroniques. On s'étonnera peut-être de ce que sous cette classe particulière de machines numériques, nous ayons fait immédiatement figurer l'E.N.I.A.C. Or il ne s'agissait pas là, comme chacun peut bien le savoir, d'une catégorie spécifique recouvrant un ensemble de machines à calculer automatiques étroitement apparentées mais bel et bien d'un calculateur singulier. Et même plus : ce fut instrument absolument unique en son genre. Il devait être ainsi le premier et le dernier représentant de la lignée de machines qu'il inaugura ... et clôtura, celle des grands calculateurs numériques électroniques. Cette qualité d'unicité et le rôle absolument primordial que cette machine joua incontestablement dans le processus de genèse de l'ordinateur nous a tout naturellement conduits à la faire apparaître ici. Ceci ne résulte pas, nous l'affirmons, d'une quelconque forme d'erreur de catégorisation (on passerait ainsi de l'espèce à l'individu sans aucune raison valable ni apparente), mais d'un choix totalement délibéré de notre part. L'E.N.I.A.C. concrétisa en effet ce moment technologique extraordinaire, ce point d'ouverture premier et singulier dans l'histoire du calcul automatique, où l'emploi de composants électroniques, jusque-là modeste et marginal en ce domaine, acquit non seulement ses lettres scientifiques de noblesse, mais permit également de dépasser, à la fois sur les plans qualitatifs et quantitatifs, quasiment toutes les machines à calculer construites auparavant et ce quel que puisse être le genre auquel elles pouvaient bien appartenir³³⁷. Plus que cela, la machine construite par Eckert et Mauchly fut cet artéfact-charnière, cet objet-interface, appelé à la toute fin de la guerre à articuler – sans toutefois qu'ils se confondent jamais l'un l'autre – le règne des calculateurs à celui encore en gestation des ordinateurs. A bien des égards, l'E.N.I.A.C. est ainsi fréquemment considéré comme la matrice à partir de laquelle naquit l'ordinateur au milieu de l'année 1945. Pourtant, s'il apparaît que la part essentielle prise effectivement par l'E.N.I.A.C. dans cette aventure technologique n'a jamais été sous-estimée par les spécialistes de l'histoire de l'informatique, à

³³⁶ En faisant usage de commutateurs électromagnétiques offrant une très grande vitesse de commutation (mais qui demeuraient néanmoins des relais), certains concepteurs américains de machines à calculer (comme Howard Aiken), construisirent dans les années 1945-1947 des calculateurs numériques beaucoup plus performants que leurs immédiats devanciers électromécaniques ou mécaniques sans pour autant que cela ne nécessite d'eux qu'ils aient à penser ou à repenser en profondeur le *design* logique de ces « nouveaux » dispositifs (lequel demeurerait de fait extrêmement proche de celui des machines précédentes participant du même type). Partant, on gardera bien présent à l'esprit le fait que si certains calculateurs des « anciennes » lignées furent effectivement améliorés après la guerre, cette variation se traduisit certes par une augmentation notable de leurs performances calculatoires, et tout particulièrement de leur vitesse d'opération, mais non pas par une mutation des lois essentielles sur lesquelles reposaient leur fonctionnement. C'est à un écart quantitatif auquel nous avons véritablement affaire ici, et non à un écart qualitatif.

³³⁷ Effectuer une addition avec l'E.N.I.A.C. était par exemple 1000 fois plus rapide que réaliser cette même opération élémentaire sur le Mark I d'Howard Aiken, pourtant une des machines les plus performantes du moment.

notre connaissance tout au moins, l'inverse, c'est-à-dire le fait que ce rôle n'ait jamais été surestimé, est loin de se vérifier toujours.

Qu'entendons-nous donc lorsque nous affirmons une telle chose ? Et qu'est-ce que cela peut exactement impliquer pour une histoire de l'informatique en quête de ses fondements et de repères historiques et techniques pleinement assurés ? De ses très rares « ancêtres » électroniques, le grand calculateur à tubes de la *Moore School* n'hérita finalement qu'assez peu de traits originaux. En vérité, et de façon qui ne manquera peut-être pas de surprendre, les différences techniques et architecturales susceptibles d'être repérées entre l'E.N.I.A.C. et l'A.B.C. (la machine numérique électronique qui inspira pourtant J. W. Mauchly pour la construction de l'E.N.I.A.C.), étaient nettement plus nombreuses que les caractéristiques techniques et conceptuelles qu'ils possédaient en commun. Comme l'A.B.C., l'E.N.I.A.C. était presque entièrement électronique, il possédait une mémoire de travail séparée et était commandé par l'opérateur au moyen d'un panneau dédié dont les éléments activables pouvaient être configurés en fonction des problèmes à résoudre³³⁸. Comme l'A.B.C., il fonctionnait également – mais de manière partielle seulement - en parallèle (plusieurs opérations intermédiaires étaient effectuées simultanément avant que leurs résultats terminaux, après intervention d'un opérateur, ne soient ensuite traités de façon sérielle par le calculateur). Tout en évitant de nous aventurer d'emblée dans les méandres de considérations techniques qui à coup sûr se révéleraient extrêmement ardues, nous pouvons d'ores et déjà dire que c'était là à peu près les seules choses vraiment capitales que ces deux machines avaient réellement en commun. En fait, à bien des niveaux, l'E.N.I.A.C. était beaucoup plus proche de ses grands contemporains numériques mécaniques ou électromécaniques, comme l'I.B.M. A.S.C.C. / Harvard Mark I, qu'il ne l'était de l'A.B.C., un calculateur qui aujourd'hui pourtant est unanimement – et légalement de surcroît - considéré comme le précurseur véritable de l'ordinateur (et ce en dépit de sa petite taille et de sa nature de machine très spécialisée). Afin de mettre pleinement en lumière sa parenté essentielle avec les calculateurs électromécaniques (et aussi de souligner ses différences fondamentales avec les

³³⁸ Certains registres de l'E.N.I.A.C., comme les *buffers* (registres tampons), situés « entre » les unités périphériques d'entrée/sortie (*card reader*, *constant transmitter*, et *card puncher*), et le calculateur étaient ainsi constitués de relais et non pas de tubes électroniques. En ce qui concerne la capacité des mémoires de travail de ces deux machines, celle de l'A.B.C. atteignait 0,3 kilobytes tandis que chacun des accumulateurs de l'E.N.I.A.C. (lesquels remplissaient à la fois le rôle d'unités mémorielles et d'unités arithmétiques), pouvait stocker temporairement un nombre décimal signé comportant dix chiffres (il était toutefois possible de lier ensemble deux accumulateurs pour doubler cette capacité). Pour ce qui est des panneaux de contrôle, ou des interfaces opérateur qui permettaient de paramétrer ces machines en vue de résoudre un problème donné (nous dirions aujourd'hui programmer), l'A.B.C., à l'instar de l'E.N.I.A.C., disposait d'une unité pourvue de *switches* (boutons bascules). En outre, le calculateur de la *Moore School* devait être entièrement recâblé lorsqu'une nouvelle tâche de calcul lui était présentée.

premières machines numériques électroniques, notamment l'A.B.C.), nous présenterons ici deux caractéristiques techniques primordiales de l'E.N.I.A.C. tout en nous empressant d'ajouter que ce ne sont pas là les seules qui puissent être légitimement retenues dans cette perspective singulière. Commençons donc par considérer ce qui paraît être le plus évident ou le plus visible, en d'autres termes tournons notre regard vers la taille de chacune de ces machines. Le calculateur électronique d'Atanasoff-Berry, nous avons déjà mentionné ce point, était en fait un petit dispositif. Ses proportions, si bien sûr on accepte de les envisager à l'aune des « critères » qui étaient ceux en vigueur à l'époque, étaient étonnamment modestes : il mesurait 1,5 mètres de long, 0,91 mètre de haut et 0,91 mètre de large. Son poids, quant à lui, avoisinait les 750 *pounds*³³⁹. Comparé à ceci, l'E.N.I.A.C. faisait littéralement figure de titan : une fois ses 40 unités constitutives assemblées côte à côte en forme de U (selon la configuration suivante : 16 unités x 8 unités x 16 unités), la machine occupait une zone de 17 mètres par 10 et ne pesait pas moins de 30 tonnes. L'écart quantitatif qui peut être relevé ici est particulièrement net. Considérons à présent la quantité de composants que nécessita leur construction. Comme l'A.B.C., l'E.N.I.A.C. ne faisait que très modérément appel à la technologie des relais, et leur nombre était en réalité si peu important qu'il n'est pas véritablement nécessaire ici de le prendre en ligne de compte. En revanche, le nombre de tubes à vide que comportait chacun de ces instruments de calcul est beaucoup plus intéressant pour nous en ceci précisément qu'il constitue un des indices les plus essentiels de leur dissemblance. Le calculateur de la *Moore School* comprenait 17468 tubes à vide, 70000 résistances (*resistors*), 7200 diodes, 6000 interrupteurs (*switches*), ainsi que 10000 condensateurs (*capacitors*) alors que l'A.B.C. ne comprenait au total « que » 600 tubes à

³³⁹ En arrondissant la valeur du *pound* britannique (soit 453,592 grammes), à celle de la livre commune (ou demi-kilogramme), on peut estimer que le poids de l'A.B.C. ne devait guère excéder 375 kilogrammes. Très tristement, et fort curieusement d'ailleurs, ses dimensions pourtant négligeables furent directement à l'origine de la perte de l'A.B.C. Ainsi que le rapporte John Gustafson dans son article *Reconstruction of the Atanasoff-Berry Computer*, (in [Rojas, Hashagen et al., 2000], p 94.), «*It was constructed in the basement of the physics building at ISU [i.e. Iowa State University / Ames Laboratory], which at the time was an open area interrupted only by support pillars. The basement was later finished with poured concrete walls and standard doors; the standard door width is 0.84 m. Hence, the computer was boxed in. After Atanasoff left ISU for Maryland, the ABC was seen only as an orphaned device taking up otherwise useful space. Since its frame was welded angle iron, the only way to remove it from the room was to cut it apart with a hacksaw. I feel we have most of the answer to the question: Why was the ABC destroyed? The answer is that it was 0.07 m too wide to go through the door. In reconstructing the ABC, we made one practical modification: we narrowed the frame enough so we would be able to go through a standard door.*». Cette perte, fort heureusement, ne s'avéra pas irrémédiable. En s'appuyant sur les nombreux écrits et plans dressés par J. V. Atanasoff entre 1937 et 1942, J. Gustafson et ses collègues de l'*Ames Laboratory* sont parvenus à construire entre 1994 et 1997 une réplique de l'A.B.C. en utilisant presque uniquement des pièces et des composants datant de la fin des années 30 !

vide³⁴⁰. De manière patente, il apparaît clairement ici que nous avons affaire à deux instruments de calcul électroniques qui participent l'un et l'autre de deux ordres de grandeur très fortement contrastés. Si à partir de ce point on en vient maintenant à comparer les dimensions et la quantité de composants qui étaient celles de l'E.N.I.A.C. avec celles des grands calculateurs électromécaniques qui furent effectivement ses contemporains, on ne peut que parvenir à cette conclusion: si elles ne relevaient pas vraiment du même ordre de grandeur, elles étaient nettement plus proches les unes des autres que ne l'étaient celles de l'E.N.I.A.C. et de l'A.B.C. Prenons pour exemple le calculateur électromécanique I.B.M. *Automatic Sequence Controlled Calculator* (ou Harvard Mark I), dont le professeur B. Cohen de l'université d'Harvard a détaillé quelques-unes des caractéristiques techniques dans son article intitulé « *Howard Aiken and the Dawn of the Computer Age* » : « *Mark I was gigantic, an imposing sight, standing 8 feet high and extending in length to 51 feet and almost 3 feet in depth... It weighed 5 tons and used 530 miles of wire and was composed of 760,000 individual parts*³⁴¹ ».

Cette énumération de traits « technométriques », pour concise qu'elle soit, nous semble assez bien démontrer à quel point l'E.N.I.A.C. était proche de l'A.S.C.C. tout de même qu'elle permet de vérifier combien il pouvait se démarquer distinctement de l'A.B.C. Il va de soi cependant que la taille d'un artéfact et/ou le nombre de ses parties élémentaires constitutives, lorsqu'on cherche à le confronter à un autre objet de même type pour établir avec ce dernier soit une relation de ressemblance, soit un rapport de dissimilitude, ne sauraient constituer des critères de différenciation uniques et absolus. Comprendre que si dans une certaine mesure leur prise en compte peut s'avérer souhaitable, voire nécessaire, celle-ci est toutefois loin d'être suffisante pour parvenir à prouver quoi que ce soit d'une manière définitive. C'est précisément la raison pour laquelle nous devons à présent procéder à l'examen de certaines des lignes architecturales ou logiques fondamentales le long desquelles l'A.B.C. et l'E.N.I.A.C. furent développés.

La première chose méritant d'être immédiatement signalée ici concerne les modalités selon lesquelles les données numériques étaient représentées au sein de l'une et l'autre de ces machines ainsi que les solutions d'ingénierie correspondantes qui furent arrêtées de part et d'autre afin de les implémenter matériellement. Dans la mémoire de l'A.B.C., ces valeurs étaient représentées au moyen du système binaire alors que dans celle de l'E.N.I.A.C., elles

³⁴⁰ Selon une estimation de J. Gustafson, le développement de l'A.B.C. revint au total à 1640 dollars, ce qui bien sûr est sans aucune commune mesure avec ce que coûtèrent l'A.S.C.C. ou l'E.N.I.A.C.

³⁴¹ In [Rojas, Hashagen et al., 2000], p 116.

l'étaient en notation décimale. Hormis le fait que ceci nous permet de mieux saisir combien l'A.B.C. pouvait être voisin de nos machines actuelles (nous espérons ne surprendre personne en rappelant que les données traitées par nos ordinateurs sont également représentées en binaire au « cœur » de la machine), la mention de ces éléments d'information nous autorise aussi à prendre la pleine mesure des différences radicales qui le séparaient de l'E.N.I.A.C. sur le plan du *design* (ou de la strate logique si l'on préfère). Lorsqu'il conçut son calculateur dans la seconde moitié des années trente, J. V. Atanasoff avait en tête un instrument de calcul qui permettrait de traiter des problèmes mathématiques dont la solution nécessitait que l'on résolve des systèmes d'équations algébriques linéaires (la question de la résolution de ce type d'ensemble d'expressions mathématiques se pose par exemple dans le cadre de l'analyse des circuits électriques ou encore dans celui de la solution approchée de nombreux problèmes rencontrés en mécanique ou en mécanique quantique). Atanasoff, assez rapidement semble-t-il, se rendit compte que le traitement de ces systèmes d'équations linéaires par automate nécessiterait que l'on atteigne concurremment une haute vitesse et une très grande précision pour qu'il se trouve conduit à la fois correctement et dans des délais d'exécution qui demeureraient tolérables. Or la vitesse de fonctionnement des machines digitales mécaniques ou électromécaniques disponibles à l'époque était très éloignée de celle impérativement requise pour s'affranchir du type de computations dont Atanasoff envisageait la réalisation. C'est la raison précise pour laquelle il en vint *in fine* à opter pour l'usage d'éléments de base de type électronique³⁴² afin de concevoir l'A.B.C. (les composants électroniques qui existaient dans les années trente commutaient en effet des centaines de fois plus rapidement que leurs équivalents mécaniques ou électromécaniques). D'autre part, se posait pareillement la question du degré de précision qui devait être impérativement atteint pour que le calcul soit réalisé de façon satisfaisante. Au moment où il entamait ses recherches, Atanasoff envisagea l'emploi d'un analyseur différentiel, les calculateurs analogiques comme ceux qui avaient été construits au début des années trente par Vannevar Bush étaient en effet beaucoup plus rapides que leurs analogues numériques mécaniques ou électromécaniques. Malheureusement, ou heureusement peut-être, ces instruments analogiques souffraient tous d'une limitation intrinsèque rédhitoire qui devait définitivement proscrire leur utilisation ici: le degré de précision qu'ils autorisaient se limitait dans les faits à deux ou trois chiffres après la virgule, une résolution par trop insuffisante au regard de ce qui devait être accompli. Après qu'il eut

³⁴² Pour stocker chaque bit, Atanasoff considéra tour à tour plusieurs types de composants: des relais tout d'abord, des tubes à vide ensuite, puis des condensateurs. En se basant sur le rapport coût/performances, il opta finalement pour ces derniers.

étudié chacune des différentes possibilités techniques qui s'offraient à lui, Atanasoff détermina que seul un calculateur numérique électronique présenterait conjointement la rapidité d'opération et la précision qu'il recherchait. Le choix de la binarité pour la représentation des quantités numériques à traiter s'imposa ensuite à lui comme étant la solution logique et technique la plus simple et la plus économique qui soit, la représentation décimale courante étant beaucoup plus lourde à mettre en œuvre sur le plan de la réalisation matérielle³⁴³. L'A.B.C. était donc un calculateur numérique électronique qui exhibait simultanément un certain nombre de qualités tout à la fois précieuses et réellement inédites: une vitesse élevée de fonctionnement, une très grande précision, le traitement des données en parallèle, une mémoire de travail dynamique (périodiquement rafraîchie) et, bien sûr, le recours à la représentation des nombres en binaire³⁴⁴, une base numérique « minimaliste » qui, du fait même qu'elle s'inscrivait dans un rapport d'adéquation parfaite avec le *modus operandi* spécifique de ses constituants physiques les plus essentiels, permettait d'accroître la vitesse d'opération de la machine³⁴⁵.

³⁴³ Nous demandé au Dr. Gustafson pourquoi J. V. Atanasoff avait choisi le mode binaire pour représenter les quantités numériques dans l'A.B.C. Voici sa réponse: « *I can tell that you've never tried to design a decimal-based computer ! To use decimal is much harder than it sounds, and involves both using far more vacuum tubes (to represent the same range of numbers), and slower operation. Atanasoff knew that the state of vacuum tubes, driven to saturation, acted exactly like relay switches. They had two states, and only two states. Others had observed that this formed a sort of strange number system, but couldn't bring themselves to encode and decode numbers of that form instead of the decimal form we're used to. That would have been so much work that it would have defeated the labor-saving intent of using an automatic device to do the arithmetic! When Atanasoff had his insight, he apparently also saw that he could make the conversion between decimal and binary as automatic as the arithmetic, so there was no reason to use the inefficient decimal arithmetic in the internal processing. Atanasoff specifically mentions the use of "logic" to do arithmetic, and other than possibly Konrad Zuse, he appears to be the first person to recognize the connection between Boolean operations and + - * / operations. Logic, obviously is true-false binary in nature. So it all fell into place.* », F. Ricquebourg, , correspondance personnelle avec le Dr. John Gustafson (Ames Labs. / Engineering Department of Floating Point Systems, Inc.), email du 26.03.2002.

³⁴⁴ L'expression utilisée par J. V. Atanasoff pour nommer le « 1 » et le « 0 », ou plutôt les positions « on » et « off » des composants électroniques, était « *abacus elements* ». Rappelons ici que l'abaque était un instrument de calcul fort ancien et qu'il était *numérique*.

³⁴⁵ Se posait bien évidemment la question du stockage des résultats intermédiaires survenant durant la phase de calcul, la capacité de la mémoire de travail de l'A.B.C. étant insuffisante pour autoriser la réalisation d'une computation un tant soit peu élaborée d'un seul trait. Ces derniers « sortaient » du calculateur en base deux et devaient être ensuite réinjectés dans la machine pour que puisse être obtenu le résultat terminal : l'intervention d'un opérateur était donc systématiquement requise lors d'un processus de calcul. Là encore J. V. Atanasoff et C. Berry firent preuve d'une surprenante inventivité. L'usage d'un perforateur mécanique ou électromécanique fut d'emblée rejeté car Atanasoff souhaitait impérativement un dispositif électronique afin de prévenir une diminution de la vitesse de fonctionnement de l'A.B.C. (notons que les concepteurs de l'E.N.I.A.C. et des premiers ordinateurs se trouveront eux aussi confrontés au délicat problème du stockage de masse). Après quelques essais plus ou moins concluants, lui et C. Berry parvinrent finalement à fabriquer un dispositif automatique d'impression qui répondait convenablement à cette contrainte. Ce périphérique de sortie était inédit en cela qu'il permettait de perforer des trous dans des cartes de papier relativement peu épais (*dielectric material* ainsi que Berry les nommait génériquement), au moyen d'arcs électriques de haut voltage (3000 volts), générés par des tubes thyatron situés sur la partie gauche de l'A.B.C. A raison de 60 bits traités par seconde (sur un flux parallèle de 30 bits, ce qui représentait au total un taux de transfert de 1800 bits/s), la présence d'un trou correspondait à un « 1 », son absence à un « 0 ». Le processus inverse, c'est-à-dire la lecture des cartes, se faisait

Dirigeons à présent notre attention vers l'E.N.I.A.C. Presper J. Eckert et John W. Mauchly, il est vrai contraints par les difficiles conditions de travail imposées par la guerre ainsi que par les exigences pressantes des militaires, préférèrent utiliser le système décimal pour représenter les nombres en machine. C'était là bien entendu un choix architectural nettement moins élégant et efficient que celui qui avait été adopté par John V. Atanasoff et Clifford Berry : pour ces derniers, nous l'avons dit, la représentation des quantités numériques en base décimale au moyen de composants électroniques ne s'était pas imposée comme une solution simple ni économique. Dans l'idéal, il n'aurait peut-être pas été exclu d'imaginer concevoir des circuits électroniques capables de supporter cette fonction particulière de manière réellement efficace, il aurait seulement fallu disposer pour cela d'argent et, plus encore, de temps, deux choses dont l'ambitieuse petite équipe de la *Moore School* manquait en fait cruellement. La décision de construire un calculateur comme l'E.N.I.A.C. avait dès le départ constitué pour les autorités militaires et scientifiques américaines un pari technologique et financier incroyablement audacieux. Mais il est important de ne pas perdre de vue qu'il ne s'agissait pas là d'un pur exercice de style destiné simplement à éprouver l'efficacité de la technologie électronique à grande échelle (chose qui du reste n'avait jamais été expérimentée auparavant). Cette machine colossale avait dès le départ été voulue afin de soulager la charge de travail computationnel croissante sous laquelle ployait de plus en plus les centres de calcul militaires ou bien ceux, civils, placés sous la tutelle de l'*U.S. Army*. L'objectif premier poursuivi ici visait par conséquent à la mise au point d'un dispositif à même de calculer automatiquement les précieuses tables de tir balistique bien plus rapidement que ce dont étaient capables tous les autres calculateurs existants. Il serait bien entendu parfaitement exagéré d'alléguer ici que, d'une manière ou d'une autre, ce qui se jouait avec la construction de ce calculateur n'était ni plus ni moins que l'issue de la guerre : après tout, l'E.N.I.A.C. ne fut effectivement opérationnel qu'une fois le conflit mondial terminé et pourtant ceci n'empêcha aucunement la coalition alliée de venir à bout des forces armées germaniques et nippones. Il n'en demeure pas moins qu'à la fin du mois de mai de l'année 1943, moment où la conception de l'E.N.I.A.C. fut entreprise, les stratégies architecturales et techniques qui commencèrent à être retenues – Mauchly devait se charger du versant conceptuel du *design* de la machine tandis que celui des circuits électroniques incombait à Eckert - le furent sous la pression directe d'exigences militaires. Pour les gens de la *Moore School*, il s'agissait donc de

en passant les cartes perforées entre des électrodes présentant un voltage plus faible que celui utilisé en écriture (1500 volts). Si un arc se formait, un « 1 » était lu, dans le cas contraire, c'était un « 0 ». De la sorte, les données intermédiaires pouvaient être retransmises à la machine, le rôle de l'opérateur humain se limitant ici à celui d'un simple effecteur moteur.

travailler diligemment afin de terminer dans les délais les plus brefs possibles la construction du calculateur dont le *Ballistic Research Laboratory* de l'armée américaine avait besoin de manière si pressante. C'est précisément en raison de cela que la représentation des nombres en base décimale fut sélectionnée. Dessiner et produire des circuits électroniques optimisés pour supporter la représentation binaire des nombres traités par une machine de la dimension de l'E.N.I.A.C. aurait nécessité beaucoup plus de temps - et bien sûr d'argent – que ce dont les membres de son équipe de conception n'en avaient devant eux. Ainsi les unités mémorielles de ce calculateur, les 20 accumulateurs, mais aussi les multiples circuits dédiés à la réalisation des opérations arithmétiques élémentaires furent directement réalisés sur le modèle des unités équivalentes habituellement utilisées dans les calculateurs numériques mécaniques et électromécaniques de l'époque. Dans la troisième section du chapitre 7 de son *History of Computing Technology*, Michael R. Williams expose le fonctionnement des accumulateurs de l'E.N.I.A.C. ainsi que la manière dont ils se trouvaient agencés:

« For example, the mechanical calculator would store a decimal digit by having a wheel turn to one of ten possible positions, whereas the ENIAC stored a decimal digit by having ten vacuum tube flip-flops connected together in the form of a ring with one of the flip-flops (say the sixth) in a conducting state to represent that digit (6 in this case). If two pulses were sent into this ring counter, the conducting state would transfer to the eighth flip-flop. When the conducting state had passed completely around the ring, a carry pulse would be emitted which would cause the next highest ring counter to advance one place. The basic unit on the machine was an accumulator which consisted of ten ring counters plus a special circuit to indicate the sign of the 10-digit number being stored. Each flip-flop required one double triode vacuum tube (a 6SN7), so a single accumulator would need 100 tubes just to store the ten digits of its one number. With all the other associated electronics, an accumulator actually required 550 vacuum tubes³⁴⁶ ».

Ce qui mérite d'être véritablement repéré et souligné ici, au delà des différences technologiques évoquées tour à tour par l'auteur, c'est le fait que le principe logique fondamental qui sous-tendait le fonctionnement des accumulateurs électroniques de l'E.N.I.A.C. – celui consistant à propager une retenue par l'incrémentation d'une unité sur le *decade counter* décimal supérieur chaque fois que le *decade counter* décimal inférieur

³⁴⁶ In [Williams, 1997], p. 272.

effectuait une révolution complète - était parfaitement identique à celui qui régissait le fonctionnement des modules de calcul des instruments mécaniques ou électromécaniques couramment employés alors. Plus encore, et toute considération d'ordre technologique mise à part, il ne différait que très peu de ceux définis aux 16^{ème}, 17^{ème} et 18^{ème} siècles par Schickard, Pascal ou Leibniz - pour ne citer qu'eux - lorsque ces derniers avaient conçu les toutes premières machines à calculer mécaniques ! En d'autres termes, certains des principes fonctionnels primordiaux qui furent mis en œuvre pour élaborer l'E.N.I.A.C. (mais également la plupart de ses contemporains numériques), étaient vieux de plusieurs siècles. La manière dont le calcul était automatiquement réalisé dans ce cas demeurait donc peu ou prou ce qu'elle avait été autrefois. Seule la technologie employée – et surtout l'échelle à laquelle elle le fut - était véritablement inédite puisqu'elle permettait désormais l'effectuation de calculs complexes à des vitesses incroyablement élevées. S'il est donc un « saut » pouvant et devant être identifié concernant l'E.N.I.A.C., alors celui-ci, très sûrement, doit être reconnu comme participant de l'ordre du quantitatif et non pas de celui du qualitatif.

Fait extrêmement intéressant, il doit être maintenant observé que tout ce que nous venons de formuler à propos des accumulateurs de l'E.N.I.A.C. peut être étendu à la presque totalité des organes fonctionnels principaux de cette machine. Les accumulateurs bien sûr, mais également les tables de fonctions et le *master programmer* (le dispositif permettant d'assurer le contrôle de la séquence des opérations), étaient en réalité des analogues électroniques de certaines unités fonctionnelles déjà présentes sur le Harvard Mark I. Quant aux organes d'entrée/sortie utilisés dans l'un et l'autre cas, ils étaient identiques en nature: il s'agissait de lecteurs et de perforateurs électromécaniques utilisant comme support des données numériques des cartes cartonnées standardisées. Enfin, le Harvard Mark I travaillait en mode parallèle (comme l'A.B.C.), tandis que l'E.N.I.A.C., lui aussi, reprenait partiellement ce schéma de fonctionnement (il travaillait également en mode sériel). Le tableau n, présenté ci-dessous, nous permet d'établir quelques-unes de ces analogies:

Harvard Mark I. Désignation des unités fonctionnelles.	Fonction supportée (électromécanique)	E.N.I.A.C. Désignation des unités fonctionnelles	Fonction supportée (électronique).
Registres mécaniques (<i>mechanical</i> <i>registers</i>).	Stockage des nombres en décimal / unité arithmétique élémentaire.	Accumulateurs (<i>accumulators</i>).	Stockage des nombres en décimal / unité arithmétique élémentaire.

Registres de constantes (<i>constant registers</i>).	Stockage temporaire des valeurs constantes nécessaires au calcul (au nombre de 60, configurables par des <i>switches</i>).	Tables de fonction (<i>function tables</i>).	Stockage des tables de valeurs requises au cours du calcul (au nombre de 3, configurables par des <i>switches</i>).
<i>Subsidiary Sequence Mechanism</i> .	Contrôle du calculateur.	<i>Master Programmer Global Control Unit</i> .	Coordination et contrôle des unités.
Unités d'entrée/sortie	Lecture, écriture des données numériques et contrôle de la machine.	<i>Constant Transmitter</i> + lecteur de cartes / perforateur de cartes	Lecture, écriture des données numériques.

Comparaison de quelques-uns des principaux organes du calculateur électromécanique Harvard Mark I et de leurs fonctions avec ceux et celles de l'E.N.I.A.C. Tous les organes de l'E.N.I.A.C. figurant ci-dessus sont des analogues électroniques de ceux présents sur le Harvard Mark I d'Howard Aiken.

Que faut-il alors comprendre à la lumière de cela ? Pour commencer, et contrairement à ce qui peut être encore trop fréquemment avancé de nos jours, y compris quelquefois dans la littérature consacrée à l'histoire de l'informatique, il apparaît clairement que l'E.N.I.A.C. n'était pas une machine aussi révolutionnaire que ce que l'on est parfois conduits à le penser. En vérité, son originalité fondamentale résidait dans le fait que ses concepteurs avait choisi pour le construire de recourir massivement à l'emploi de composants électroniques, un choix technologique clé directement inspiré, mais longtemps passé sous silence en tant que tel, par les travaux qui avaient été accomplis quelques années auparavant par John V. Atanasoff et Clifford Berry. Cela, et l'échelle titanesque à laquelle il fut réalisé, devait permettre à l'E.N.I.A.C. d'afficher des performances véritablement hors du commun pour l'époque. Bien entendu, il s'était avéré nécessaire de concevoir *ab ovo* les innombrables circuits électroniques que comportait cette machine tout de même qu'il avait fallu penser des modules électroniques spécifiques capables d'en contrôler et d'en coordonner l'opération selon les modes de la simultanéité, de la succession ou encore de la conditionnalité. Ceci constituait déjà, à n'en point douter, un tour de force absolument remarquable. Cependant, force nous est faite de constater que sur le plan de l'organisation logique ou de la *forme abstraite*, pour reprendre ici l'expression de Gilbert Simondon³⁴⁷, ce calculateur n'exhibait guère de nouveautés : ses organes de calcul, ses tables de fonctions et ses dispositifs de stockage des données, qu'ils soient internes et externes, n'étaient que des versions électro-

³⁴⁷ In [Simondon, 1958], p. 21.

certaines des unités fonctionnelles caractéristiques des gros calculateurs électromécaniques utilisés ou élaborés à la même période. En affirmant tout cela, nous ne prétendons aucunement diminuer l'importance du rôle tenu par l'E.N.I.A.C. dans le procès de la genèse de l'ordinateur. Notre objectif consiste uniquement à tenter de comprendre comment les choses se déroulèrent en réalité dans les moments pré-historique et historique de l'informatique et ceci implique que nous nous efforcions d'assigner à chaque machine que nous avons décidé d'étudier la part qui lui revient non seulement en droit mais également en fait dans le cours de cette aventure technologique. De ce point de vue, et concernant la phase expérimentale du calcul électronique, nous soutenons que l'E.N.I.A.C. doit être appréhendé et compris comme ce qu'il était vraiment : il s'agissait certes d'un fabuleux démonstrateur³⁴⁸ de la viabilité de la technologie électronique (puisque'elle se trouvait ici employée sur une grande échelle), et donc d'un calculateur capable de prouesses computationnelles extraordinaires, mais il n'était nullement – et ne saurait être considéré – comme la seule et unique matrice de l'ordinateur. A son propos, et si ce n'était la vitesse réellement fabuleuse à laquelle il était capable d'effectuer les calculs qui lui étaient soumis, nous pourrions sûrement reprendre cette vieille locution latine: *non nova, sed nove*. Les nombreuses discussions et analyses qui eurent lieu au sein de l'équipe de développement de l'E.N.I.A.C. entre 1944 et 1945 et qui devaient conduire John Von Neumann à rédiger le *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.* – donc à tracer pour ainsi dire les plans de l'ordinateur - eurent comme point de départ, il est vrai, les nombreux défauts et limites qui étaient ceux et celles de ce calculateur électronique. C'est là un fait bien connu et vérifié et, comme tel, nous ne le contestons nullement. Notons d'ailleurs que c'est très fréquemment pour cette raison que l'on croit que l'E.N.I.A.C. fut le seul et unique précurseur de l'ordinateur. Mais selon nous, cette étroite proximité chronologique entre le calculateur électronique de la *Moore School* et l'ordinateur ne suffisent nullement à établir quoi que ce soit de manière ferme et définitive : l'E.N.I.A.C. n'était pas cette épure unique et ultime, mais imparfaite, qu'il aurait suffi de méticuleusement dégrossir et défaire de ses imperfections multiples pour enfin parvenir à définir les plans d'une machine qui devait, elle, véritablement révolutionner nos existences. Que l'on consente alors à se souvenir que l'E.N.I.A.C., finalement, n'était en grande partie qu'une magnifique interprétation électronique des principes qui régissaient le fonctionnement des grands calculateurs électromécaniques de l'époque. Ceci étant établi, imaginons maintenant qu'en lieu et place des composants électroniques qui faisaient toute sa spécificité, de nouveaux commutateurs

³⁴⁸ Bien entendu, ce n'était pas là l'objectif que poursuivaient les gens de la *Moore School* en construisant l'E.N.I.A.C.

électromagnétiques, particulièrement rapides, aient été employés pour le construire. L'organisation logique de cette machine n'en aurait pas pour autant été altérée ou bouleversée : en effet, abstraction faite de ses performances et du volume spatial qu'elle occupe, les constituants d'une machine d'un certain type n'influent en rien sur sa structure fondamentale. Dans ce cas précis, un tel calculateur aurait simplement été moins rapide que s'il avait été composé d'éléments électroniques tout en demeurant cependant supérieur, en terme de vitesse, aux autres calculateurs numériques électromécaniques existants. Les réflexions qui amenèrent Eckert, Mauchly et Von Neumann à concevoir un nouvel instrument de calcul, l'ordinateur, devaient essentiellement se concentrer sur la refonte complète du schème organisationnel de cette machine, et non sur les composants que l'on devait - ou non - employer pour la construire. Ainsi, sur le plan purement théorique, ce dernier point était - et demeure toujours - totalement accessoire, pourvu seulement que l'on fasse usage de dispositifs élémentaires capables de commuter (et que l'on considère bien entendu le niveau de performances susceptible d'être ainsi obtenu comme un facteur inessentiel). Tout, ici, s'est donc joué sur le plan formel, et non physique. Compte tenu de cela, construire un ordinateur - et non plus un calculateur - avec des parties dernières mécaniques ou bien électromécaniques est donc chose complètement envisageable. En supposant que nous acceptions maintenant de pousser un peu plus loin cette petite expérience de pensée (dont on s'accordera sans doute à reconnaître qu'elle n'est en fait guère coûteuse sur le plan philosophique), il est alors permis d'imaginer qu'après tout, et puisque la structure logique du calculateur de la *Moore School* était à ce point voisine de celle d'un calculateur électromécanique comme l'I.B.M. A.S.C.C./ Harvard Mark I, rien ne se serait opposé à ce que les créateurs de notre hypothétique E.N.I.A.C. à composants électromagnétiques réussissent à définir les plans de l'ordinateur en partant d'une telle base. Une machine de cette sorte aurait nécessairement été plus lente que si elle avait été électronique, sa réalisation se serait sûrement avérée très fastidieuse et ses proportions, très vraisemblablement, auraient été démesurées, mais il n'en demeure pas moins qu'en essence, elle aurait tout de même été un ordinateur.

Il nous faut à présent tirer les conséquences de ce qui vient d'être dit. Pour commencer, c'est quelque peu à tort que l'E.N.I.A.C. est généralement considéré comme l'ancêtre de l'ordinateur. Si l'on s'en tient exclusivement à la considération de son organisation formelle, et puisque celle-ci ne s'écartait guère, ainsi que nous l'avons vu, de celle de la plupart des grands calculateurs électromécaniques, alors ces derniers auraient tout aussi bien pu constituer le germe à partir duquel l'ordinateur devait naître. L'usage de composants électroniques, ici, n'était nullement requis pour que cela advienne effectivement.

Ensuite, et comme ne manque pas de le rappeler Michael R. Williams³⁴⁹, il nous faut remarquer dans cette perspective qu'un des questionnements « pathologiques » qui frappe le plus fréquemment la recherche en histoire de l'informatique est celui qui consiste à s'interroger de la sorte : « *Who, or what was first ?* ». Interrogation à laquelle, quant on ne cherche pas purement et simplement à l'éluder avec force précautions, il est quasi invariablement répondu : Von Neumann et l'E.N.I.A.C. Vérité, certes, mais aussi effet de surface... En même temps, il est évident que cette question absolument fondamentale, qui est celle des origines ou de la provenance historique de l'ordinateur, ne souffre guère d'être passée sous silence. Dans le chapitre précédent, nous nous sommes efforcés de démontrer en quoi il était possible de faire le départ entre les termes « calculateur » (*calculator*) et « ordinateur » (*computer*, au sens artefactuel et non humain du mot). Au delà des significations quelque peu fluctuantes, mais distinctes, de ces deux concepts, ce qui différencie fondamentalement ces deux genres de machines, ce qui particularise pour ainsi dire leurs essences machinales respectives, est que les ordinateurs disposent d'un espace mémoire interne où le programme devant être effectué - en même temps que les données qui doivent être traitées - se trouve stocké. A l'inverse les calculateurs, qu'ils soient de type analogique ou numérique, sont dépourvus d'un pareil dispositif, bien qu'ils puissent être quelquefois « programmés » (comprendre contrôlés) au moyen d'une séquence d'instructions stockée sur un médium externe (*e.g.* un série de cartes perforées lue par une machine électromécanique placée en entrée du calculateur). Si l'on tient ce critère comme essentiel – et à n'en point douter il l'est absolument - alors il nous faudra dire que le « premier » ordinateur était l'E.D.V.A.C. Mais si l'on procède à un léger glissement de perspective et que l'on décide maintenant de considérer la première machine de ce genre qui fut effectivement construite (à partir du schéma fondateur que détermina Von Neumann pour l'E.D.V.A.C.), alors il nous faudra nous tourner vers un autre dispositif, britannique celui-là: l'E.D.S.A.C. Cette question des origines, on le voit bien, est loin d'être aussi simple et triviale qu'il peut y paraître de prime abord (on souscrit par exemple à cette vue lorsque l'on tient pour acquis le fait que l'histoire des machines de l'informatique « débute » avec l'E.N.I.A.C.). Partant, deux solutions semblent s'offrir à nous. Soit l'on décide que l'histoire de l'informatique trouve effectivement son point d'origine avec l'invention des plans de l'ordinateur (ou encore la construction de l'E.D.S.A.C.), et l'on doit alors fixer son commencement au alentours de l'année 1945, soit l'on décrète qu'un tel accès est loin d'être suffisant pour comprendre ce que

³⁴⁹ In [Rojas, Hashagen et al., 2000], pp. 2-3.

sont l'ordinateur et l'informatique ainsi que pour appréhender leur provenance et la façon dont ils se sont élaborés : il devient alors nécessaire de se tourner vers autre chose. Dans le premier cas bien entendu, la question des « débuts » de l'ordinateur, de l'informatique, semble d'emblée presque immédiatement et entièrement réglée. Ne resterait plus alors qu'à définir les grandes lignes d'une méthodologie qui permettrait à la fois de s'orienter de la manière la plus satisfaisante qui puisse être imaginée dans les méandres de la véritable jungle que constitue la myriade de machines ayant existé de 1945 à nos jours et de saisir les métamorphoses successives qu'a subie l'informatique pendant les six dernières décennies. Une telle modalité d'accès, on le conçoit aisément, ne peut manquer d'apparaître à l'archéologue de l'informatique comme une voie extrêmement séduisante : non seulement elle autorise de façon assez spectaculaire une réduction sensible de l'espace d'investigation – celui de l'histoire de l'informatique – mais elle permet simultanément d'apporter à moindres frais une certaine forme de solution (totalement contrefaite à notre sens), à la délicate question de l'origine de l'ordinateur (l'E.N.I.A.C. donnerait ainsi « naissance » à l'E.D.V.A.C., lequel servirait ensuite de modèle théorique à l'E.D.S.A.C.). Sa force, tout de même que sa faiblesse d'ailleurs, semblent en vérité résider dans le fait qu'elle tend à faire très bon marché, en les ignorant purement et simplement, de toutes les machines à calculer numériques ou analogiques qui ont précédé l'ordinateur ainsi que de toutes les innovations conceptuelles que celles-ci ont pu, le cas échéant, porter et introduire dans le champ du calcul automatique. En cela, nous ne saurions raisonnablement songer à la faire nôtre : une pensée philosophique qui prétend se saisir d'objets aussi riches et complexes que peuvent l'être l'ordinateur et l'informatique, de la même manière qu'elle ne saurait se satisfaire d'une approche aussi mutilante que peut l'être le découpage générationnel pour en comprendre le développement, ne saurait également tolérer de s'établir sur une assise qui implique que l'on procède à une coupe franche à ce point radicale dans la dimension proprement souterraine, « rhizomique », de leur histoire. Demeure pourtant, c'est là chose absolument nécessaire, à définir un point d'origine à partir duquel notre discours pourra s'enraciner et se déployer et là, bien sûr, nous nous retrouverons inmanquablement confrontés aux interrogations à la fois liminaires et inéluctables que nous rapportions plus haut : quelle machine fut la première ? Laquelle préfigura réellement l'ordinateur et qui en fut l'inventeur ? Le fait qu'il soit si difficile d'apporter des réponses à ces questions constitue peut-être l'indice de ce qu'elles se trouvent finalement mal posées. Pourtant, les documents ne manquent pas, ni non plus les témoins, qui devraient *a priori* permettre de les résoudre pourvu que l'on s'en donne véritablement la peine. Malgré cela, rien, en cette matière, ne semble définitivement arrêté. A l'issue du procès

qui opposa du 1^{er} juin 1971 au 19 octobre 1973³⁵⁰ la *Honeywell Company Inc.* à la *Illinois Scientific Developments Inc.*, une filiale du groupe industriel *Sperry Rand Corporation*, devant la quatrième division de la *District Court* du Minnesota pour une querelle portant sur l'acquisition de certains des brevets qui avaient été déposés en 1947 par P. J. Eckert et J. W. Mauchly pour l'E.N.I.A.C.³⁵¹, le juge Earl R. Larson devait faire les deux déclarations suivantes : « *The subject matter of one or more claims of the ENIAC was derived from Atanasoff and the invention claimed in the ENIAC was derived from Atanasoff*³⁵² », et « *Eckert and Mauchly did not themselves first invent the automatic electronic digital computer, but instead derived that subject matter from one Dr. John Vincent Atanasoff*³⁵³ ». Sur la base des preuves et des témoignages multiples³⁵⁴ qui furent produits pendant cette instruction qui voyait s'affronter deux des géants de l'industrie informatique américaine, le juge Larson en vint finalement – et comme accidentellement – à destituer John W. Mauchly et Presper J. Eckert de leur (longue) prétention à la paternité de l'ordinateur pour l'attribuer, ou plutôt la restituer, à celui qu'on l'on devrait souvent surnommer à partir de là le « *forgotten father of the computer* », (le père oublié de l'ordinateur) : John V. Atanasoff. Du même coup, on le

³⁵⁰ Ce fut l'un des plus longs procès à avoir jamais été instruits par une cour de justice américaine. Nous nous permettons ici de préciser qu'un résumé fort intéressant du déroulement et des conclusions de cette action en justice peut être trouvé sur le site du *Scalable Computing Laboratory* de l'*Iowa State University* à l'adresse suivante : <http://www.scl.ameslab.gov/ABC/Trial.html>

³⁵¹ Eckert et Mauchly déposèrent en 1947 (c'est-à-dire précisément l'année où leur société E.M.C.C. fut fondée), un certain nombre de brevets en vue de protéger le travail qu'ils avaient accompli sur l'E.N.I.A.C. entre 1943 et 1946. La situation financière de l'E.M.C.C., ainsi que nous l'avons précisé plus haut. Malgré les contrats signés avec la *Northrop Aircraft Company* pour développer le B.I.N.A.C., la situation financière de cette jeune société ne cessa de se dégrader au point qu'elle fut finalement absorbée par la firme *Sperry Rand* (née auparavant de la fusion de la *Sperry Corporation* et de la *Remington Rand*). Du fait même de cette acquisition, la *Sperry Rand* devint donc propriétaire des brevets qui avaient été précédemment déposés par Eckert et Mauchly. Ces brevets commencèrent à faire réellement l'objet d'une exploitation industrielle en 1964. Mais la firme *Honeywell*, qui semblait être parfaitement au courant des travaux effectués antérieurement par J. V. Atanasoff, refusa de payer des royalties à la *Sperry Rand*. Cette dernière, sûre de son bon droit, assigna donc *Honeywell* en justice, avec les extraordinaires conséquences que l'on sait.

³⁵² Article 3.1, extrait du dossier numéro 4-67 civ. 138 (*Honeywell Inc. vs. Sperry Rand Corporation and Illinois Scientific Developments Inc, Finding of Facts, Conclusions of Law, and Order for Judgment*), de la quatrième division de la cour de justice de l'état du Minnesota. Ce rapport a été rédigé en 1973 par Henry Halladay, expert juridique auprès de la firme *Honeywell*.

³⁵³ *Ibidem*, article 3.1.2.

³⁵⁴ Concernant ces témoignages, il doit être noté que l'attitude de J. W. Mauchly au tout début du procès fut plus qu'ambiguë, voire même franchement indélicate vis-à-vis de John V. Atanasoff (lequel fut appelé à la barre en qualité de témoin dès les premiers jours de l'audience). En effet dans ses premières dépositions il déclara qu'il n'avait jamais examiné l'A.B.C. en détail et qu'en outre il n'avait jamais eu en sa possession une copie du carnet de notes illustré de 35 pages qu'Atanasoff avait fini de rédiger pour décrire cette machine au mois d'août de l'année 1940 (ce dernier affirma même sous serment que Mauchly lui avait demandé s'il pouvait conserver ce document à l'issue de sa visite à l'I.S.U. au mois de juin 1941, ce à quoi l'intéressé répondit par la négative). Face aux démonstrations et aux preuves matérielles (notamment sa correspondance avec Atanasoff), qui furent par la suite produites devant le tribunal, il fut finalement forcé de revenir sur ses déclarations initiales (il les corrigea trois fois, sous serment). Par un malheureux concours de circonstances, les conclusions de cette affaire ne furent que très peu diffusées auprès du grand public, le scandale du *Watergate* ayant éclaté au moment même où elles étaient rendues publiques.

comprend, cette décision légale reconnaissait officiellement à l'A.B.C. le privilège d'avoir été le premier calculateur électronique digital automatique jamais conçu³⁵⁵. Au regard de la loi américaine, il s'agissait donc là du véritable aïeul de l'ordinateur. C'est ce dispositif véritablement révolutionnaire qui en tout premier lieu permit la construction de l'E.N.I.A.C., le calculateur numérique électronique dont on affirme généralement qu'il conduisit Von Neumann à imaginer le concept de machine stockant son programme et ses données de manière interne, autrement dit l'ordinateur. Il va sans dire que nous souscrivons aux conclusions du juge Larson. Si « techniquement » c'est bien des réflexions qui furent conduites à partir de l'E.N.I.A.C. que devait naître le *First Draft of a Report on the EDVAC*, conceptuellement, l'A.B.C. était bien plus proche de l'ordinateur que ne devait jamais l'être la machine de la *Moore School*. On rétorquera peut-être que l'A.B.C. n'était pas une machine programmable, tout au moins au sens que l'on confère communément à ce terme aujourd'hui. Mais il doit être tout de suite remarqué que l'E.N.I.A.C. ne l'était pas non plus. Dans le premier cas, le contrôle de la machine se faisait manuellement au moyen d'un panneau comportant de nombreux commutateurs dont les positions pouvaient être ajustées en fonction du calcul à effectuer. Dans le second cas également, à quoi il convient d'ajouter que les 40 unités fonctionnelles que comptait l'E.N.I.A.C. devaient être systématiquement recâblées entre elles chaque fois qu'il fallait réaliser une nouvelle tâche computationnelle. En outre, la modalité selon laquelle ces deux instruments de calcul étaient alimentées en données numériques ne différait pas en principe : elles étaient tout d'abord enregistrées sur des cartes perforées, lues au fur et à mesure de la progression de la procédure de calcul, tandis que les résultats obtenus (intermédiaires ou terminaux), étaient également écrits – comprendre perforés mécaniquement ou « brûlés » par des tubes thyatron - sur des supports cartonnés. A l'inverse de l'Harvard Mark I et de l'E.N.I.A.C., l'A.B.C. ne disposait toutefois pas d'un organe lui permettant de gérer automatiquement un flux continu d'instructions : l'intervention d'un opérateur humain était donc systématiquement requise pour lui fournir des commandes et, pour ainsi dire, lui « spécifier ce qu'il fallait faire ensuite ». Il a souvent été avancé – sans doute pour tenter d'amoindrir l'importance de son rôle - que l'A.B.C., en plus de cette forme de limitation, était un calculateur extrêmement spécialisé (puisqu'il avait spécifiquement été conçu en vue de traiter des systèmes d'équations linéaires), alors que l'E.N.I.A.C. était une

³⁵⁵ Il doit être noté que les calculateurs à relais construits en Allemagne par Konrad Zuse à peu près à la même période présentaient des caractéristiques également surprenantes : bien que nettement moins révolutionnaires que l'A.B.C. sur le plan de la technologie employée pour les éléments de commutation et celui de la mémoire, ils disposaient d'un véritable jeu d'instructions ainsi que d'une arithmétique notée en virgule flottante. Certains, comme le Z3, étaient même programmables.

machine de portée plus générique (bien qu'elle n'ait pas été universelle). On ne contestera pas ce dernier point : l'A.B.C., lorsqu'il fut enfin opérationnel au mois de juin 1942, était bien un calculateur spécialisé, mais le type de computations qu'il était capable de prendre en charge concernait une telle gamme de problèmes (rencontrés par exemple en physique ou en mécanique), que cette prétendue spécialisation doit tout de même être quelque peu relativisée. Concernant cette question, nous nous permettrons seulement de rappeler ce que le professeur John Gustafson a pu soutenir il y a quelques années dans l'article où il expliquait comment son équipe et lui étaient parvenus à construire une réplique exacte de l'A.B.C. : « *Had the war not interfered, Atanasoff was planning to make the instruction sequencing automatic instead of entered manually from the control panel, and to make the computer more general-purpose*³⁵⁶ ».

Il est hors de question ici que nous consentions ne serait-ce qu'un instant à nous perdre en de vaines et infructueuses suppositions, mais de la teneur des propos qui viennent tout juste d'être produits semblent clairement ressortir deux choses : tout d'abord, et si la guerre lui en avait effectivement laissé l'opportunité – ce qui malheureusement ne fut pas le cas - Atanasoff serait très sûrement parvenu à doter l'A.B.C. d'un système automatique de contrôle du flux des instructions, ce qui aurait permis la suppression de l'intervention humaine qui était normalement nécessaire pour assurer le fonctionnement de l'appareil. Ensuite, nul doute qu'il serait également parvenu à corriger l'A.B.C. de façon à en faire un calculateur à même d'embrasser une plus grande variété de types de calculs. Selon J. Gustafson, Atanasoff travaillait précisément sur ces modifications essentielles au cours de l'année 1942 et, n'eût été des circonstances impérieuses totalement indépendantes de sa volonté, il serait sûrement parvenu à ses fins. Mais l'effort de guerre entrepris par les Etats-Unis devait en décider autrement et Atanasoff fut contraint de se détourner de la conception de sa machine (ainsi que de sa charge d'enseignement), pour se consacrer à d'autres tâches qui paraissaient nettement plus urgentes à l'époque (à partir de 1942, il fut ainsi appelé à occuper une fonction importante au *Naval Ordnance Laboratory* de Washington). Ce sont donc P. J. Eckert et J. W. Mauchly qui récoltèrent finalement les fruits – tout de même que les honneurs – de l'ingénieux travail mené auparavant par Atanasoff. Celui-ci, sans conteste possible, fit preuve d'un surprenant manque de discernement en faisant à tel point confiance à Mauchly. A sa décharge cependant, il doit être rappelé qu'à cette période les individus qui s'intéressaient aux instruments de calcul électroniques étaient fort peu nombreux. Atanasoff

³⁵⁶ In [Rojas, Hashagen et al., 2000], p. 101.

fut sans doute ravi - et conforté - de trouver en la personne de Mauchly un allié potentiel. La suite des événements, comme on le sait, devait prouver combien il s'était très lourdement mépris (cette situation navrante fut par ailleurs grandement facilitée par le fait que l'entrée en guerre des Etats-Unis avait empêché Atanasoff de protéger ses idées et sa machine par des brevets).

Au delà, ou en deçà de cette controverse sur la « paternité » de l'ordinateur se profile cependant une autre problématique: celle, plus universelle, de l'invention ou de l'engendrement d'un individu technique, du déroulement de celle-ci, et, éventuellement, des problèmes de revendication de priorité qui en peuvent découler. Ceci nous amène aussi tout naturellement à nous interroger sur le rôle ou la place que l'inventeur est ici susceptible de tenir. L'objectif que nous poursuivons ici vise à définir une méthode qui nous permettrait de rendre compte adéquatement du développement de l'informatique, du surgissement de ses artefacts, ainsi que de l'apparition et des mutations de ses concepts clés. Or sans point de départ assurément reconnaissable, sans centre originaire réellement identifiable, on est en droit de s'interroger sur la possibilité même d'une telle entreprise. Comment alors, dans ces conditions, penser le commencement de l'informatique ? L'histoire regorge littéralement d'exemples qui tendent à prouver qu'assez fréquemment, des individus n'entretenant pas nécessairement des contacts entre eux et qui se trouvent parfois fort éloignés les uns des autres sur le plan géographique, inventent ou découvrent pourtant un même concept, une même théorie, un même objet, au même moment ou presque. On ne pourra que songer ici immédiatement à Wilhelm Schickard et à Blaise Pascal. En 1623, le premier conçut en effet son « horloge calculante » (un additionneur arithmétique mécanique qui pouvait notamment servir à la détermination des éphémérides), tandis que c'est deux décennies plus tard, en 1642, que Pascal construisit son célèbre instrument de calcul, la Pascaline. La machine du mathématicien philosophe originaire de Clermont-Ferrand différait de celle du mathématicien allemand en de nombreux points (notamment par la sophistication de son système de propagation des retenues), mais en l'espace de vingt-et-une années, et sans que Pascal n'ait jamais eu connaissance des travaux de Schickard³⁵⁷, ils fabriquèrent pourtant deux instruments qui participaient du même principe fondamental et accomplissaient peu ou prou les mêmes fonctions arithmétiques. Nous pourrions encore évoquer, mais dans un autre registre cette fois, l'invention indépendante et simultanée (due au 18^{ème} siècle aux inventeurs

³⁵⁷ Schickard mourut en 1635, date à laquelle Blaise Pascal était âgé de 12 ans. Il est donc évidemment exclu que celui-ci ait pu connaître quoi que ce soit à propos de Pascal. Quant à ce dernier, il semble qu'il n'ait jamais été au fait des travaux qui avaient été auparavant accomplis par Schickard.

parisiens Pierre Le Roy et Ferdinand Berthoud), du mécanisme dit d'échappement libre qui permit l'aboutissement du « garde temps de précision transportable », instrument désormais mieux connu sous la dénomination de chronomètre. Comment encore ne pas penser, et ceci viendra clôturer ce court inventaire, au calcul infinitésimal qui fut parallèlement inventé dans les dernières décennies du 17^{ème} siècle par Isaac Newton (« méthode des fluxions ») et Gottfried W. Leibniz ? Des exemples de cette espèce, plus ou moins anecdotiques, plus ou moins « nobles » ou singuliers, ne manquent pas qui démontrent finalement que l'invention d'un concept, d'une méthode, d'une théorie, ou bien encore d'un artéfact ne résultent nullement du cheminement intellectuel et de l'action patiente et laborieuse d'un seul et même individu qui oeuvrerait isolément, presque en reclus (on se trouve ainsi bien éloignés de la figure romantique de l'inventeur génial et solitaire telle qu'elle a pu se faire jour dans le courant du 19^{ème} siècle). Cette conception comtienne des choses tend en effet à faire de l'invention un phénomène au surgissement ponctuel et déterminé qui prend sa source et s'inscrit dans un mécanisme collectif et cumulatif non concerté et de l'inventeur l'agent (génial) d'une nécessité supérieure à la fois inaperçue et impensée par l'individu qui en est l'instrument privilégié. Ainsi, Auguste Comte a-t-il pu écrire dans le tome deux de son *Cours de philosophie positive* :

« Aucun homme éclairé ne saurait douter aujourd'hui que, dans cette longue succession d'efforts et de découvertes, le génie humain n'ait toujours suivi une marche exactement déterminée, dont l'exacte connaissance préalable aurait en quelque sorte permis à une intelligence suffisamment informée de prévoir, avant leur réalisation plus ou moins prochaine, les progrès essentiels réservés à chaque époque. (...) On a ainsi pu s'assurer déjà, en des cas importants et variés que, sous ce rapport, les grands progrès de chaque époque, et même de chaque génération, résulteraient souvent nécessairement toujours de l'état immédiatement antérieur : en sorte que les hommes de génie, auxquels ils sont, d'ordinaire, trop exclusivement attribués, ne se présenteraient essentiellement que comme les organes d'un mouvement prédéterminé qui, à leur défaut, se fût ouvert à d'autres issues³⁵⁸ ».

Plutôt que d'inventeurs (ou de génies) particuliers, il conviendrait alors mieux de parler de génie humain ou encore de génie propre à une époque en acceptant en même temps de reléguer le rôle de l'individu qui invente, « l'élé » pour ainsi dire, à celui de l'instrument

³⁵⁸ In Auguste Comte, *Cours de philosophie positive*, 48^{ème} Leçon, Paris, Hermann, T. II, p. 125.

illuminé d'une nécessité, d'un déterminisme, qui le dépassent complètement. La « conscience » spécifique, pour ainsi dire, serait alors sourdement à l'oeuvre au cœur d'un individu impuissant à l'apercevoir en tant que telle. Nous reconnaissons là, bien entendu, un thème qui sera commun aux grandes philosophies de l'histoire du 19^{ème} siècle (il est présent chez Hegel et Marx par exemple). Pourtant, il nous semble que demeure silencieusement lovée au foyer de ce phénomène qu'Auguste Comte supposait être si déterminé, si peu pétri de hasard, une part d'insaisissable, d'indicible, qui échappe obstinément à tout effort de saisie rationnelle. Celle-là même à propos de laquelle Bergson, dans son *Evolution créatrice*, a pu écrire la chose qui suit :

« Quant à l'invention proprement dite, qui est pourtant le point de départ de l'industrie elle-même, notre intelligence n'arrive pas à la saisir dans son jaillissement, c'est à dire dans ce qu'elle a d'indivisible ni dans sa génialité, c'est à dire dans ce qu'elle a de créateur. L'expliquer consiste toujours à la résoudre, elle imprévisible et neuve, en éléments connus ou anciens, arrangés dans un ordre différent ».

Faut-il alors accepter de voir ce que l'on nomme « invention » refluer de la sorte vers une impénétrable opacité (vers les rivages embrumés de l'inconscient ?), qui aurait pour effet de la placer à jamais hors de notre portée ou faut-il au contraire la voir comme quelque chose qui s'élabore progressivement – mais nécessairement - dans le champ du collectif social, dans le cumulatif générationnel ? Pouvons-nous nous satisfaire de la voir ainsi osciller entre ces deux pôles contraires que sont le hasard et l'impérieuse nécessité, le mystérieux indicible et le purement déterminé ? Et, après tout, un choix doit-il impérativement être fait entre E. Bergson et A. Comte ? En quoi, finalement, tout ceci pourrait-il nous aider à résoudre notre problème ? Affirmons-le d'emblée, si la conception augmentative proposée par A. Comte pour rendre raison de l'invention nous paraît devoir être maintenue jusqu'à un certain point, en revanche, nous ne croyons guère à cette sorte de mouvement prédéterminé, ce genre de nécessité supérieure, qu'il postulait également pour en expliquer le surgissement *hic et nunc*. Quant à l'explicable « jaillissement créateur » dont parlait Bergson, sa nature soi-disant insaisissable et indicible – si ce n'est par l'entremise d'un effort intellectuel réducteur et inapproprié qu'il supposait irrémédiablement voué à l'échec – semble finalement interdire que l'on cherche à en dire quoi que ce soit. Il semble en effet exister quelque chose comme une intuition inopinée, une illumination foudroyante qui viennent ainsi soudainement investir l'inventeur alors que celui-ci, quel que soit du reste le domaine d'activité particulier qui peut être le sien,

se révèle presque toujours impuissant à analyser *ex abrupto* ou *a posteriori* le processus ou l'acte d'engendrement de l'invention en tant qu'activité cognitive singulière vécue. Au passage, nous ne manquerons pas de noter que c'est là le même type d'obstacles (sous une forme atténuée toutefois puisqu'un acte langagier est généralement toujours possible ici), auquel se heurtent assez fréquemment les concepteurs de systèmes experts lorsqu'il s'agit pour eux de recueillir auprès d'un spécialiste humain un certain nombre de compétences en vue de les transférer ensuite, sous la forme d'un savoir rigoureusement formalisé, dans la base de connaissance de ces logiciels professionnels. L'expert, indubitablement, sait ce qu'il sait et il sait en outre parfaitement mettre en œuvre ce savoir, mais, assez curieusement, il peine à l'exprimer et à le formuler explicitement lorsqu'on lui en fait la demande. De la même façon, l'inventeur invente mais, en général, il échoue à saisir réflexivement le *comment* de ce processus de création. Si pour l'heure tout cela nous échappe encore, rien, en droit, ne nous empêche de croire que cette situation est irrémédiablement vouée à perdurer. Loin de nous l'idée qui consisterait à soutenir qu'à coup sûr cette énigme réellement fascinante trouvera inévitablement une réponse ou, plus modestement, un commencement de réponse, mais les progrès continûment réalisés dans le domaine des sciences cognitives – à commencer d'ailleurs par ceux qui ont été accomplis dans les différentes disciplines liées à la neurologie – nous paraissent à ce sujet extrêmement prometteurs.

Quoi qu'il en soit, et en l'état actuel des choses, nous pensons qu'une pareille conception ne peut aucunement servir à nous guider dans notre recherche. A une compréhension « spontanéiste » de l'acte inventif pensé comme un « jaillissement » mystérieux et indicible, et pour ce qui regarde l'informatique et les ordinateurs, nous préférons donc une certaine espèce de perspective cumulative - peut-être moins romantique et mystérieuse que la conception précédente – mais qui possède au moins l'avantage de nous permettre de progresser avec une certaine efficacité dans notre recherche. Nous rappellerons donc à cette fin ce que Gilbert Simondon a pu dire à propos de l'évolution des techniques :

« Pour que le progrès technique existe, il faut que chaque époque puisse donner à celle qui la suit le fruit de son effort technique ... l'être technique peut produire des éléments qui recueillent le degré de perfection auquel un ensemble technique est arrivé et qui, eux, peuvent être réunis pour permettre la constitution d'êtres nouveaux, sous forme d'individus... l'inventeur ne procède pas ex nihilo, à partir de la matière à laquelle il donne une forme,

*mais à partir d'éléments déjà techniques, auxquels on découvre un être individuel susceptible de les incorporer.*³⁵⁹».

A dire vrai, et quant on en vient à étudier avec soin ce que sont véritablement l'ordinateur et le vaste ensemble sociotechnique duquel cet artefact participe, l'informatique, on ne saurait soutenir un instant que l'un et l'autre se soient constitués comme ça, spontanément ou *ex nihilo*. D'un côté comme de l'autre, on se rend compte que l'on a affaire à des systèmes intégrés extrêmement complexes qui se sont en fait bâtis progressivement. Ce sont là en effet des entités ou des ensembles consubstantiels éminemment *captateurs* et hautement *composites* qui se sont, pour une large part, graduellement édifiés, raffinés et améliorés par constante accumulation et appropriation d'éléments techniques provenant très souvent de domaines étrangers au champ du calcul automatique. C'est bien là cette tendance que Jérôme Ramunni, évoquant une des caractéristiques constitutives essentielles de l'informatique, a pu nommer ailleurs « *l'appel aux techniques nouvelles.*³⁶⁰ ». Songeons par exemple à la mémoire de travail de nos ordinateurs, illustration fort significative s'il en est puisque non seulement celle-ci est absolument indispensable à ces instruments pour qu'ils puissent être effectivement reconnus en tant que tels et qu'en outre, c'est souvent autour des différents types d'éléments matériels qui ont tour à tour pu être employés pour la réaliser que s'est organisée la compréhension générationnelle de l'histoire des machines de l'informatique. *Mutatis mutandis*, les premiers dispositifs mémoriels qui seront utilisés sur les ordinateurs construits aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne dans la seconde moitié des années quarante et au début des années cinquante emprunteront quasiment *tous* qui aux technologies issues de la transmission radio ou de la télévision, qui à celles du radar. On pourrait ainsi mentionner les *mercury delay lines* (présentes sur l'E.D.V.A.C., l'E.D.S.A.C., le *Pilot A.C.E.*, le S.E.A.C.³⁶¹ ou encore l'U.N.I.V.A.C.), développées initialement par William Shockley³⁶² aux *Bell Labs* puis améliorées par P. J. Eckert au début de la deuxième guerre mondiale, et qui servaient originellement à mesurer des intervalles de temps dans le domaine des applications radar. Il en va de même avec les différents dispositifs de stockage électrostatiques (*cathode ray tubes*, tubes Williams ou *selectron*), qui furent utilisés comme support physique de la mémoire principale sur des machines telles que le *Ferranti I*, l'*I.A.S. Computer*, le

³⁵⁹ In [Simondon, 1958], pp. 70, 71 et 74.

³⁶⁰ In [Ramunni, 1989], p. 64.

³⁶¹ *Standard Eastern Automatic Computer*. Cette machine était très similaire à l'E.D.V.A.C.

³⁶² W. Shockley, fut en décembre 1947 l'un des inventeurs, avec J. Bardeen et W. H. Brattain, du transistor à point de contact en germanium.

S.W.A.C.³⁶³ ou l'I.B.M. 701: au cours du second conflit mondial, les militaires employèrent avec succès ces iconoscopes issus du domaine de la télévision pour permettre la visualisation en temps réel de la trajectoire d'une cible mouvante traquée par radar. Quant aux tubes à vide³⁶⁴ Wynn-Williams (également connus sous le nom de thyratrons), qui furent mis au point au tout début des années 30, il furent tout d'abord utilisés comme des dispositifs amplificateurs et redresseurs de courant en radio (avec les diodes et les triodes), puis comme compteurs d'évènements en physique fondamentale avant de servir, comme on le sait, d'éléments de commutation ultrarapides aux calculateurs électroniques puis aux ordinateurs. A la lumière de ces quelques exemples, dont on peut mesurer l'importance véritable si l'on connaît l'étendue du problème crucial que constitua indéniablement la question de la mémoire notamment au moment où l'on s'efforçait de construire les premiers ordinateurs, on s'aperçoit que l'informatique peut et doit être comprise comme un milieu technique *ouvert* qui tend quasi systématiquement à s'approprier ou à incorporer – en les modifiant parfois – des dispositifs techniques très innovants, mais pas forcément récents, n'ayant pas été à l'origine conçus « pour » elle. Il est très sûrement une part constante d'invention ou d'innovation susceptible d'être reconnue dans chacune des multiples dimensions que compte l'univers informatique, mais, assurément, une des modalités essentielles qui lui a permis et lui permet toujours de se déployer, de se renforcer et d'évoluer avec une saisissante réussite consiste incontestablement en l'assimilation continue d'individus techniques et de concepts empruntés ici ou là à d'autres disciplines (que l'on songe par exemple à la théorie de l'apprentissage avec l'informatique/robotique *évolutionniste* et *comportementale* et les réseaux de *neurones* ou encore, et ça n'est là qu'un exemple parmi bien d'autres possibles, à l'animat³⁶⁵ « bio-inspiré » Psikharpax, lointain descendant des petites tortues cybernétiques que le psychologue britannique William Grey Walter mis au point au début des années cinquante et qui « ambitionne » d'être un automate exhibant un comportement à la fois autonome, polyvalent et adaptatif). L'informatique n'est donc pas chose autosuffisante. Elle ne s'est pas constituée dans une linéarité enclose sur elle-même tout de même qu'elle n'est pas parvenue à se renouveler comme elle l'a fait effectivement à maintes reprises en puisant seulement dans le réservoir de ses propres acquis. Pour parvenir à la penser, à la comprendre vraiment, elle et les artefacts matériels et logiques qu'elle a incessamment secrétés depuis une soixantaine

³⁶³ *Standard Western Automatic Computer.*

³⁶⁴ Le premier tube à vide électronique avec grille de contrôle fut fabriqué en 1906 par l'américain Lee de Forest.

³⁶⁵ Le néologisme « animat » a été forgé par contraction des termes « animal » et « robot ». Au sens large, il est employé pour désigner un automate conçu pour simuler le comportement d'un animal. Notons qu'il n'est pas nécessaire qu'un robot soit matériellement réalisé à cette fin. L'animat peut ainsi parfaitement être un robot simulé évoluant dans un environnement informatique virtuel.

d'années, il convient plutôt de la situer dans une perspective résolument réticulaire, une visée qui, s'étendant dans le temps, privilégie la mise en lumière des confluences multipliées, des emprunts et des assimilations diversifiés qui tendent à intégrer leur propre objet en le modifiant et en le restituant quelquefois à leur milieu d'origine. C'est la raison pour laquelle nous croyons que des questions telles que « quelle a été la première machine ? » ou « qui l'a inventée ? » sont à la limite dénuées de sens lorsque l'on s'efforce d'appréhender l'histoire de l'informatique. On pourra alors toujours affirmer que l'on est dans l'erreur. Que Von Neumann a bel et bien inventé l'ordinateur. D'un certain point de vue, c'est indéniable, John Von Neumann a inventé l'ordinateur. Mais *quid* de Von Neumann s'il n'y avait eu Eckert et Mauchly ? *Quid* de Mauchly sans Atanasoff ? Etc. On serait presque ainsi tentés de « faire retour » jusqu'à l'abaque... La détermination d'une date précise pour repérer la venue au monde de quelque chose – ou de quelqu'un – est certes chose fort utile, et ce tout particulièrement dans le cadre de l'usage quotidien. Mais cette pratique courante, pour avantageuse et nécessaire qu'elle puisse être effectivement, est porteuse d'une imperfection fondamentale: elle tait avec obstination la période de gestation, elle dénie le gravidique en le maintenant toujours prisonnier de l'obscur. En s'instituant comme point ou centre d'origine à la fois unique et ultime, elle fait comme si, avant elle, rien n'avait jamais été qui puisse être un instant jugé comme véritablement digne d'intérêt. Or en informatique cela n'est pas le cas, loin s'en faut. Le diagramme présenté ci-dessous – on reconnaîtra le célèbre «*Computer Tree*» de l'*U.S. Army* - a été reproduit ici avec l'aimable autorisation de l'armée américaine³⁶⁶. Nous le produisons afin d'illustrer notre propos.

³⁶⁶ Cette autorisation nous a été aimablement accordée par le Dr. Paul H. Deitz (phd@amsaa.army.mil), directeur technique de l'*US Army Materiel Systems Analysis Activity* à l'*Aberdeen Proving Ground* (Maryland). Qu'il en soit ici remercié. Ce diagramme est l'œuvre de l'officier historien américain Karl Kempf (A.P.G.). Il a été pour la première fois publié en 1961 dans le chapitre 7 d'une monographie intitulée *Electronic Computers Within the Ordnance Corps*, laquelle fut rédigée par ce même K. Kempf

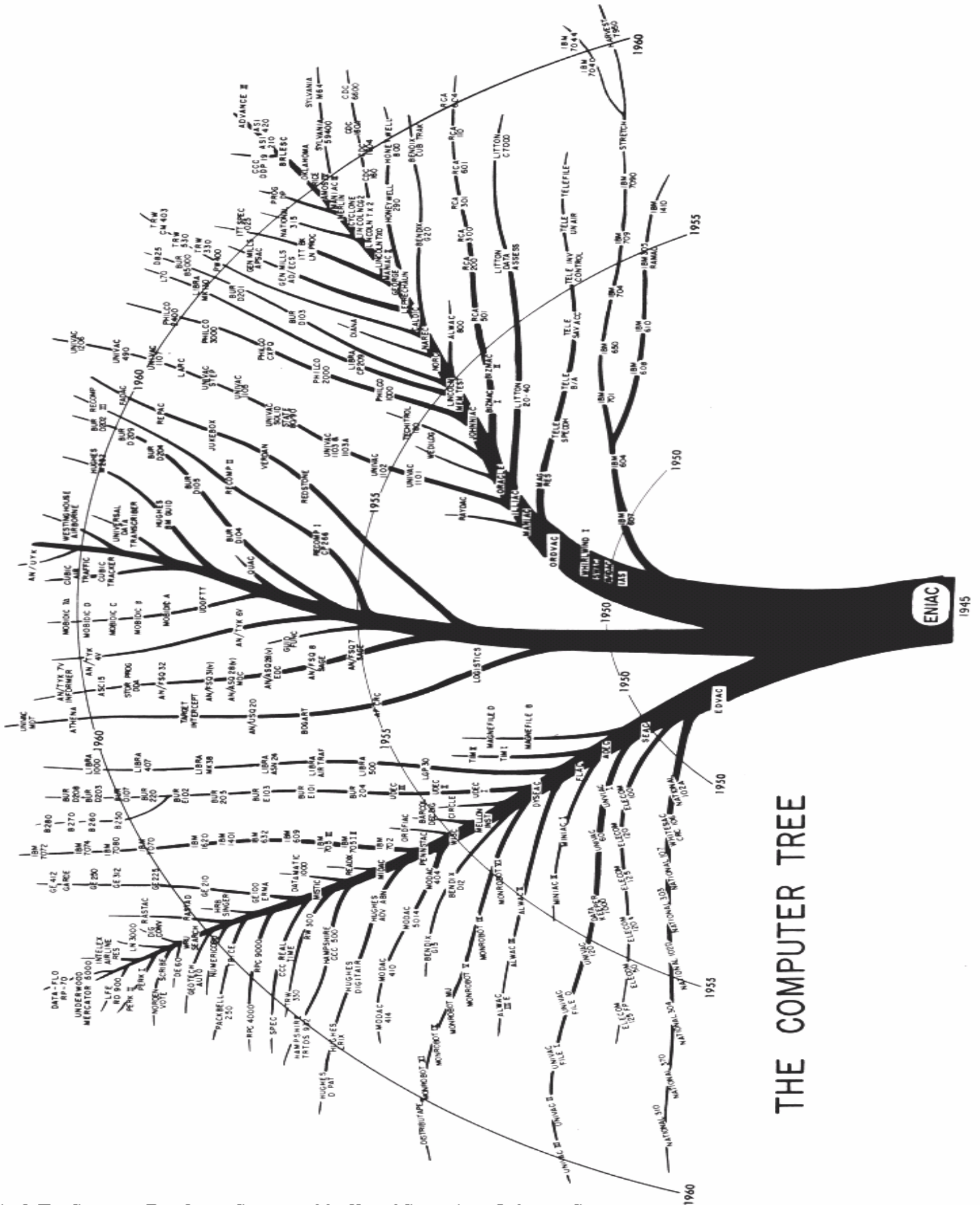


Fig. 2: The Computer Tree. Image Courtesy of the United States Army Ordnance Corps.

Bien qu'il n'ait jamais eu pour ambition de recenser la totalité des ordinateurs ayant été construits entre 1945 et 1960 (seules les machines financées et/ou utilisées au sein de l'*Ordnance Corps* de l'*U.S. Army* durant ces quinze années y sont effectivement représentées), ce diagramme, au demeurant fort bien conçu, est intéressant à plus d'un titre. On commencera tout d'abord par distinguer deux des trois ramifications principales à savoir celles qui, situées à gauche et droite de la structure arborescente, prennent naissance au niveau de la première division du tronc. La branche de gauche (où figure l'E.D.V.A.C., prototype des machines à fonctionnement sériel), présente les ordinateurs qui furent développés pour un usage commercial au cours de cette période. La branche de droite représente quant à elle l'ensemble des ordinateurs construits pour un usage scientifique (l'I.A.S.C.³⁶⁷, on le voit, fut le premier ordinateur électronique à fonctionnement parallèle). Sur la branche centrale apparaissent les différents ordinateurs ayant été spécifiquement conçus pour répondre à des besoins militaires particuliers (bien que l'armée ait souvent recouru à des machines figurant sur l'une ou l'autre des deux autres branches pour effectuer des tâches de nature logistique, administrative ou bien scientifique). La distance radiale qui sépare un ordinateur donné du calculateur E.N.I.A.C. (positionné à la base du tronc de l'arbre juste au dessus de l'étiquette « 1945 »), constitue une indication approximative de la date à laquelle celui-ci fut développé, construit ou encore mis en opération³⁶⁸. Comme on ne peut manquer de le constater, le centre à partir duquel se déploie ce schéma rameux est l'E.N.I.A.C. Cela laisse donc entendre de manière plus ou moins explicite que c'est à partir de là, de cette seule machine, que tout, pour ainsi dire, a commencé. Ceci ne signifie pas pour autant que l'auteur de ce travail remarquable, en l'occurrence l'officier historien américain Karl Kempf, puisse se voir adresser une quelconque forme de reproche eut égard à cet état de fait. En vérité, ce diagramme est très connu. Malheureusement lors de sa diffusion (qui a été très importante), il a fréquemment été extrait du document dans lequel il figurait originellement sans pour autant que l'on mentionne toujours l'intitulé de ce dernier. Autrement dit, et assez souvent, tout ce à quoi l'on est susceptible d'être confronté lorsqu'on le rencontre est un schéma portant dans sa partie inférieure gauche la désignation suivante : « *The Computer Tree* ». Or celui-ci, c'est évident, ne saurait prétendre à faire véritablement sens en dehors du contexte précis dans et pour lequel il a été élaboré, c'est-à-dire dans le cadre d'une étude qui portait spécifiquement sur les ordinateurs ayant été financés et/ou utilisés au sein de l'*U.S. Army Ordnance Corps* entre

³⁶⁷ I.A.S.C.: *Institute for Advanced Study Computer*.

³⁶⁸ Quant on connaît la durée des délais qui pouvaient effectivement séparer la date de mise en chantier d'une machine et celle qui marquait enfin sa mise en service, on comprend qu'il ne puisse s'agir là que d'une approximation.

1945 et 1960. Dans cette perspective particulière, mais parfaitement légitime, on s'accordera à reconnaître qu'il n'y avait nullement lieu d'évoquer l'Harvard Mark I ni non plus l'A.B.C., le développement de ces deux machines - auxquelles pourtant l'E.N.I.A.C. devait tellement tant sur les plans matériel qu'organisationnel - n'ayant jamais bénéficié d'aucun soutien financier de la part de l'*Ordnance Corps* (il doit cependant être noté que la conception de l'A.S.C.C. fut cofinancée par I.B.M. et par la *Navy* américaine). Ce n'est bien entendu pas là l'unique manière par laquelle l'idée - l'éthologue Richard Dawkins aurait sans doute parlé ici de « même » - qui veut que l'E.N.I.A.C. ait été l'unique précurseur de l'ordinateur, s'est propagée. D'autres voies, d'autres facteurs ont indéniablement contribué à l'instauration de cette situation, mais à la lumière de ce qui vient d'être dit, on voit peut-être mieux comment le fourvoisement, pour ne pas dire l'erreur, s'est graduellement diffusé au point de parvenir finalement à s'institutionnaliser.

La constitution d'une archéologie de l'informatique qui se voudrait authentique, d'une philosophie de l'ordinateur qui serait réellement soucieuse de mettre en lumière et de garantir la vérité de son objet et celle de son histoire, implique que nous nous efforcions de dépasser de pareilles méprises - de pareils lieux communs - et que nous tentions, lorsque cela sera effectivement possible, de les corriger. Elle requiert également que nous acceptions de nous aventurer - pour un moment au moins - dans les méandres de cette dimension souterraine, dans les sinuosités de cet espace racinaire qui, bien que dérobé à la vue par l'immensité et la richesse formidables de « l'arbre » informatique, n'en sont pas moins nécessaires à la compréhension de son développement. La citation suivante a été attribuée à Winston Churchill: « *The further backward you look the further forward you can see* ». Pour comprendre l'informatique telle qu'elle s'est faite, telle qu'elle a été, pour saisir ses mutations, ses ruptures, ses moments de divergence et ses phases de convergence, mais peut-être aussi pour appréhender son présent - qui est déjà futur -, il nous faudra tout d'abord consentir à orienter notre regard vers le passé. Mais après tout n'est-ce pas là une des composantes les plus fondamentales de l'entreprise archéologique ?

2.1.5. Comprendre l'histoire de l'ordinateur et de l'informatique : définition d'une méthodologie.

Nous sommes ici à la recherche d'une méthode qui nous permettrait d'appréhender l'histoire de l'informatique et celle de ses artéfacts. Ce problème, dont les possibles solutions impliquent toutes l'adoption d'un certain nombre de choix à la fois méthodologiques et historiographiques – puisqu'elles doivent finalement autoriser la définition d'un schéma structurant original - on s'en doute aisément, nous ne sommes pas les premiers à l'exprimer explicitement. Nous ne sommes pas non plus, loin s'en faut et évidemment, les premiers à tenter de lui apporter une ou plusieurs réponses. Dans la partie introductive du très beau recueil d'articles consacrés aux premiers calculateurs et ordinateurs que Raúl Rojas et Ulf Hashagen ont édité il y a quelques temps déjà³⁶⁹, Michael R. Williams, par ailleurs auteur d'une *History of Computing Technology*³⁷⁰ tout à fait remarquable, s'interrogeait sur les mérites et les imperfections propres aux modalités classificatoires effectivement – et semble-t-il légitimement - envisageables pour tenter de rendre compte fidèlement du déroulement de cette formidable épopée. Ainsi pouvait-il écrire:

« One can classify computing machines by the technology from which they were constructed, the uses to which they were put, the era in which they were used, their basic operation principles, analog or digital, and whether they were designed to process numbers or more general kinds of data³⁷¹ ».

Si nous consentons alors à suivre Michael R. Williams dans le cours de ses réflexions liminaires, il serait semble-t-il possible de différencier au moins cinq grands types taxinomiques, systématiques, que nous qualifierons alors d'élémentaires et de majeurs, qui permettraient chacun, selon leurs modes opératoires respectifs et les critères distinctifs spécifiques auxquels ils font précisément appel, de conférer un certain ordre à la pléthore de « machines à calculer³⁷² » qui furent construites durant la seconde moitié de ce siècle. Ainsi,

³⁶⁹ [Rojas, Hashagen et al., 2000], pp. 1-11.

³⁷⁰ [Williams, 1997].

³⁷¹ [Rojas, Hashagen et al., 2000], p. 1.

³⁷² Nous nous permettons de placer ici cette expression entre guillemets car l'usage courant qui en est fait en langue française semble plus directement renvoyer aux calculatrices – ou calculettes – plutôt qu'aux calculateurs et ordinateurs proprement dit. L'américain, quant à lui, réserve une appellation spécifique pour désigner précisément ce genre d'instruments: on parlera de *pocket calculators*; les termes *calculator* et *computer*, comme nous l'avons précédemment vu, s'appliquant (parfois indifféremment), aux artéfacts que nous nommons calculateurs et ordinateurs.

ces cinq grands accès, qui, affirmons-le sans plus tarder, ne sont pas exclusifs les uns des autres, seront les suivants. On ordonnancera donc calculateurs et ordinateurs en sélectionnant comme critère principal de différenciation des catégories auxquelles ils peuvent appartenir: 1) les différentes technologies à partir desquelles ceux-ci auront été construites (*i.e.* relais, tubes à vide, transistors, etc.) ; 2) le ou les types de tâches calculatoires qui leur furent assignées (*i.e.* problèmes de balistique conventionnelle, d'optimisation logistique civile ou militaire, résolution de problèmes liés à des projets militaires bénéficiant d'un niveau élevé de confidentialité³⁷³, à la prévision météorologique, à l'astronomie, à la physique fondamentale, à la statistique, etc.) ; 3) l'époque à laquelle ces instruments furent utilisés ; 4) leurs principes de fonctionnement élémentaires (s'agissait-il par exemple de dispositifs analogiques ou digitaux ?) ; 5) le type de données – exclusivement mathématiques ou non - qu'ils étaient susceptibles de traiter (étaient-ils de « simples broyeurs de nombres », des *numbers crushers*, ou s'agissait-il au contraire de machines universelles, c'est-à-dire d'artéfacts programmables dont la structure logique leur permettait de prendre en charge des classes de problèmes ou de tâches dont les données pouvaient indifféremment être de type numérique ou alphanumérique).

Comme il est ici possible de le constater, et la liste dont il vient juste d'être fait mention est loin d'être exhaustive bien entendu, les critères de classification ne manquent pas qui permettraient effectivement à l'archéologue de l'informatique de parvenir, d'une manière ou d'une autre, à organiser son champ de travail d'une façon apparemment satisfaisante. A partir de là, du simple constat de l'existence de cette multiplicité de contraintes offertes, de canaux disponibles, pour procéder à la classification de la pléthore de « créatures » à la fois complexes et variées qui peuplent le « zoo informatique », on pourrait tout à fait légitimement

³⁷³ Ainsi que le rappelle Herman H. Goldstine dans *The Computer from Pascal to Von Neumann*, page 214, le premier problème qui fut jamais soumis à l'E.N.I.A.C. était considéré comme étant de très grande importance (*sic*) par le *Theoretical Physics Laboratory* de Los Alamos (U.S.A.). Ainsi écrit-il: « *Very early Von Neumann realized the supreme importance that machine [E.N.I.A.C.] could have for Los Alamos, especially for studying the feasibility of various ideas arising in that laboratory. Accordingly, he urged the theoreticians there (i.e. Stanley P. Frankel et Nicholas Metropolis), to examine the ENIAC with the view to using it for their calculation. They agreed with him and plans were initiated to do a very large scale calculation as a test of the feasibility of a process that was then felt to be of great importance to Los Alamos... This problem was of great importance, since it was to test out a dramatic new idea for Los Alamos and an equally dramatic one for the Moore School, the ENIAC.* » Ce problème mathématique « spectaculaire » (*dramatic*) qui servit ainsi de banc d'essai à l'E.N.I.A.C., Scott McCartney ne manque pas de le rappeler à la page 103 de *ENIAC, The Triumphs and Tragedies of The World's First Computer*, fait à ce jour encore l'objet d'une classification confidentielle. Immédiatement après, il fait cependant mention de l'élément d'information suivant: « *It is known that it was related to the feasibility of building a hydrogen bomb.* » On ne manquera pas de noter que les sévères restrictions d'accès qui s'appliquent à ce type d'informations toujours jugées sensibles par les complexes militaro-gouvernementaux américain et britannique – nous avons parlé de l'E.N.I.A.C. et du projet PY, mais nous aurions tout aussi bien pu évoquer certains des travaux de cryptanalyse mécanisée qui furent menés pendant la deuxième guerre mondiale à Bletchley Park – ne facilitent guère la tâche, déjà écrasante, de l'historien de l'informatique.

se laisser aller à penser qu'après tout la résolution de ce problème ne tient finalement qu'à l'élection de la « bonne » méthode de distribution, et, par conséquent et concurremment, à l'éviction des modalités de découpage que l'on aura estimé insuffisamment adaptées pour accomplir la tâche à réaliser. Notons cependant que ce processus sélectif, systématiquement, se trouvera dirigé par le type d'approche théorique – thématique, géographique, etc. - qu'aura décidé d'adopter, pour ainsi dire en amont, l'historien de l'informatique. Ainsi, par exemple, pour quiconque s'intéressera dans cette perspective à « l'Etat et ses nombres³⁷⁴ », autrement dit à la façon dont l'apparition et la disponibilité de plus en plus grande des systèmes de traitement de l'information a littéralement transfiguré – en révolutionnant notamment la statistique - non seulement les rapports que l'Etat entretenait à ses administrés, mais également à lui même, les critères n°2 et n°5 – le type de tâches calculatoires assignées aux machines et le ou les genres de données qu'elles étaient en mesure de traiter - s'avèreront tout particulièrement bien adaptés, au moins à titres d'opérateurs élémentaires de triage. Il apparaît cependant bien vite que le niveau de grain autorisé par ces modalités de répartition, ou pour le dire autrement la qualité de définition qu'elles autorisent, est insuffisant pour faire d'elles un outil véritablement efficient. En procédant de la sorte en effet, on parviendra, *grosso modo* et dans un premier temps, à distinguer deux grandes classes de dispositifs, quels que soient par ailleurs les types techniques desquels ceux-ci participaient (ceci constituant encore une autre question à résoudre): les machines dont l'architecture permettait exclusivement le traitement de données numériques, donc des dispositifs à usage essentiellement scientifique (très souvent des *one kind computers* si l'on songe ici aux seuls systèmes électroniques), et... les autres, à savoir ceux qui furent conçus, spécifiquement ou pas³⁷⁵, pour embrasser une gamme

³⁷⁴ Nous reprenons ici l'intitulé d'un entretien entre Anne Lefèvre et Alain Desrosières, auteur de *La politique des grands nombres* (Ed. La Découverte, Paris, 1993), paru en décembre 1996 dans le numéro n°36 des Cahiers de Science et Vie (Les Cahiers de Science et Vie, Coll. « Grands Ingénieurs », « Qui a inventé l'ordinateur ? », n°36, décembre 1996, pp. 6-12.).

³⁷⁵ Paul E. Ceruzzi, dans [Ceruzzi, 1998], pp. 24-25, rappelle ce fait absolument déterminant à propos de l'E.D.V.A.C., la première machine électronique digitale – au moins sur le papier - dotée d'une architecture à programme interne, et qui avait été initialement destinée à un usage exclusivement scientifique : «*Von Neumann found that although it was initially intended for evaluating mathematical expressions, the EDVAC's stored-program design made it "very nearly an 'all-purpose machine'" and it was better than punched card equipment for sorting data. This was a crucial observation, as sorting data was a central task for commercial work, and punched card equipment had been optimized for it.* » Cette prise de conscience de la généricité, pour tout dire de l'universalité, de la flexibilité, et des performances extraordinaires d'une machine automatique pourvue d'un *design* impliquant la notion de programme interne (et non plus câblé, comme c'était par exemple le cas avec l'E.N.I.A.C.), représenta un tournant absolument décisif dans l'histoire de l'informatique. A partir de ce moment, et entre autres choses dignes d'être repérées et signalées concernant ce fait précis, la distinction qui était susceptible d'être faite entre les calculateurs scientifiques et ce que l'on appelait alors les équipements mécaniques de bureau (machines à écrire, à tabuler, à additionner, trieuses, etc., machines mécaniques, électromécaniques ou électroniques), perdit considérablement en netteté. Les ordinateurs électroniques digitaux à architecture Von Neumann, largement plus performants sur tous les plans, remplacèrent peu à peu ces dispositifs pourtant spécifiquement conçus (*optimized*), pour accomplir des tâches bureautiques et/ou commerciales

nettement plus diversifiée de problèmes parmi lesquels, bien sûr, figuraient ceux ayant trait à des questions de nature spécifiquement administrative telles que le recensement des populations ou encore l'analyse et le traitement de sondages. Si l'objectif effectivement poursuivi par l'historien de l'informatique vise bel et bien la constitution d'une chronique des calculateurs et ordinateurs qui furent utilisés par les institutions gouvernementales civiles afin d'accélérer – de mécaniser – le traitement de leurs données publiques, alors il sera contraint de taire, d'ignorer, ou tout le moins de passer rapidement sur – faute de temps et de place - un pan entier de cette histoire : celui concernant précisément les machines à vocation scientifique, dont le caractère principal, fondamentalement constitutif de la « physionomie » de l'univers informatique, et ce tant des points de vue historiques, techniques que conceptuels, ne saurait être raisonnablement nié ni non plus laissé aux brumes de l'impensé. Soit. Imaginons donc - après tout pourquoi pas ? – que cette sorte de « sacrifice » méthodologique soit délibérément consentie. Que restera-t-il alors qui puisse être étudié après avoir procédé à cette coupe franche? Aura-t-on à ce point « purifié » et réduit le champ d'investigation - entendre par là restreint le nombre considérable de machines, et tout ce qu'elles bien peuvent impliquer par ailleurs, devant être prises en ligne de compte dans l'étude à conduire – au point que le gain de transparence, de lisibilité ainsi obtenu compensera peu ou prou les pertes, sur les plans historique et théorique, que ce processus impliquera obligatoirement pour notre compréhension du problème ? On est en fait tout droit conduits à s'interroger, et donc à formuler quelques réserves, quant à l'efficacité et la légitimité véritables qu'il y aurait ainsi à tenter d'élaborer une pensée de l'informatique de type sélectif, réducteur, et qui ne considérerait, puisque c'est là l'exemple que nous avons choisi pour illustrer notre présent propos, que les ordinateurs à vocation « commerciale ». Nous l'avons déjà affirmé à plusieurs reprises, un des attributs principaux permettant de qualifier notre domaine de recherche a justement trait au nombre gigantesque de machines digitales électroniques qui furent construites au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle (profitons de cette remarque pour rappeler à nouveau que Hans B. Pufal et Bruce Watson ont à ce jour dénombré quelques

typiques, tandis que ces derniers firent très fréquemment l'objet de modifications *ad hoc* pour être asservis (interfacés), aux machines qui devaient les détrôner définitivement. D'éléments centraux, incontournables, qui faisaient pour ainsi dire système avec leurs opérateurs, ils furent ainsi relégués au rang de simples périphériques de machines dont l'opération – quand tout se passait bien – excluait presque entièrement l'intervention humaine (généralement ils servaient d'éléments d'entrée/sortie aux calculateurs). Nous aurons amplement l'occasion de revenir sur cela. A la lumière de la remarque formulée par P. Ceruzzi, on ne s'étonnera en outre guère d'apprendre que le premier calculateur digital électronique spécifiquement destiné au domaine commercial – U.N.I.V.A.C. I - ait été fabriqué et vendu par la firme que fondèrent, le 22 décembre 1947, John Mauchly et Prosper J. Eckert, les « pères », avec J. Von Neumann et Herman H. Goldstine, de l'E.N.I.A.C. et de son successeur révolutionnaire, à savoir l'E.D.V.A.C.

4335 ordinateurs et que cette *Big List*, pour reprendre ici leur dénomination tout à fait explicite, ne prétend nullement à l'exhaustivité !). On aura par conséquent bien soin, dès lors que l'on sera amené à critiquer ou à concevoir une manière originale d'appréhender ce champ, de bien garder à l'esprit le fait que cette vertigineuse diversité, et tout ce qu'elle ne manque pas d'emmener dans sa traîne, sont en très grande partie la cause de sa formidable richesse en même temps que la source apparemment intarissable de tous les problèmes qui y peuvent survenir. Problèmes variés donc, parmi lesquels figurent évidemment en bonne place, pour ne pas dire en première ligne, les questions à la fois inéluctables et récurrentes liées à la définition d'un schéma taxinomique optimal qui permettrait enfin d'organiser cette profusion tout à la fois fascinante et déconcertante. L'univers informatique, son histoire, contre toute attente peut-être car après tout elle est tellement récente, se donnent d'emblée sous la guise d'un espace brouillé, luxuriant, « babelisé », auquel il conviendrait décidément de mettre bon ordre si l'on espère un jour y voir véritablement clair. Cela, bien sûr, tout le monde l'a compris. Demeure toutefois à savoir si cela a été toujours *bien compris*. Ce que justement la précellence du modèle générationnel et de ses avatars directs ou indirects, *timelines* et autres *Landmarks in Digital Computing*, pour utiles qu'ils puissent être jusqu'à un certain point, ne nous enjoint pas réellement à penser.

Nous croyons par conséquent qu'il est impératif de procéder ici à un changement de perspective sachant par ailleurs que toute visée par trop généralisatrice, par trop englobante, aura inmanquablement pour effet d'entraîner une sorte de presbytie théorique tandis que l'inverse, qui correspondrait alors à une approche plus spécialisée, empêcherait l'obtention d'une « profondeur de champ » pourtant bien nécessaire (on se concentrerait par exemple exagérément sur les aspects de telle ou telle machine en perdant de vue le contexte général dans lequel elle a été construite et les transformations de fond qu'elle a pu éventuellement induire dans le champ du traitement automatisé de l'information sur les plans technique, conceptuel ou bien encore de l'usage). Dans ces conditions particulières, où, finalement, il semble que l'on tende toujours à gagner d'un côté ce que l'on perd de l'autre, comment opérer ? Nous proposons une approche mixte, mélangée, un accès où, pour employer encore une métaphore issue du domaine de l'optique, notre distance focale par rapport à ce que nous observons ne sera pas fixe mais pourra au contraire varier. En vue d'appréhender l'histoire de l'informatique et celle de ses instruments, lesquelles paraissent en vérité difficilement dissociables tant elles se sont mutuellement déterminées et modelées, il nous sera nécessaire d'ancrer notre réflexion dans la temporalité. Mais il ne s'agira pas pour autant de nous emparer d'une machine, la première figurant dans « l'ordre d'apparition chronologique » de

l'interminable cohorte des instruments de calcul ayant existé, de l'étudier, puis, une fois ceci accompli, de passer à la suivante pour répéter linéairement ce processus jusqu'à complet épuisement du gisement (comme cela se produit parfois plus ou moins dans le cas des *timelines*). Il nous faudra par conséquent choisir avec circonspection les machines – calculateurs ou ordinateurs – que nous examinerons. Notre investigation débutera au 17^{ème} siècle pour venir s'achever à notre époque, moment qui, non content d'avoir été le témoin de l'irrésistible montée en puissance de l'informatique, l'a consacrée (comme chacun le sait l'industrie informatique est une des plus florissantes qui soit en ce début de nouveau millénaire), tandis qu'elle voit déjà se dessiner les contours fabuleux de ses mutations annoncées. Une rupture intellectuelle capitale – mais elle ne sera pas la seule - viendra briser l'apparente régularité de ce *continuum* temporel qui correspondra à la rédaction, au mois de juin 1945, du *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.* Pour « tardive » qu'elle puisse être, au moins en regard des trois siècles que nous ambitionnons de parcourir bientôt, cette brisure constitue pourtant la ligne de démarcation qui permet de repérer avec assurance la séparation d'entre deux mondes, bien que le premier – nommons-le « celui d'avant l'ordinateur » – ait continué à déborder sur le second – celui de l'ordinateur - pendant quelques temps. Ceci ne signifie point, ainsi que nous nous sommes efforcés de le montrer brièvement un peu plus haut, que l'ordinateur soit apparu brusquement en balayant tout, ou presque, de ce qui avait été avant lui. Au contraire. Il apparaît plutôt comme le point focal ou paroxystique où sont venus converger, pour cristalliser en une manière réellement spectaculaire et inédite, des traditions (automatisme) ainsi que des techniques et des concepts dont certains pouvaient être fort anciens (songeons par exemple aux idées de Charles Babbage³⁷⁶ et à son projet – la machine ne sera jamais réalisée – d'*Analytical Engine*).

Dans une première partie, qui correspondra à une longue période s'étalant de 1623 à 1945, nous tenterons de mettre en lumière cet héritage, de voir comment et pourquoi certaines idées ont pu apparaître, se transformer, se raffiner et jouer un rôle, d'une manière ou d'une autre, dans le long processus qui a finalement conduit à l'invention de l'ordinateur. Ceci

³⁷⁶ En écho à cela, nous citerons A. M. Turing qui, en 1950, écrivait : « *L'idée de la construction d'un ordinateur digital est ancienne. Charles Babbage, disciple de Lucas, professeur de mathématiques à Cambridge de 1828 à 1839, avait conçu une telle machine appelée "Machine Analytique", mais elle ne fut jamais terminée.* ». Cette citation est tirée du très célèbre article « *Computing Machinery and Intelligence* » publié pour la première fois en 1950 dans le numéro 236 (vol. LIX) de la revue *Mind*. Il a depuis fait l'objet d'une réimpression et figure dans le recueil *Pensée et Machine* (Seysse, Editions Champ Vallon, 1983, pp. 39-67). Au début de ce siècle, le fils de Charles Babbage, le Major Henry P. Babbage, obtint l'aide financière et technique de la firme Monroe (un des grands fabricants américains de machines mécaniques de bureau), afin de réaliser le *mill* – le mécanisme central arithmétique - de l'*Analytical Engine*. Ce dispositif fut achevé en 1906 et il est désormais exhibé au Muséum des Sciences de Londres

nécessitera bien sûr que nous nous intéressions aux machines à calculer qui l'ont devancé – les plus pertinentes de notre point de vue – mais également aux raisons qui présidèrent à leur élaboration ainsi qu'aux domaines particuliers dans lesquelles elles furent employées. A travers l'étude détaillée du *First Draft of a Report on the EDVAC*, nous examinerons ensuite le modèle organisationnel de l'ordinateur – l'architecture Von Neumann – pour voir en quoi celui-ci tranchait radicalement (et continue de trancher puisque c'est encore sur cette structure logique que repose la construction de la majorité des machines produites à l'heure actuelle), avec les principes fondamentaux qui sous-tendaient le fonctionnement des instruments automatiques de calcul qui l'avaient précédé ou dont il était contemporain. Nous montrerons également dans quelles circonstances précises – pourquoi, comment ? – John Von Neumann, avec l'aide de Presper J Eckert et John W. Mauchly, définit cette répartition des fonctionnalités de l'ordinateur³⁷⁷ tout en ne manquant pas de souligner la très forte influence qu'exercèrent sur lui les connaissances neurologiques de son époque et, bien entendu, la cybernétique de Norbert Wiener (comme en témoigne notamment le *First Draft*, il connaissait très bien les travaux de McCulloch et Pitts sur le fonctionnement prétendument logique du cerveau tandis que les rapports entre celui-ci et l'ordinateur, selon les propos de Klara Von Neumann, son épouse, constituait un thème « qui le préoccupait depuis longtemps³⁷⁸ »). Sans aller jusqu'à mentionner *The Computer and the Brain*, recueil au titre fort évocateur des conférences Silliman qu'il prononça à l'Université de Yale durant la première moitié de l'année 1955 (c'est-à-dire quelques temps avant que la maladie qui devait l'emporter le 8 février 1957 ne se déclare), il suffit de considérer la terminologie dont il usa dans le *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.* pour désigner les différents organes de l'ordinateur (« mémoire », « éléments/neurones »), pour se trouver définitivement convaincu de l'importance de cette influence, de la force de cette homologie supposée entre automate logique et cerveau humain³⁷⁹. Enfin, dans une dernière partie, nous nous intéresserons aux ordinateurs

³⁷⁷ L'expression est de Dominique Pignon. Elle figure dans la postface – judicieusement intitulée « *Les machines molles de Von Neumann* » - que cet auteur a présentée à la suite du texte de l'édition française de *The Computer and the Brain*. D. Pignon est par ailleurs le rédacteur des nombreuses notes explicatives qui paraissent en marge de cette édition.

³⁷⁸ In [Von Neumann, 1958], p. 7.

³⁷⁹ Cette idée extrêmement puissante est également présente chez Turing où cerveau et machine – machine molle et machine dure - se trouvent articulés l'un à l'autre grâce à un mouvement indifférenciant saisissant l'être informationnel qui leur est commun sur le plan d'existence le plus essentiel qui puisse être décelé (selon Turing), à savoir le niveau « intellectuel ». La matérialité propre des êtres considérés ici, cela même qui exprime leur(s) différence(s), est considérée ici comme étant parfaitement négligeable. Il est donc parfaitement possible d'en faire l'économie. Cette notion est dérivée du principe wienerien qui postulait qu'à niveau de complexité comportementale égal, deux êtres pouvaient être dits équivalents. Chez Wiener cependant, cette possible équivalence reposait d'abord sur une observation des individus qui s'inscrivait dans l'extériorité (bien qu'un comportement observable particulier puisse être intentionnel et interprété comme tel). Chez Turing, tout semble

proprement dits et à la manière dont l'informatique s'est peu à peu constituée de 1946 à aujourd'hui. Nous distinguerons ainsi grandes trois phases successives : la première informatique (1945 – 1965), la deuxième informatique (1965 – 1975) et enfin la troisième (1975 - ...). En étudiant certaines des machines qui furent construites pendant les soixante dernières années ainsi que les problèmes spécifiques qui caractérisèrent telle ou telle « époque » informatique (la résolution du problème de la mémoire des ordinateurs sera par exemple centrale pour la première d'entre elles), nous démontrerons comment des besoins et des pratiques spécifiques, mais aussi l'apparition de nouveaux types de composants (comme les mémoires à tores de ferrite ou le transistor), de nouvelles techniques (apparition des langages de programmation de haut niveau et de nouveaux modes d'adressage de la mémoire), déterminèrent l'élaboration de ces dernières et comment celles-ci rétroagirent à leur tour sur ces informatiques et tous ceux (industriels, militaires, chercheurs, utilisateurs institutionnels ou privés), qui en furent les acteurs fondamentaux.

Avant d'entamer ce long voyage, il nous faudra également déterminer le sens de certaines des notions qui sont les plus essentielles parmi toutes celles que l'on rencontre – ou que l'on rencontrait – dans la sphère du calcul artificiel en général et dans celle de l'informatique en particulier. Nous examinerons ainsi les concepts de *programme* et de *contrôle par séquence*, et le rôle différenciateur éminemment décisif tenu ici par les processus de *feedback*. De même, nous étudierons les notions de machine *digitale* et de machine *analogique*. Ceci constitue un préalable nécessaire à notre étude dans la mesure où les principes de fonctionnement numérique et analogique – lesquels apparaissent souvent comme concurrents - sont largement antérieurs à l'apparition de l'ordinateur (le boulier est déjà un instrument numérique tandis que les premières machines à calculer analogiques, comme le *Planimeter* de l'ingénieur allemand J. H. Hermann ou le *Tidal Harmonic Analyser* de Lord Kelvin³⁸⁰, sont construites dans le courant du 19^{ème} siècle). Quant aux notions de contrôle par programme et de contrôle par séquence, nous tenterons, en nous appuyant sur l'examen circonstancié de quelques automates et machines arithmétiques célèbres, de démontrer en

se jouer plutôt dans l'intériorité des êtres (il est fondamentalement question de «niveau intellectuel»). La démarche turingienne fonctionne ainsi sur les modes conjoints de la transparence de l'être et de l'isolation de ce qu'il y a en lui de plus fondamental : la dimension informationnelle.

³⁸⁰ Dans ses *Mathematical and Physical Papers* (vol. VI, p.280), Lord Kelvin – Sir William Thomson - écrivait à propos de son prédicteur de marées: « *The object of this machine is to substitute brass for brain in the great mechanical labor of calculating the elementary constituents of the whole tidal rise and fall...* ». Substituer « le cuivre (ou le laiton) au cerveau », entendre soulager en partie l'homme de la pénibilité de la réalisation de calculs longs et fastidieux en lui fournissant une aide mécanique qui soit fiable et précise est une des principales forces motrices qui ont conduit les concepteurs de machines à calculer à fabriquer celles-ci. Agé de 17 ans, Blaise Pascal construisit ainsi ses premières machines dans le but d'alléger la charge de travail de son père, alors collecteur de l'impôt et des taxes royales en Haute-Normandie.

quoi elles peuvent bien différer et malgré tout se confondre jusqu'à se voir parfois complètement amalgamées lorsqu'on emploie le terme « programme » dans le cadre de l'usage courant. Nous examinerons aussi en détail les différents types d'éléments qui ont été successivement développés et employés (pas toujours s'il l'on songe au *Selectron* conçu chez R.C.A. par Jan Rajchman pour l'I.A.S. *Computer*), pour servir de support physique aux mémoires internes et/ou auxiliaires des ordinateurs. Cette ligne conductrice privilégiée, en même temps qu'elle nous autorisera à repérer leurs mutations les plus essentielles, nous permettra ainsi de retracer leur histoire.

2.2. Des calculateurs mécaniques à l'ordinateur : la longue marche vers la machine univers.

2.2.1. Différences et proximités entre contrôle par séquence et contrôle par programme.

Dans un article remarquable³⁸¹ qu'il a jadis consacré à la notion de « programme », Jean-Pierre Sérés avait dégagé acception ancienne et usages nouveaux de ce concept.

³⁸¹ In [Tinland et al., 1994], pp. 133–148.

Procédant ainsi du traditionnel ou de l'ancien vers l'actuel, cet auteur rendait compte des glissements sémantiques qu'avait historiquement subi le terme en même temps qu'il repérait sa portée opératoire et son caractère contemporains résolument transversaux, transdisciplinaires (*mutatis mutandis* on retrouvera la notion de programme en informatique bien entendu, mais également en biologie moléculaire, en éthologie, en embryologie, ou encore dans le domaine des sciences cognitives par exemple).

Originellement le « programme » - du grec πρόγραμμα, de πρό, avant, et γράμμα, chose écrite – renvoie à quelque chose qui ne possède au final que très peu d'éléments en commun avec ce que l'on entend aujourd'hui ordinairement lorsque ce substantif se trouve employé dans le domaine de l'informatique. Ainsi, traditionnellement - Jean-Pierre Sérís examine ici le mot tel qu'il était utilisé au milieu du 19^{ème} siècle - « programme » est synonyme de placard écrit, d'affiche, de plaquette, de brochure, d'annonce ou d'avis. Au départ, il prend donc la forme d'un dispositif scriptural relativement élémentaire – parfois affiché, parfois distribué, parfois lu en public – énonçant méthodiquement mais compendieusement un certain nombre d'intentions encore à venir dont il conviendra que l'assistance touchée prenne acte pour éventuellement agir ensuite en conséquence (e.g. se rendre à un spectacle au moment voulu). Dans cette perspective, le programme – qu'il relève du reste des ordres pédagogique ou artistique – correspond à une intentionnalité déclarée qui se trouve saisie pour l'occasion dans un support physique aisément consultable dont la fonction consiste précisément à la matérialiser pour ainsi en faciliter la diffusion dans l'espace social. Entièrement orienté vers un futur souvent proche, le programme vise donc à informer des individus d'un évènement qui se produira généralement sous peu en exposant de manière détaillée, mais jamais exhaustive, ses traits les plus saillants, les plus significatifs et, quelquefois aussi, les plus racoleurs (dès lors que l'on considérera vraiment le programme dans son détail, nous rappelle J.-P. Sérís, on parlera cependant plus volontiers de « projet », de « dessein » ou bien de « plan »). Dans tous les cas, le programme permet de prendre rendez-vous, de rallier, d'avertir et de préparer à ce qui va advenir en spécifiant à la fois le lieu, le moment et les intervenants. Dans tous les cas également, c'est d'une parole humaine dont il est toujours question ici: par l'entremise du programme, de façon anticipée et pour des raisons qui peuvent être multiples, des hommes rendent succinctement compte de leurs projets à d'autres hommes, cherchant par là même à les mobiliser ou, tout au moins, à attirer leur attention. Le programme, donc, n'est nullement directiviste. Il n'ordonne pas, ne dicte pas, mais se contente plutôt de présenter et de proposer (le programme scolaire présente mais il impose aussi). Il ne s'adresse donc pas à des exécutants, à de simples interprètes – ce n'est pas

une liste ordonnée de strictes consignes qui devraient être rigoureusement respectées en vue de réaliser pas à pas une tâche bien spécifique - mais concerne plutôt des auditeurs ou des spectateurs toujours laissés libres de faire un choix. En ce sens, le programme n'oblige ni ne contraint. Plutôt, il présente, annonce.

2.2.2. Automates philosophiques et automates récréatifs.

Il est aisé de constater que l'on se trouve là fort éloignés du sens contemporain de la notion de « programme ». Ainsi que ne manque pas de le souligner J.-P. Sérès, il faudra en réalité attendre la seconde moitié des années trente, et avec celle-ci la publication des travaux logico-mathématiques décisifs réalisés par Alan Mathison Turing sur les problèmes de la calculabilité et de la décidabilité, pour voir enfin le concept commencer à s'unifier et à se formaliser, autrement dit pour le voir se fixer peu à peu dans son sens dominant actuel, c'est-à-dire dans sa signification purement algorithmique. C'est donc Turing, par ailleurs auteur en 1950 d'un *Programmers' Handbook for the Manchester Electronic Computer*³⁸² qui introduit et systématise l'emploi du terme « programme » tel que nous le connaissons aujourd'hui. Pourtant, si l'on se réfère à la vieille tradition de l'automatisme et à l'âge d'or qu'il connut au 18^{ème} siècle, il semble que la notion de programme, au sens d'une méthode rigoureuse permettant d'engendrer de façon strictement déterminée un mouvement ou un ensemble de mouvements dans un artefact mécanique en vue de la réalisation d'une tâche spécifique, soit bien plus ancienne que cela. Héritiers de la conception mécaniste du vivant ouverte au 17^{ème} siècle par la philosophie dualiste de René Descartes ou de celle, radicalisation « sacrilège » de la première, du médecin philosophe Julien Offroy de la Mettrie (l'esprit étant ici réduit à un épiphénomène de la complexe machinerie organique du corps, c'est l'homme dans son entièreté qui peut désormais être pensé et expliqué grâce au modèle mécanique), les horlogers biomécaniciens Jacques de Vaucanson, Pierre et Henri-Louis Jacquet-Droz, Friedrich von Knauss, Pierre Kintzing, l'abbé Mical et le baron Wolfgang von Kempelen comptèrent sûrement parmi les plus éminents représentants de ce proluxe courant automatique dont l'enjeu véritable, au delà du projet visant à la conception d'automates dédiés à la distraction des princes et des foules, se dédoublait sur le plan philosophique. En effet « *dans l'automate, il s'agit tout autant de réduire la vie au mécanique que d'insuffler la vie à la machine*³⁸³ ». Ce

³⁸² C'est-à-dire d'un manuel destiné au programmeur du Ferranti Mark I.

³⁸³ In [Chazal, 1995], p. 31.

qui donc, fondamentalement, se trouve mis en jeu au cœur de la « *machine mouvante*³⁸⁴ » (qu'elle ait été effectivement réalisée comme chez Vaucanson ou qu'elle soit pure construction intellectuelle, pur dispositif analogique, comme dans le *Traité de l'Homme* de Descartes), ce qui commande son élaboration, qui en est condition de possibilité ou principe matriciel, est une conception philosophique du corporel et du mécanique qui tend à les inscrire l'un et l'autre dans une dynamique presque vertigineuse de renvois, d'analogies, de reflets, de miroitements, bref d'incessantes oscillations dont la fonction première est de permettre la *compréhension du corps*. Dans ce face à face troublant, ce mouvement de va-et-vient qui différencie en même temps qu'il assimile sans jamais confondre, ce sont deux réalités distinctes qui, continûment, se répondent et s'éclairent mutuellement: le corps bien sûr, mais également son double mécanique, l'automate (le terme, rappelons-le, vient du grec αὐτόματος : qui agit de soi-même, spontanément ou encore, selon André Lalande : appareil imitant par un mécanisme intérieur les mouvements d'un être vivant). Entre les deux, la frontière qui sépare et accole semble balancer en permanence entre persistance et effacement, entre maintien de la netteté et dilution dans le flou. Dans son *Traité de l'Homme*, Descartes part ainsi du corps (« *Je suppose que le corps n'est autre chose qu'une statue ou machine de terre...* »), des connaissances anatomiques qui étaient celles de son époque (ne conseille-t-il pas à ses lecteurs de se référer à « *quelque savant anatomiste* » ?), pour repenser complètement la machine. Se voit alors opérée une reconstruction de celle-ci, représentation mécanique fictive du corps dont l'élaboration est dictée justement par l'anatomie humaine. C'est cette image technique qui se trouve utilisée en retour par le philosophe pour rendre compte de la complexion du corps, du mouvement de ses multiples parties. Ainsi que l'a écrit Gérard Chazal « *L'objet réel [le corps] explique le reflet [la machine] qui permet de comprendre l'objet réel*³⁸⁵ ». Les parties des machines des fontaines apparaissent alors comme autant de puissantes images explicatives permettant de rendre compte du fonctionnement des organes corporels correspondants. Les mouvements de l'horloge ou ceux du moulin, machines éventuellement mues par l'eau, expliquent quant à eux les actions ordinaires du corps qui sont déterminées par le mouvement des esprits animaux (e.g. la respiration). Veines, veinules, artères et nerfs sont donc comparés à des tuyaux, les esprits animaux à de l'eau, le cœur à une source, les tendons et les muscles à des ressorts et des engins divers. Ainsi :

³⁸⁴ L'expression est de René Descartes, in [Descartes, 1966], p. 78.

³⁸⁵ In [Chazal, 1995], p. 34.

«... l'on peut fort bien comparer les nerfs de la machine que je vous décris aux tuyaux des machines de ces fontaines; ses muscles et ses tendons, aux autres divers engins et ressorts qui servent à les mouvoir; ses esprits animaux, à l'eau qui les remue, dont le cœur est la source, et les concavités du cerveau sont les regards. De plus, la respiration, et autres telles actions qui lui sont naturelles et ordinaires, et qui dépendent du cours des esprits, sont comme les mouvements d'une horloge, ou d'un moulin, que le cours ordinaire de l'eau peut rendre continus ».

La machine recomposée, le jeu de ses parties, mais aussi les lois mécaniques qui en commandent l'opération permettent ainsi de dire et de comprendre l'agencement et la marche du corps : réductibilité absolue de ce dernier aux figures de la *res extensa* et du mouvement. De va-et-vient en va-et-vient, de confrontations en comparaisons le corps (mais non pas l'homme !), finit par se confondre avec la machine. Organisme machine et machine « corporelle » : on finirait presque par ne plus savoir très bien à quoi l'on a affaire. L'automate comme droite asymptote de cette courbe que serait le corps en somme... La machine, pourtant, n'est pas le corps pas plus que le corps n'est la machine. Ce sont là deux choses qui demeurent bien séparées en dépit de leur contiguïté extrême ; en se faisant face, en se rapprochant, elles ne se perdent jamais l'une dans l'autre. Comme le rappelle G. Chazal, « C'est aux mouvements représentatifs des fonctions que Descartes s'intéresse. Ce qu'il faut expliquer c'est une fonction qui s'exprime dans des mouvements³⁸⁶ ». La démarche cartésienne se situe donc fondamentalement sur le plan fonctionnel. Le tuyau et l'artère veineuse ne sont pas une seule et même chose, pas plus d'ailleurs que ne le sont le muscle et le ressort ou encore les regards de la fontaine et les circonvolutions cérébrales, mais la fonction qu'ils réalisent les uns et les autres, dans l'empire du vivant ou celui du machinal, est la même (en outre les formes rencontrées de part et d'autre sont fréquemment similaires puisque la fonction accomplie par un organe commande sa conformation). C'est l'identité de la fonction que supportent l'objet technique et l'organe corporel qui autorise par conséquent leur étroite juxtaposition, leur superposition, tandis que ce sont les mêmes lois physiques qui permettent de rendre compte de leur fonctionnement et de leurs mouvements. Le corps de l'homme – création de l'*artifex maximus*, Dieu - se trouve ainsi identifié à une machine – créature ou produit de l'art humain - même si l'un et l'autre, précisément en raison de

³⁸⁶ In [Chazal, 1995], p. 36.

l'incommensurabilité de la perfection de leurs créateurs respectifs, participent nécessairement de deux ordres de complexité absolument différents et disproportionnés:

« *Ce qui ne semblera nullement étrange à ceux qui, sachant combien de divers automates, ou machines mouvantes, l'industrie des hommes peut faire, sans y employer que fort peu de pièces, à comparaison de la grande multitude des os, des muscles, des nerfs, des artères, des veines et de toutes les autres parties qui sont dans le corps de chaque animal, considéreront ce corps comme une machine, qui, ayant été faite des mains de Dieu, est incomparablement mieux ordonnée, et a en soi des mouvements plus admirables, qu'aucune de celles qui peuvent être inventées par les hommes*³⁸⁷ ».

Cette notion qu'il existe une différence de perfection ou de degré d'achèvement incomparables entre l'automate naturel (d'origine divine), et l'automate artificiel (produit de l'art humain), est par ailleurs quelque chose que l'on retrouve exprimé avec plus de force encore chez Leibniz. Au paragraphe 64 de sa *Monadologie*, celui-ci écrira en effet: « *Ainsi chaque corps organique d'un vivant est une espèce de machine divine ou d'automate naturel qui surpasse infiniment tous les automates artificiels* ». On a donc ici affaire à deux genres d'automates qui diffèrent fondamentalement l'un de l'autre. La différence essentielle qui peut être relevée entre organisme vivant et machine artificielle se trouve en effet pensée sur le mode du surpassement infini : le corps vivant, bien que machine, est toujours infiniment plus que l'automate artificiel. Plus même, il est cet infini, chacune de ses parties mécaniques étant elle-même une machine, et ainsi de suite, récursivement et à l'infini. Le corps de l'Homme, bien qu'automate à sa manière, est ainsi habité par l'infini divin tandis que l'automate, entité forcément imparfaite, se trouve irrémédiablement voué à la finitude. Pour Descartes, et nonobstant cet écart de complexité formidable qui sépare irrémédiablement organisme humain et organisation artificielle, les parties du corps de l'homme et celles de la machine, ou plutôt les fonctions spécifiques qu'elles remplissent de part et d'autre ainsi que les principes légaux qui régissent leur fonctionnement, sont identiques. Autrement dit, pour lui, le corps est une machine (rappelons que les passions elles aussi seront expliquées par le biais du mécanisme). Le philosophe n'étendra pourtant pas le royaume du mécanique à l'Homme dans son entier. Si la machine et l'animal (le « *singe ou quelque animal sans raison*³⁸⁸ .»), sont pareils, c'est précisément parce que les animaux, privés d'âme, sont des machines. Chez

³⁸⁷ In [Descartes, 1966], pp. 78-79. Notons que dans ce passage le terme « automate » est souligné par Descartes.

³⁸⁸ In [Descartes, 1966], p. 79.

l'Homme en revanche seul le corps se résume dans l'automate. Et Descartes d'énoncer deux moyens très certains, selon ses termes propres, qui permettent de faire assurément le départ entre les uns et les autres, les machines et les hommes d'une part mais également les animaux et les hommes : ce sont le langage, qui permet d'exprimer les pensées, et la raison, instrument universel mis en l'Homme par la Divinité. La pensée cartésienne assigne donc de manière définitive un seuil indépassable au pouvoir de l'image mécanique. En même temps qu'elle l'instaure, qu'elle en fait usage, elle la borne. Le corps dit la machine, la machine dit le corps, mais, pour puissant que puisse se révéler ce discours, il ne peut qu'échouer à rendre compte ici parfaitement de la totalité de l'Homme. Le dualisme cartésien, du fait qu'il distingue entre *res extensa* et *res cogitans* tout en les plaçant dans un rapport d'union fort complexe, interdit cela. Ce faisant bien sûr, il place l'âme hors de portée (il la sauve), de l'emprise mécaniste. Un siècle ou presque après Descartes, le médecin philosophe français Julien Offroy de La Mettrie franchira cette limite. Dans son *Homme Machine*, il déclarera en effet : « *Tout l'homme devra s'expliquer par le mécanisme des corps car l'homme est une machine* ». Avec la philosophie de La Mettrie c'est désormais l'Homme, et non plus seulement son corps, qui pourra se voir expliqué grâce au paradigme mécaniste. En éliminant l'âme sans guère de ménagements (« *l'âme n'est qu'un vain terme* »), en la réduisant à un simple phénomène illusoire généré par l'action imperceptible de parties mécaniques du corps particulièrement subtiles, La Mettrie inaugure ainsi le réductionnisme mécaniste.

Délaissions à présent « *la machine du corps humain*³⁸⁹ » de Descartes et l'homme machine de La Mettrie pour nous intéresser à l'automate vaucansonien du 18^{ème} siècle – machine réelle *simulant* certaines fonctions de l'homme ou de l'animal - et tout particulièrement à la façon dont était assuré son fonctionnement. Compris en ce sens (rappelons par exemple que le thermostat qui plus prosaïquement équipe la plupart de nos demeures participe aussi de cette espèce technique), l'automate est un dispositif mécanique qui cherche à imiter, grâce à un mécanisme intérieur, les mouvements et les fonctions (intellectuelles, physiologiques), d'un être vivant (humain ou animal). On s'efforcera de l'appréhender au moyen des catégories du visible et de l'invisible, de la transparence et de l'opacité, de celles, encore, de l'extériorité et de l'intériorité, toutes notions dont il nous semble ici que l'emploi peut se révéler particulièrement fécond.

³⁸⁹ L'expression « *machinamentum humani corporis* » se trouve notamment employée dans les *Méditations Métaphysiques* (cf. AT XI A, p.67 ou P.U.F. Quadrige, p.129.) et dans le *Traité des Passions* (cf. AT, XI, p. 331).

L'automate vaucansonien, bien que dispositif expérimental originalement conçu en vue de simuler des processus biologiques (digestion, respiration), ou certaines prouesses intellectuelles³⁹⁰ (comme jouer de la musique), est surtout connu en tant que *récréation mécanico-physique* (nous empruntons l'expression à François Dagognet), consacrée au divertissement des Princes, de leur cour, ou de la population. Généralement présenté au public installé sur un socle, il est ce qui se trouve immédiatement offert à la vue du spectateur. Il est là pour susciter son émerveillement, éveiller sa curiosité ou encore créer en lui une certaine forme de trouble. Bien sûr dans ce qui est vu subsiste toujours une part d'imperceptible : la délicate épaisseur des vernis ou des cires carnés qui couvrent le visage et les mains, les vêtements ou les draperies qui habillent parfaitement le « corps », en même temps qu'ils sont là pour amplifier l'identité de l'automate avec le vivant, servent à escamoter les trop nombreuses dissimilitudes (les indices), qui auraient bien vite fait de trahir sa nature mécanique. Double fonction donc pour ces « accessoires essentiels » : renforcer l'effet d'identité entre l'imité et l'imitateur et surtout dissimuler la machinerie, les rouages, les armatures, les poids, les cames, bref tout ce qui en lui est purement machinal... Pourtant le spectateur n'est pas dupe. Il sait d'emblée à quoi il a affaire. C'est même ce pourquoi il se montre volontiers prêt à déboursier quelques espèces sonnantes et trébuchantes³⁹¹ : il s'agit d'un automate, d'une machine, d'un simulacre mécanique du vivant et non du vivant lui-même (quel intérêt y aurait-il d'ailleurs à exhiber de la sorte un canard ou un musicien de niveau médiocre ?). Mais la superbe de ces automates, la précision avec laquelle ils accomplissent leurs fonctions, la mise en scène savamment orchestrée, les parures et les ornements minutieusement réalisés et ajustés font parfois que la certitude première se dissipe

³⁹⁰ On songera par exemple à *L'écrivain*, au *Dessinateur* et à *La joueuse de clavecin* de Pierre et Henri-Louis Jacquet-Droz. On pensera aussi à la machine parlante de Wolfgang von Kempelen, (lointaine descendante des *neurospates* antiques, de la machine d'Albert Le Grand – qui fut détruite par Saint Thomas d'Aquin - et de la tête parlante de Roger Bacon), ainsi qu'au célèbre *Turc joueur d'échecs*. Ce dernier automate, que von Kempelen qualifiait peut-être par malice de « bagatelle », inspira à Karl Gottlieb von Windisch la réflexion suivante dans son article de 1783 intitulé *la Raison inanimée* : « *L'automate de M. Kempelen est à l'esprit ... ce que le Joueur de flûte de Vaucanson est à l'oreille* ». A cette époque bien sûr la supercherie n'avait pas encore été découverte. Mais on sait quelle perplexité anima Edgar Allan Poe au 19^{ème} siècle lorsqu'il écrivit sur le *Joueur d'échecs*. Si jamais il ne douta des ingénieux automates de Jacques de Vaucanson, ni même du *Difference Engine* de Babbage (ce sont là des automates qui réalisent toutes sortes de processus fixes et bien déterminés), il n'en fut pas de même avec la machine conçue par l'aristocrate hongrois. Pour E. A. Poe, et bien que les règles de ce jeu soient elles aussi parfaitement fixes et déterminées, le fait de jouer aux échecs impliquait que l'on fasse preuve d'*adaptation* (comme lorsque l'on réagit aux mouvements de l'adversaire ou que l'on anticipe ses coups futurs), une capacité intellectuelle qu'il estimait justement être parfaitement hors de portée de la machine...

³⁹¹ La construction du *Joueur de flûte traversière* commença en 1733 et ne fut terminée que quatre ans plus tard. L'année suivante, M. de Vaucanson le présenta pour la première fois au public parisien dans le grand salon de l'Hôtel de Longueville. L'exposition devait remporter un vif succès en dépit du coût élevé qui avait été fixé pour le prix d'entrée.

rapidement et que le doute s'insinue à sa place : se pourrait-il alors que la machine soit vivante ? Se pourrait-il que le vivant ne soit que machine ? Autant de questions incroyablement anciennes – elles sont déjà présentes chez Homère³⁹² – que les projets d'intelligence artificielle et de vie artificielle reprendront à leur compte deux siècles plus tard en les renouvelant et en étendant spectaculairement leur portée. Quoiqu'il en soit, pour l'observateur non averti, l'homme du commun, c'est dans la dimension du dehors, dans l'extériorité immédiatement perceptible de l'automate que l'essentiel se joue. C'est là que l'enchantement opère. Il se montre ainsi fasciné par le spectacle du *Canard*³⁹³ en train d'ingérer des grains de blé (puis de déféquer après les avoir « digérés »), ou encore par le jeu des doigts du petit berger (ou « faune »), qui courent de façon experte sur toute la longueur de la flûte traversière. Tout le reste, à la limite, n'est que décorum ou faire-valoir (l'artefact en mouvement repousse ainsi le *piédestal* qui le supporte et le met en valeur à l'arrière-plan de la scène). Nous savons bien pourtant que ce qui compte véritablement ici est ce qui se trouve souvent ignoré par le regard, délaissé par l'attention. Le socle sur lequel il repose et l'intérieur de l'automate abritent ainsi son « secret » le plus fondamental : la machinerie complexe qui autorise son fonctionnement, qui permet et coordonne sa stupéfiante variété de mouvements. A ce propos, il peut être intéressant d'examiner la manière dont certains grands automaticiens du 18^{ème} siècle ont pu jouer avec cela. Comment, pour exprimer cela autrement, transparence et opacité ont été parfois articulées l'une à l'autre et utilisées avec une virtuosité certaine afin de dissimuler une supercherie. Ainsi du *Canard* « digérant ». Cette merveilleuse réalisation, due comme bien d'autres à celui que Voltaire devait qualifier de « rival de Prométhée », le « hardi » Jacques de Vaucanson, comportait un nombre impressionnant de pièces (ainsi que le rappelle Philippe Breton³⁹⁴, chacune de ses ailes comportait déjà plus de 400 parties articulées). Ce canard artificiel principalement constitué de pièces faites de cuivre était capable d'une gamme de comportements (fonctions), étonnamment étendue : il pouvait boire, manger, pousser son cri (cancaner), barboter, et surtout - ce qui devait assurer sa retentissante renommée tant en France qu'à l'étranger - *digérer*.

³⁹² Par exemple cet extrait bien connu du Chant XVIII de l'Iliade : « *Les soufflets, il [Héphaïstos] les mit loin du feu ; et tous les outils, dans une caisse d'argent, il les rassembla, ses instruments de travail. Avec une éponge, il essuya sa figure, ses mains, son cou fort, sa poitrine velue. Il revêtit une tunique, prit un gros sceptre, et marcha vers la route en boitant. Des servantes s'empressaient pour soutenir le Prince, toutes d'or mais semblantes à de jeunes vivantes ; elles ont un esprit dans leur diaphragme, elles ont la voix, la force et les immortels leur ont appris à agir.* » In Homère, *L'Iliade*, Paris, Garnier Flammarion, 1965, pp. 316-317.

³⁹³ Rappelons que M. De Vaucanson construisit deux canards mécaniques. Le premier était un canard « volant », capable de barboter dans l'eau, le second, de loin le plus célèbre, était un canard « digérant ».

³⁹⁴ In [Breton, 1990], p. 28.

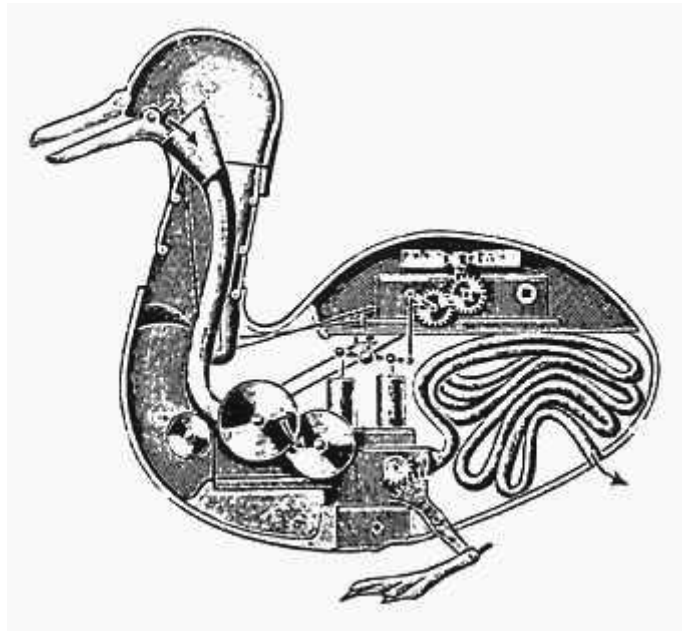


Fig. 3 : présentation du mécanisme du *Canard* de Jacques de Vaucanson³⁹⁵. L'autre partie du mécanisme était dissimulée à l'intérieur du bloc parallélépipédique sur lequel il reposait.

Concernant la fonction « digestive » qu'était en mesure d'accomplir son *Canard*, Jacques De Vaucanson devait écrire dans sa *Lettre à M. l'Abbé Desfontaines* :

« Je ne prétends pas donner cette digestion pour une digestion parfaite, capable de faire du sang et des parties nourricières pour l'entretien de l'animal; on auroit mauvaise grâce, je crois, à me faire ce reproche. Je ne prétends qu'imiter la mécanique de cette action en trois choses, qui sont : 1° d'avalier le grain; 2° de le macérer, cuire ou dissoudre; 3° de le faire sortir dans un changement sensible³⁹⁶. ».

Ainsi rejoignait-il sur le plan de la simulation technique (et non plus sur celui de l'analogie pure), les conceptions cartésienne et leibnizienne quant à l'incommensurable supériorité des automates naturels sur les automates artificiels. Le degré de complexité et de perfection qui caractérise les vivants est en effet tel que la prétention à les reproduire exactement ne serait être considérée autrement que comme pure chimère. Bien qu'il ait pu écrire dans la même missive que les mécanismes de la digestion du *Canard* étaient « *copiés d'après nature* », tout nous porte à croire que M. de Vaucanson, de son propre aveu, n'aspirait

³⁹⁵ Reproduction Alain Doyère. C.N.A.M.

³⁹⁶ Cette lettre est notamment reproduite in Alfred Chapuis et Edouard Gélis, *Le Monde des Automates : étude historique et technique.*, Genève, Ed. Slatkine, Tome 2, 1984, pp. 149-151.

qu'à imiter au mieux, et non à dupliquer exactement. Il ne cherchait donc nullement à copier fidèlement l'anatidé (il aurait fallu encore inventer pour cela quelque dispositif extraordinairement complexe capable de «*faire du sang et des parties nourricières pour l'entretien de l'animal*»), mais son dessein consistait plutôt à en imiter de la meilleure des façons possibles certaines des fonctions primordiales (en l'occurrence l'ingestion, la digestion et la défécation). Sur ce point, et à moins de faire preuve de «*mauvaise grâce*», les éventuels reproches qui auraient pu lui être adressés n'avaient par conséquent pas lieu d'être puisque d'emblée parfaitement infondés... Pour sincère et modeste que nous puissions tenir cette confession, il n'empêche qu'elle nous semble masquer une mystification particulièrement habile (par ailleurs largement «*compensée*» par le caractère autrement remarquable de cet automate). Il faut savoir qu'à l'inverse de certains automates, le mécanisme du *Canard* était intégralement visible du public. En 1741, Rigollay de Juvigny pu ainsi faire la description suivante:

« Il était permis à toute personne de regarder dans l'intérieur du piédestal où étaient toutes les roues, tous les leviers et tous les fils qui communiquaient par les jambes de l'animal à toutes les différentes parties de son corps, qui était aussi à découvert. Un poids, comme dans le flûteur, était la seule et unique puissance qui mettait et entretenait tout le mouvement ».

Jacques de Vaucanson, semble-t-il, n'avait strictement rien à cacher. Le fait même que tout un chacun se trouvât entièrement libre de contempler à loisir les entrailles métalliques du *Canard* et d'examiner les nombreux effecteurs (poids moteurs, cames), qu'abritait son soubassement pendant qu'il accomplissait ses diverses fonctions plaidait précisément en faveur de cela. Il n'y avait donc plus de boîte noire, plus d'obscur ou de dissimulé qui repousserait le regard et contribuerait par là même à entretenir une quelconque forme de suspicion : tout étant devenu transparent, il n'était plus possible de subodorer la tricherie. En réalité – et c'était là pour ainsi dire que résidait véritablement la «*tricherie*» de Vaucanson – la boîte noire entièrement ouverte dissimulait en son sein une autre boîte noire, parfaitement close celle-là, qui correspondait justement au mécanisme permettant au *Canard* de «*digérer*». La constante réticence dont faisait toujours montre le mécanicien dès lors qu'il s'agissait d'expliquer précisément comment son automate digérait commença à semer un doute croissant parmi les esprits critiques de l'époque et, en 1783, la supercherie fut partiellement découverte. Le *Canard*, c'est un fait, ingérait des grains de blé (mélangés à de

l'eau), tout de même que par la suite il déféquait. Cependant il n'existait aucun lien direct, aucune liaison mécanique – autrement dit aucun « automatisme digérant », de quelque nature qu'il pu être – qui permit d'assurer la transition (et donc la transformation de l'aliment absorbé en matière fécale), entre ces deux fonctions. L'œsophage du volatile automate n'étant pas relié à son côlon, la bouillie nauséabonde qu'il rendait par les voies naturelles n'avait par conséquent strictement rien à voir avec la nourriture qu'il avait ingurgitée antérieurement (entre les deux, point de minuscule laboratoire chimique !). Pour reprendre la formule nettement plus actuelle de Jessica Riskin, dans le *Canard* de Vaucanson, « *l'input et l'output n'étaient aucunement reliés* ³⁹⁷ ». Ce fut finalement Robert Houdin, le légendaire prestidigitateur et mécanicien, qui découvrit le pot aux roses lorsqu'il dû restaurer le *Canard* à l'occasion de l'exposition internationale qui se tint à Paris en 1844. En réalité, la bouillie (celle-ci était composée de mie de pain à laquelle on ajoutait une substance colorante verte), était entièrement préparée à l'avance puis poussée sur un plateau d'argent par une petite pompe au moment opportun. Dans l'intervalle, le mélange eau/grains que l'automate avait ingéré avait été forcé vers un petit réservoir escamoté qui était vidangé de temps en temps. La fonction qui avait assuré à cet animal automate sa renommée formidable n'était donc qu'illusion. On ne saurait pourtant jurer absolument de la véracité du récit que fit R. Houdin de son expérience. En effet, à l'époque où il écrivait, circulaient déjà en Europe nombre de répliques des automates de Vaucanson. Aucune preuve n'a été découverte à ce jour qui puisse garantir absolument que l'automate qu'il restaura en 1844 était le véritable *Canard*. Bien malheureusement, celui-ci fut entièrement détruit durant l'incendie d'un musée en Russie à la fin du 19^{ème} siècle. Le mystère, ou plutôt le doute, subsiste donc encore quant à l'authenticité de la fonction digestive par dissolution (et non trituration), qu'était supposément capable d'opérer cet automate. Quoiqu'il en soit tout le reste (les ailes, le cou, la queue, les plumes et leurs mouvements respectifs), était bien réel et la réalisation en était absolument admirable. Que l'on consente ou non à admettre la thèse de la fraude, il nous est nécessaire de nous souvenir des précisions formulées par M. de Vaucanson à propos de son *Canard* pour nous trouver véritablement en mesure de comprendre la réelle portée de cet automate et saisir parfaitement ce qu'il pouvait y avoir en lui de profondément paradoxal. Le célèbre mécanicien grenoblois, on s'en souvient, devait déclarer dans sa lettre à l'Abbé Desfontaines qu'il ne prétendait nullement donner la digestion du *Canard* pour quelque chose de parfait. Si le *Canard* automate imitait bien le palmipède vivant en certaines de ses fonctions organiques

³⁹⁷ Jessica Riskin, « Le canard, l'homme et le robot », in *La Recherche*, numéro spécial *Les nouveaux robots, Autonomie – Neurones – Emotions – Evolution – Socialisation*, n°350, février 2002, pp. 36-40.

essentielles, de l'aveu même de son concepteur, il ne le reproduisait qu'imparfaitement. Pour autant, il ne s'agissait pas non plus d'un simulacre grossier. La machine était bien trop élaborée et bien trop fidèle à son modèle vivant pour qu'elle puisse se voir qualifier de la sorte. Impuissance et aptitude mêlées – et reconnues comme telles par Vaucanson - à exprimer le vivant grâce au mécanique et incohérence ou irrationalité fondamentalement inhérente à l'automate : si le vivant n'est que mécanique, le mécanique, lorsqu'il s'empare du vivant pour le simuler, échoue pourtant à le dire complètement... D'une certaine façon, l'automate ne fait ici qu'effleurer le vivant. L'image technique ne parvient jamais à être exhaustive car il est toujours quelque partie ou fonction de l'organisme simulé qu'elle se révèle totalement incapable d'illuminer et de saisir pour la reproduire. Retournement contre elle-même d'une démarche scientifique soucieuse d'expliquer le vivant par la médiation de la technique (d'une technique théorisée chez Descartes), qui, spectatrice de son propre semi échec, en vient bien involontairement à conforter dans leurs thèses dispendieuses, odieux paradoxe, les partisans des explications magiques ou vitalistes. Après tout l'automate ne constitue-t-il pas la preuve évidente que le vivant, s'il est mécanique par certains de ses aspects, est bien plus que cela ? Ne signifie-t-il pas explicitement que le vivant n'est pas (entièrement) réductible à de la matière, fut-elle subtilement organisée ? Ainsi que l'a très justement remarqué Gérard Chazal, on se trouve alors confronté à deux réactions possibles, soit deux philosophies absolument inconciliables :

« Ou l'essentiel est une âme postulée dont à jamais la mécanique est privée ; dans tout automatisme il y a alors une singerie, un déficit d'être essentiel. Ou il faut se résoudre à la dernière humiliation : n'être qu'une machine qui plus est encore incapable de décrire en terme physiques la totalité de son fonctionnement³⁹⁸. »

. En somme, il s'agit de choisir entre l'un des termes de la disjonction exclusive suivante : résister par tous les moyens afin de parvenir à sauver l'âme du cauchemar réductionniste *ou* bien alors accepter la malédiction d'une finitude écrasante qui nous interdit à jamais toute forme d'espoir et d'échappatoire. Dilemme cornélien s'il en est, bien entendu. Dans le premier cas, et pour peu qu'il tente d'outrepasser ses limites propres, le mythe religieux ou le récit fantastique romantique le rappelleront à l'ordre : en effet, là où l'homme « joue » à être Dieu, il ne manque jamais de trouver sur son chemin le Golem, la créature du

³⁹⁸ In [Von Neumann, 1958], Ed. Française de 1996, *La pensée et les machines*, préface de G. Chazal, p. 23.

Dr. Frankenstein, Olympia ou miss Hadaly Habal, monstruosités artificielles qui toutes le conduisent invariablement à sa perte ou à celle de ceux qu'il aime. Dans l'autre, c'est la perspective de l'horreur génétique huxleyenne qui s'en chargera peut-être. Cette interrogation essentielle sera on le sait reprise et renouvelée au 20^{ème} par des disciplines telles que l'intelligence artificielle, la vie artificielle, la neurologie, les sciences cognitives ou encore la génétique (où l'on retrouve par ailleurs la notion de programme). Au moyen de nouveaux outils d'investigation particulièrement puissants et toujours plus aptes à rendre transparent le vivant pour en déceler les secrets (ordinateur, I.R.M.,...), il s'agira alors d'apporter la preuve – directe ou indirecte – que le corps et l'esprit ne sont que mécaniques extraordinairement complexes et qu'en tant que tels, ils sont susceptibles d'être modélisés et simulés parfaitement au moyen des nouveaux automates électroniques (afin d'en reproduire le fonctionnement ou de tenter de le comprendre). Entre les tenants des divers courants de cette conception mécaniste qui, pour la résumer grossièrement ici, tend à réduire la conscience à un phénomène résultant de l'organisation de la matière (on pensera par exemple à Changeux, Edelman, Dennett, Churchland, Simon, McCarthy, Minsky, aux cybernéticiens, etc.), et ses détracteurs les plus féroces (comme Dreyfus, Searle, Weizenbaum...), s'instaurera alors un débat philosophique virulent qui n'aura de cesse de se nourrir des recherches poursuivies notamment dans les champs du langage, de la perception, de la classification, de la représentation des connaissances, de l'apprentissage. Tel était, nous le croyons, l'enjeu philosophique véritable dont était porteur le *Canard* de Jacques de Vaucanson.

Autre automate célèbre, autre supercherie, nettement plus fameuse celle-là: le *Turc joueur d'échecs*, fabriqué en 1769 par le baron et ingénieur hongrois Wolfgang von Kempelen. Avec le *Turc*, il ne s'agissait plus de simuler mécaniquement certaines des fonctions physiologiques propres à tel animal ou à tel autre mais bel et bien d'imiter l'homme - toujours avec les mêmes moyens mécaniques - dans l'effectuation d'une de ses tâches intellectuelles les plus nobles et les plus prisées (et sûrement aussi les plus significatives de son intelligence, tout du moins à l'époque³⁹⁹) : jouer aux échecs. La simulation du vivant subissait ainsi un déplacement radical qui, de l'ordre organique, l'installait désormais dans celui des choses de l'esprit : réalisation bien concrète, en l'espèce d'une machinerie ludique à figure humaine et experte au roi des jeux, de la conception « panmécaniste » qui était celle de La Mettrie. Non seulement cet automate étonnant était capable d'affronter des joueurs humains (au cours de sa carrière, qui fut assez longue, il battit notamment Charles Babbage,

³⁹⁹ Rappelons qu'en 1997 le supercalculateur d'I.B.M. *Deeper Blue* – un RS/6000P- a défait Gary Kasparov (alors détenteur du titre mondial).

Napoléon, et Frédéric le Grand), mais, prouesse supplémentaire, il était en mesure de corriger leurs erreurs que ses adversaires pouvaient commettre en cours de partie (une fonction que l'on retrouve du reste quasi systématiquement à titre d'option sur les échiquiers électroniques et les logiciels de jeu d'échecs actuels). Depuis longtemps déjà, on connaît les dessous de l'histoire, on sait les raisons véritables des incroyables exploits du « musulman de fer » : de talentueux joueurs d'échecs⁴⁰⁰, tous choisis pour leur petite taille, étaient habilement dissimulés dans le socle de l'automate. S'il existait effectivement une machinerie capable de mouvement logée dans le socle de l'échiquier (laquelle, comme le rappelle Robert Houdin dans ses *Révélations*, était visible à l'invitation du mécanicien avant que ne débute la partie), celle-ci ne commandait strictement rien, elle était totalement factice et, trompe l'œil particulièrement sophistiqué, ne faisait que tourner « à vide » pour mieux entretenir l'illusion. Tactique pour le moins subtile qui usait à l'excès de la visibilité trafiquée, de la transparence dénaturée, pour mieux prévenir ou étouffer à la naissance de possibles soupçons. Si ce n'était justement ce dispositif de façade alambiqué, l'automate joueur d'échecs de von Kempelen ne possédait strictement rien qui fut mécanique. Ce n'était pas un automate mais un simulacre d'automate agi secrètement par l'homme. Sans doute dans le but de conquérir la gloriole et son auréole, l'automate était ainsi devenu l'instrument ostensible et privilégié par l'entremise duquel l'homme s'efforçait de simuler clandestinement ce qui en lui se trouvait de plus noble : l'intelligence (ou au moins une de ses manifestations). Au mieux donc, le *Turc* pouvait être qualifié d'astucieux tour de magie, au pire d'escroquerie notoire. Von Kempelen était pourtant un automaticien de grand talent (on se souviendra notamment que sa « machine parlante » avait suscité l'admiration de Johann Goethe et de Jacob Grimm), mais force nous est faite de constater qu'avec lui, la quête de la « raison inanimée » avait fort mal commencé...

Afin de parvenir à comprendre ce qu'est le contrôle par séquence, nous devons à présent tourner notre attention vers un autre automate qui lui, on le sait, ne recelait aucune espèce de supercherie : le *Berger joueur de flûte traversière*, de Jacques de Vaucanson. Cet

⁴⁰⁰ On sait notamment qu'un nommé Worowski, ancien officier polonais qui avait été amputé des deux jambes, « joua » une partie restée célèbre contre Catherine II de Russie. Rapidement mise en difficulté, la Tzarine effectua un mouvement illégal (en réalité elle tricha bel et bien) ; « l'automate » remplaça alors la pièce qu'elle venait de déplacer sur sa position initiale. Catherine II réitéra néanmoins le mouvement interdit tout en toisant la machine de son impériale hauteur. C'est alors que l'« automate » perdit son « sang-froid » et qu'il balaya l'échiquier d'un revers courroucé, mettant par la même un terme définitif à l'affrontement ludique... Néanmoins l'honneur fut sauf, et ce tant pour la tsarine que pour un von Kempelen particulièrement terrifié par l'impudence et la brusquerie de son « poulain mécanique ». Amusée, celle-ci déclara assez habilement à l'issue de la partie que l'automate était très fort mais que von Kempelen, craignant sans doute de l'offenser, avait sciemment brouillé le jeu. L'automate, dont Catherine II avait reconnu l'indéniable talent, avait donc été officiellement victime d'un « dysfonctionnement pour motifs diplomatiques ».

androïde, parangon de la *musica mecanica* du 18^{ème} siècle, fut construit par l'automaticien grenoblois entre 1733 et 1737. Bien qu'il ait été lui aussi conçu dans le but de servir d'objet récréatif, l'objectif initial qui avait présidé à son élaboration était l'étude de la fonction respiratoire chez l'homme. Une fois de plus, l'automate se révélait bien être cet instrument dual par quoi l'homme cherchait à se distraire de façon originale en même temps que cet *analogon* technique de lui-même au moyen duquel il tentait de parvenir à la compréhension de son être : l'automate comme instrument de divertissement, certes, mais aussi et surtout comme dispositif expérimental pour éclairer l'Homme. A l'instar du *Canard*, le *Joueur de flûte* reposait sur un piédestal et figurait en posture assise sur un rocher, un peu à la manière de certaines des statues que le sculpteur Auguste Rodin devait réaliser un siècle plus tard. Automate de taille fort respectable - il mesurait à peu près un mètre soixante-dix huit - le *Joueur de flûte* était capable d'interpréter une douzaine de pièces musicales différentes avec la justesse et l'élégance qui caractérisaient habituellement l'interprète humain. Le coffret sur lequel il était présenté, outre sa fonction évidente de présentoir, était destiné à abriter la plus grande partie de son mécanisme moteur : on y trouvait quinze leviers disposés sur le plan vertical et arrangés de façon parallèle (soit une sorte de peigne), divers rouages, câbles et autres axes, trois tubes, ainsi que neuf soufflets. Une des pièces maîtresses ici était un cylindre de bois hérissé de picots de 56 centimètres de diamètre et de 83 centimètres de long. Celle-ci permettait en effet de contrôler le comportement de l'automate.

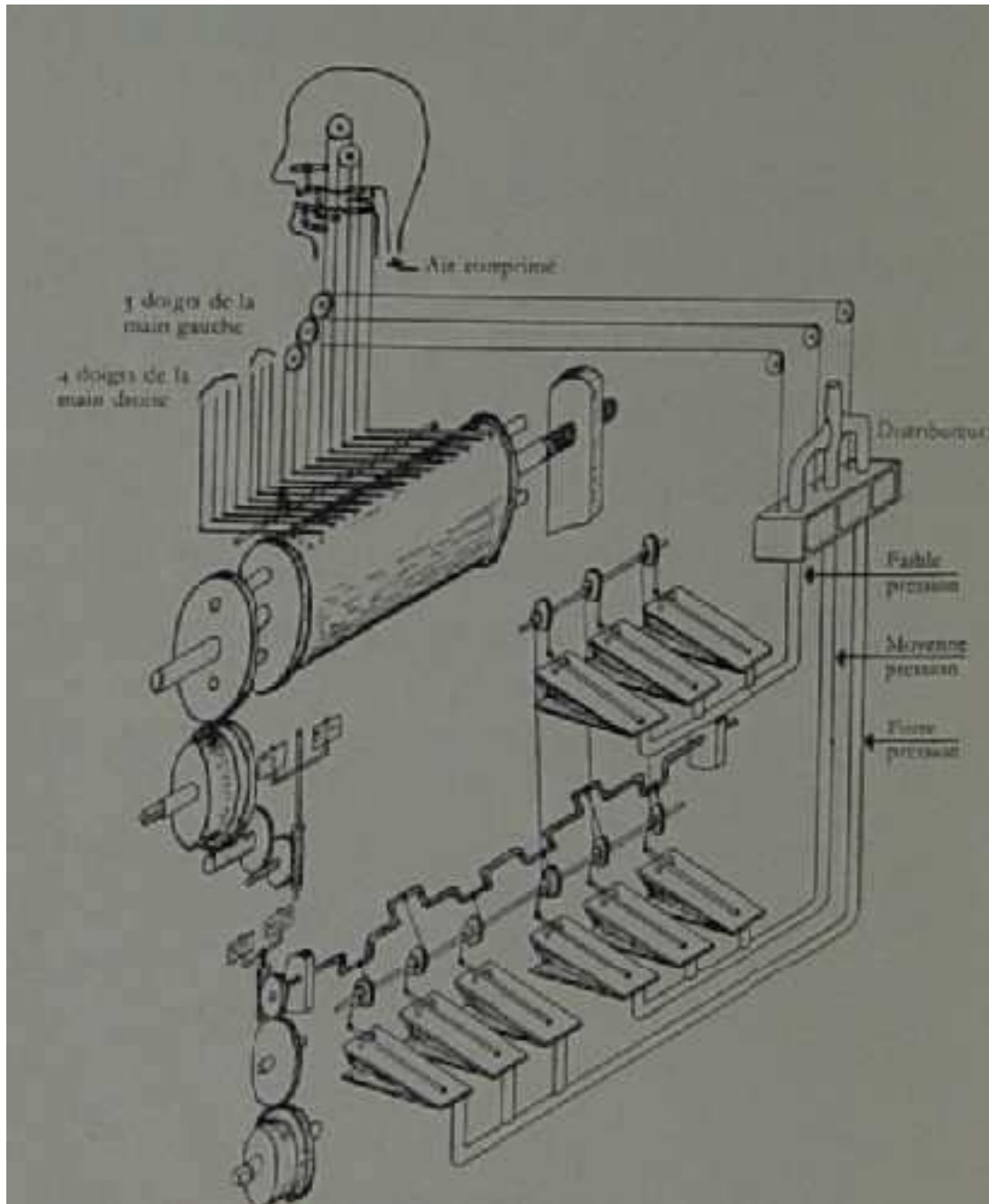


Fig. 4 : le mécanisme du *Joueur de flûte traversière*. Sur cette gravure ancienne, on aperçoit fort distinctement le cylindre à picots qui commandait, outre la séquence gestuelle de l'automate, l'ouverture et la fermeture de neuf soufflets pneumatiques (les « poumons » du flûtiste), reliés par triplets à trois tubes permettant de produire des souffles d'intensité modulable (faible, moyen ou fort).

Lorsqu'il tournait sur son axe, les picots dont était hérissé le cylindre actionnaient quelques-uns des quinze leviers que comportait le mécanisme. Mis temporairement en branle par l'action de ces picots, certains de ces leviers agissaient alors à leur tour sur les rouages, les fils et les soufflets de celui-ci. Il était ainsi possible de contrôler avec exactitude le débit d'air des soufflets, l'ouverture ou la fermeture des lèvres du flûtiste, l'amplitude des mouvements

de sa langue et le jeu de ses articulations digitales. De façon générale, l'arbre à cames ou la paire cylindre à picots/peigne (couplés à des organes de travail tels que ressorts, roues dentées, tuyaux, soufflets et pignons), apparaissent alors comme autant de formes « programmatiques » primitives littéralement prises dans la matière qui permettent de mettre en mouvement et de coordonner, dans le temps et l'espace, les parties escamotées et ostensibles de plaisants automates, véritables microcosmes techniques revêtant qui des formes humaines, qui des apparences zoomorphes (le bestiaire mécanique comptait ainsi des paons, des insectes, des chiens, des grenouilles, des éléphants, des écrevisses et des canards). Pour « programmer » le *Joueur de flûte traversière* de Jacques de Vaucanson⁴⁰¹, « témoignage non négligeable du couplage de l'automatisme et de la création musicale⁴⁰². » pour reprendre ici l'expression de Jean-Claude Beaune, il suffisait ainsi de « charger » un cylindre à cames dans l'emplacement réservé à cet effet. En substituant un cylindre à picots à un autre, donc en changeant de « programme », l'automate pouvait jouer d'autres pièces musicales, adopter une autre rythmicité, d'autres comportements, d'autres attitudes (comme boucher différemment les trous de la flûte traversière avec les doigts ou donner « un coup de langue » à un moment donné ou à un autre). On se trouvait ainsi en mesure de soustraire momentanément le simulacre du vivant humain à la menace que constituait pour lui la répétitivité ininterrompue, la récursivité imbécile, bref le mécanique trop mécanique qui aurait tué en lui tout ce qu'il pouvait y avoir de « vivant » ou d'esthétique. En neutralisant de la sorte le risque d'excédent machinal – sorte de névrose du recommencé - la variation introduite par le cylindre/programme préservait l'automate anthropomorphe, à la fois instrument de divertissement et expérience philosophique, du vertige et du ridicule de la rythmique itérative du geste et de la musicalité tout en permettant de maintenir intact l'intérêt que le spectateur pouvait lui porter (Jessica Riskin rappelle⁴⁰³ fort à propos que pour voir le *Joueur de flûte* ou le *Joueur de tambourin et galoubet* (flûtet de Provence), il fallait s'acquitter d'un paiement de 3 livres, somme qui, *grosso modo*, correspondait à l'époque au salaire hebdomadaire d'un ouvrier parisien).

⁴⁰¹ Ce dernier s'inspira pour le construire d'un marbre de Coysevox, *Le Berger jouant de la flûte*, qui figurait à l'entrée des Tuileries.

⁴⁰² In [Beaune, 1980], p.162.

⁴⁰³ J. Riskin, *Ibidem*, p. 36.



Fig. 5 : trois des plus célèbres automates de Monsieur de Vaucanson tels qu'ils furent présentés au public lors d'une exposition qui se tint à Paris durant l'hiver 1738-1739. A gauche on reconnaîtra le *Joueur de flûte traversière*, au centre le Canard, et à droite le *Joueur de tambourin et galoubet*. Image Courtesy of the Rare Book and Special Collections Division U.S., Library of Congress.

Ce mode de « programmation » mécanique subira une inflexion décisive, toujours au 18^{ème} siècle, avec la mise au point des cartes puis des cartons perforés (Basile Bouchon, Louis Falcon, Joseph Marie Jacquard en seront les artisans majeurs). Ces supports cartonnés (on passe ainsi d'un volume tridimensionnel, celui du cylindre métallique hérissé de picots, à un support bidimensionnel économique, peu encombrant et en outre facile à produire et à travailler), furent originellement conçus en vue de permettre l'automatisation du tissage des étoffes façonnées. A partir de ce moment la « programmation », ou plutôt le contrôle par séquence, se fait *binnaire* (la présence d'un trou sur une zone donnée du carton pouvant être interprétée comme un « 1 », son absence comme un « 0 »). Un fois nommé inspecteur des manufactures de soie en 1741, Vaucanson, soucieux de mettre un terme aux conflits avec les

soyeux, entreprit la mise au point d'un métier à tisser automatique⁴⁰⁴, machine textile industrielle dont il devait affirmer que grâce à elle « *un cheval, un bœuf, un âne [faisaient] des étoffes bien plus belles et bien plus parfaites que les ouvriers en soye* » (ainsi passe-t-on de l'automate de divertissement, mais qui n'est pas seulement cela, à la machine-outil). L'ouvrier spécialisé des manufactures de soie se voyait par la même complètement dépossédé de tout son savoir-faire (et par la même occasion de son gagne-pain). Là où toute l'attention, la patience et l'art d'un être humain avaient été autrefois requis pour accomplir un travail exigeant et rigoureux, une machine mue par la brute énergie animale suffisait désormais pleinement. En somme, le vieux rêve aristotélien se voyait enfin réalisé. Mais ne s'agissait-il pas après tout de substituer un esclavage particulier – celui du travail - à un autre tout aussi déplorable, celui de la misère assurée ? La réponse à cette question paraît évidente. Il y a de toute façon fort à gager que le soyeux lyonnais du 18^{ème} siècle, « libéré » de fait de la lourde contrainte que représentait sûrement son travail par l'irruption de la machine « salvatrice », n'allait pas trouver là motif ultime de réjouissances et se tourner *illico* vers l'exercice de la pensée (lecture des classiques ou des modernes ?), pour enfin se réaliser en tant qu'homme. Le tissage d'étoffes élaborées, comme du reste certaines tâches computationnelles jugées stupides ou intellectuellement dégradantes (car trop répétitives), se virent ainsi rejetées dans le domaine de l'inintelligent tandis que la frontière entre l'humain et le mécanique, déjà dramatiquement déplacée par la figure de l'automate anthropomorphe, continuait de s'estomper encore. Notons qu'avant que les concepteurs d'instruments de calcul mécaniques (*Analytical Engine*), puis de calculateurs électromécaniques (A.S.C.C., C.P.C., Harvard Mark I, S.S.E.C.), et d'ordinateurs (E.D.S.A.C.), ne s'en emparent pour contrôler la marche de leurs machines, les cartes perforées (bientôt les cartons perforés), se trouvèrent notamment mis en œuvre sur les orgues de barbaries et les pianos mécaniques.

La question à laquelle nous devons nous efforcer de répondre maintenant est la suivante : les différents dispositifs de contrôle que nous venons tour à tour de mentionner – arbres à cames, cylindres à picots ou encore cartes perforées – peuvent-ils être réellement appelés dispositifs de *contrôle par programme* ou, plus simplement, *programmes* ? Si oui, dans quelle mesure ceci est-il vrai ? Et si non, pourquoi ? Qu'est-ce qui permet dans ce cas de différencier vraiment entre programmation et contrôle par séquence ? En vérité il est parfois bien difficile de faire effectivement le départ entre les notions de contrôle par programme et de contrôle par séquence tant elles paraissent être extrêmement proches l'une de l'autre, tant

⁴⁰⁴ Joseph Marie Jacquard, s'inspirant ensuite du travail novateur de Vaucanson, perfectionna encore le principe, repoussant plus loin encore les limites de l'automatisme.

elles se trouvent fréquemment assimilées l'une à l'autre aussi (on notera en passant que l'on emploie toujours le terme « programmé » en lieu et place de l'expression « contrôlé par séquence » et que l'inverse, à notre connaissance, ne se produit jamais). Tout d'abord, une remarque liminaire semble s'imposer: la notion de contrôle par séquence a quelquefois été explicitement employée dans la désignation même de certains des calculateurs numériques qui ont été construits aux Etats-Unis au cours de la seconde guerre mondiale. On mentionnera en particulier : 1) le calculateur I.B.M. / Harvard Mark I d'Howard Aiken, également connu sous l'appellation d'A.S.C.C., soit *Automatic Sequence Controlled Calculator* ; 2) l'I.B.M. S.S.E.C. (aussi surnommé *Poppa*) : le *Selective Sequence Electronic Calculator*. Le fait que ces deux machines numériques aient été des calculateurs (électromécanique pour le premier et électronique/électromécanique pour le second), et non des ordinateurs ne doit pas entrer en ligne de compte pour l'instant. Notons seulement que tout ceci ne fait qu'ajouter à la confusion puisqu'à propos de l'un ou l'autre de ces instruments de calcul, il n'est pas si rare de rencontrer des expressions telles que « *Il [l'A.S.C.C.] s'agit du premier calculateur à registre contrôlé par un programme*⁴⁰⁵ » ou encore « *... the machine [l'A.S.C.C.] needed a control mechanism that allowed one to carry out a serie of calculations that involved different numerical values. In other words, it needed to be programmable*⁴⁰⁶ ». De plus, il n'est pas non plus exceptionnel de rencontrer sous la plume de certains des choses telles que « *Le principe de la régulation, qui était utilisé par les maîtres horlogers, avait été remplacé dans les théâtres d'automates par le principe de programmation... Quelle que soit la finesse de réalisation des différentes pièces et de leur agencement [des automates], le cœur du dispositif est ici la programmation, c'est-à-dire le contrôle, selon un ordre déterminé, des mouvements de l'ensemble*⁴⁰⁷ ». Que la modalité de contrôle par séquence d'un automate ait effectivement représenté – sous certaines conditions - une *forme particulière* de programmation, nous ne le nions pas (nous verrons pourquoi un peu plus loin). Mais de là à dire que les automates de Vaucanson étaient programmés, même par abus de langage consacré par l'usage, il y a un pas que nous ne nous autoriserons pas à franchir avant d'avoir pris la précaution d'étudier en détail le ou les rapports qu'entretiennent l'une à l'autre ces deux notions il est vrai extrêmement voisines. Après cela seulement pourrions-nous peut-être employer à leur endroit les termes de « programme » ou de « programmation ».

⁴⁰⁵ In [Breton, 1990], p. 74.

⁴⁰⁶ In [Ceruzzi et Kidwell, 1994], p. 56.

⁴⁰⁷ In [Breton, 1990], pp. 29-30.

2.2.3. Etude d'un automate musical contrôlé par séquence.

Nous envisagerons tout d'abord le contrôle par séquence d'un automate lorsque celui-ci se trouve effectué sur le mode *analogique*, c'est-à-dire quand le mécanisme de contrôle de cet automate constitue une analogie physique (sous la forme d'un picot, d'un angle de rotation, de l'intensité d'un courant, etc.), de la tâche spécifique qu'il doit accomplir. Dans le cas d'un calculateur, il s'agit donc de l'expression physique du problème mathématique à résoudre ou, pour parler comme Von Neumann, de « *l'intention [matérialisée] de l'utilisateur*⁴⁰⁸ ». Ceci, comme peuvent en témoigner des calculateurs tels que l'A.S.C.C. ou le S.S.E.C. (où les quantités à traiter étaient représentées sous forme numérique), ne signifie nullement que le fait d'être contrôlé par séquence implique que la machine ainsi commandée doive nécessairement être de type analogique (comme un analyseur différentiel). Il est pour l'heure seulement question du dispositif de contrôle et de rien d'autre. L'étude d'un automate musical élémentaire très connu (idéalisé ici), nous permettra sûrement de mieux comprendre ce qu'est exactement le contrôle par séquence et en quoi il diffère – et peut pourtant se rapprocher – d'un programme (au sens informatique du terme).

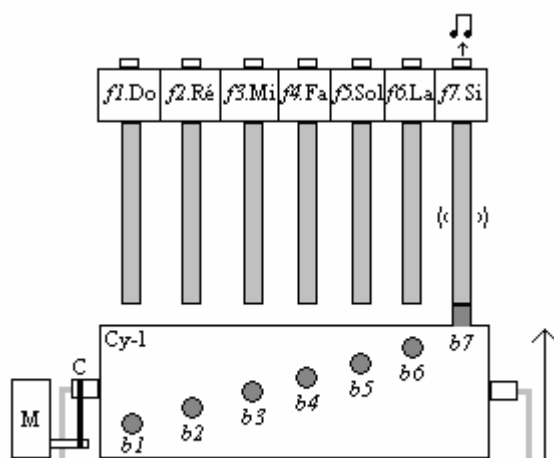


Fig 6: un automate musical contrôlé par séquence.

L'automate présenté ci-dessus est contrôlé au moyen d'un cylindre à picots (Cy-1) entraîné par un moteur (M) dont le type peut rester indéterminé. Le cylindre Cy-1 est relié au moteur M par une courroie (C) qui permet de lui imprimer un mouvement rotatif que l'on supposera régulier. Comme on peut le constater, le cylindre Cy-1 comporte au total sept picots. L'agencement de la machine est tel que, lorsqu'il tourne sur son axe, le cylindre amène

⁴⁰⁸ In [Von Neumann, 1958], Ed. Française, p. 26.

assez fréquemment un de ses picots à heurter une des dents du peigne métallique qui se trouve disposé juste au dessus de lui, provoquant ainsi dans cette lame une vibration uniforme. Cette vibration est alors utilisée comme *input* d'une boîte noire (il en existe sept), dont la fonction unique consiste à produire une note musicale spécifique (peu importe comment, on supposera simplement que la vibration de la lamelle ébranlée par le picot est d'une manière ou d'une autre convertie en sonorité musicale de durée brève et constante). Le son est diffusé grâce à un petit haut-parleur. On remarquera tout d'abord que cet automate, une fois mis en marche, exécute toujours la même séquence: il donne le do, puis le ré,..., puis le si et réitère indéfiniment ce cycle à moins qu'il ne cesse d'être alimenté en énergie ou que l'une de ses pièces ne vienne à rompre accidentellement. Peut être imaginera-t-on qu'il suffit de changer de cylindre (on suppose par conséquent que celui-ci est amovible), pour que l'automate musical fasse enfin autre chose. Soit. On décide alors de substituer au tambour Cy-1 un autre cylindre (appelons le Cy-2), par exemple celui qui *correspond* à la partition de la mélodie enfantine d'*Au clair de la lune* ou à celle de *Frère Jacques*. Ici encore, peu importe. Le dispositif considéré, s'il est plus complexe maintenant, demeure fondamentalement identique à ce qu'il était auparavant : seuls les picots varient en nombre et en disposition sur sa surface tubulaire (en conséquence, l'air joué n'est plus le même). On constatera sans doute que l'*output* musical ainsi obtenu est plus divertissant que le précédent. A son écoute, la lassitude s'installera peut être moins vite mais si cela s'avère être le cas, il suffira simplement de changer une nouvelle fois de tambour pour se trouver en mesure d'entendre à nouveau autre chose. Cela nous autorise-t-il pour autant à affirmer que l'automate musical fait autre chose chaque fois qu'un nouveau cylindre Cy-x est installé dans l'emplacement consacré à cet effet ? Certes non. Il pourra sûrement « interpréter » autant de mélodies qu'il existera de cylindres qui lui sont adaptés mais dans tous les cas imaginables, sa *fonction* demeurera absolument la même. Ce qui compte véritablement ici est la manière dont fonctionne l'automate, la façon dont il réalise le processus pour lequel il a été construit. Tout le reste (par exemple les matériaux avec lesquels il a été fabriqué, le morceau qu'il joue maintenant ou celui qu'il jouera dans une semaine, l'étendue de sa « bibliothèque » de mélodies, etc.), peut être considéré comme accessoire. Revenons cependant à la configuration de l'automate telle que nous l'avions définie initialement. Il s'agit en effet d'un cas de figure à la fois élémentaire et légitime qui suffit parfaitement à rendre compte de ce qui se trouve impliqué ici. Chaque picot ou ergot du cylindre (appelons-les des instructions, ou plutôt des bits de contrôle), se trouve individuellement placé dans l'alignement d'une des sept lamelles du dispositif (et d'une seule), elle-même exclusivement couplée à l'une des sept boîtes noires dont est doté l'automate. Il va

de soi que sur le plan musical l'intérêt d'un pareil instrument ne saurait être que fort limité et que dans la réalité, le nombre de picots qui peut être habituellement observé sur les cylindres des automates musicaux de ce genre est beaucoup plus élevé que celle du tambour de notre exemple. Les mélodies couramment jouées étant la plupart du temps un tant soit peu élaborées, il arrive souvent que plusieurs picots se suivent sur une même colonne verticale qui permettent d'actionner successivement une lame identique. Ce processus peut bien entendu être parallélisé (*i.e.* plusieurs picots se suivent sur plusieurs colonnes verticales différentes), afin de rendre des effets sonores complexes. Ici bien sûr ce n'est pas le cas, mais tout ce que nous pourrons dire par la suite à propos de cet exemple particulier s'appliquera sans restriction aucune à tout cylindre de ce type (en fait à tout automate de ce type), qu'il *représente* une pièce musicale harmonieuse ou bien une épouvantable cacophonie. Lorsque le moteur de l'automate est mis en marche, son cylindre est placé en rotation. Chacun des picots qu'il comporte – donc chaque bit de contrôle – va venir heurter une lame du peigne, induisant dans celle-ci, comme nous l'avons dit plus haut, une vibration qui sera utilisée comme entrée d'une des sept boîtes noires de l'automate (boîte do, ré, mi, ..., la). En sortie, cette boîte noire restituera invariablement la même note musicale grâce à son haut parleur (c'est là précisément sa fonction). Chaque picot du médium de contrôle (*i.e.* le cylindre), commande donc l'action d'un mécanisme particulier de l'automate (en l'occurrence il s'agit de l'un des sept ensembles lame + boîte noire + haut parleur). On dira alors que chaque bit de contrôle b du cylindre Cy-1 contrôle la réalisation d'une des sept fonctions f dont est capable l'automate musical A : le bit b_1 déclenchera ainsi la réalisation de la fonction f_1 (boîte noire Do), le bit b_2 celle de la fonction f_2 , et ainsi de suite jusqu'à b_7 et f_7 (boîte noire Si). A un instant t donné, chaque bit du dispositif de contrôle déterminera donc individuellement - ou non - la réalisation d'une des fonctions de l'appareil à l'exclusion de toute autre : il n'arrivera jamais qu'un picot puisse contrôler l'opération de plus d'une boîte noire tout de même que jamais une boîte noire ne sera contrôlée par plus d'un picot en même temps (il se peut bien entendu qu'avec un autre cylindre, plusieurs bits de contrôle, par exemple b_3 , b_4 et b_6 , déclenchent simultanément la réalisation de plusieurs fonctions, ici f_3 , f_4 et f_6 , mais dans tous les cas, à chaque bit ne correspondra toujours qu'une seule et unique fonction). Quels enseignements pouvons-nous alors tirer du fonctionnement de cet appareil musical ? Qu'est-ce que tout ceci nous apprend réellement à propos du contrôle par séquence ? De tout ce qui vient d'être dit, nous pouvons à présent tirer les conclusions suivantes qui nous permettront d'en déterminer les caractéristiques essentielles:

1) La séquence effectuée par l'automate est *toujours* la même. On peut fort bien substituer un cylindre à picots à un autre (à condition bien sûr que ceux-ci soient amovibles), mais ceci ne changera absolument rien au fonctionnement du dispositif. Cette séquence se déroulera en effet *toujours* dans le même ordre, autrement dit, une fois qu'un cylindre aura été chargé et que l'automate aura été mis en marche, les picots seront systématiquement « lus » de la même façon. Qu'un cylindre ait été oui ou non convenablement calé au départ (de façon à ce que le premier picot « lu » permette effectivement la production de la première note du morceau joué), ne modifie strictement rien ici ; il suffira d'attendre que le cylindre ait effectué une rotation de n degrés sur son axe pour entendre enfin « l'ouverture » de la pièce choisie et voir le cycle musical normal commencer à se répéter.

2) La nature de la mélodie jouée n'influence en rien le *modus functionnale* de l'automate. En d'autres termes le nombre et la disposition des picots présents sur le cylindre (qui constituent une représentation analogique de cette mélodie), ne modifient en aucun cas la manière dont, fondamentalement, l'automate opère. Ceci est vrai non seulement pour les « moulins à musique » mais aussi, par exemple, pour les métiers à tisser automatiques de type Jacquard. Ce que représente effectivement le cylindre ou l'ensemble de cartons perforés qui peuvent être présentés à l'automate n'agit en rien sur le processus qu'il accomplit. Dans tous les cas bien entendu, les sorties obtenues (*i.e.* le morceau joué ou le motif tissé), différeront sûrement les unes des autres, mais ce que fait l'automate (jouer des notes, tisser un motif), n'en sera pas pour autant transformé. Ceci ne signifie pas que les cylindres à picots ou les cartons perforés soient des dispositifs dont l'automate musical ou le métier automatique peuvent se voir privés sans de notables conséquences. Et pour cause ! Sans eux, mais cela semble tomber sous le sens, ils ne pourraient fonctionner (tout au plus ne feraient-ils que tourner à vide dans un pareil cas). En revanche, ce que représentent ces supports est à cet égard totalement accessoire. En droit, on pourrait parfaitement imaginer qu'il existe un cylindre ne comportant qu'un seul picot (placé n'importe où), ou un autre permettant d'entendre l'ouverture du *Parsifal* de Wagner. Et encore, pourquoi pas ? Un tambour représentant un air totalement intolérable à l'oreille tant il serait disharmonieux. De la même façon, il pourrait exister une chaîne de cartons perforés permettant à un métier automatique de tisser un superbe portait (comme celui qui fut ainsi fait de Joseph Marie Jacquard en 1839), ou bien alors un motif pseudo aléatoire, sans signification géométrique ou figurative apparente (bien qu'une certaine régularité finisse forcément par apparaître si cette chaîne est passée en boucle dans le métier). Quel que soient alors le cylindre ou la chaîne de cartons perforés qui pourront être introduits dans l'automate, celui-ci fera toujours la même chose toujours de la

même manière : il jouera une ou plusieurs notes musicales ou tissera un ornement donné en répétant une ou plusieurs fois ce processus. Sauf accident mécanique, la sortie qui sera obtenue correspondra constamment à la séquence engagée en entrée. En bref, l'*output* que produira l'automate ne variera jamais.

3) Les supports analogiques de contrôle par séquence que nous venons de considérer peuvent participer de deux types principaux : soit il s'agit de médias externes – c'est par exemple le cas pour les cartons perforés - soit alors ce sont des médias internes. En ce qui concerne les cylindres à picots, nous avons également vu qu'ils pouvaient être ou non interchangeables. Quoiqu'il en soit, nous pouvons dire que ces derniers font partie intégrante de l'automate et que c'est la manière dont été conçu ce dernier qui a déterminé leur schéma de configuration fondamental.

4) Chaque bit de contrôle (picot, perforation), sert à la commande d'un mécanisme individuel de l'automate et d'un seul. Il peut se produire bien entendu que plusieurs bits de contrôle agissent sur un même mécanisme mais uniquement selon l'ordre de la succession, jamais selon celui de la simultanéité (*e.g.* les bits b_1 et b_1' étant placés l'un en dessous de l'autre, ils déclencheront successivement la réalisation de f_1 , mais celle-ci ne pourra en aucun cas être contrôlée en même temps par les bits b_1 et b_1' ou bien par les bits b_1 et b_4).

5) Il n'y a pas de dispositif de stockage interne.

6) Dans ce genre d'automates, il n'existe pas de retour de la sortie sur l'entrée, autrement dit son *output* ne peut servir d'*input* à la machine. Aucun *feedback* n'étant autorisé, la séquence de contrôle est réalisée de manière absolument fixe. Le schéma théorique de fonctionnement auquel répondent de tels automates est donc le suivant :

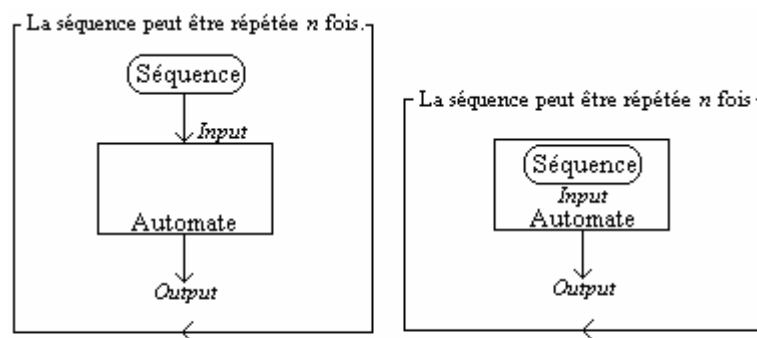


Fig. 7: schémas de fonctionnement de deux automates contrôlés par séquence. À gauche le support est externe. À droite il est interne. La sortie n'influence pas l'entrée et l'automate exécute toujours les mêmes opérations.

7) Il n'existe pas non plus de retour de l'*output* sur le dispositif de contrôle. La sortie de l'automate ne peut donc pas servir à modifier la suite d'instructions qui sert à le

commander. Celle-ci demeure la même en permanence et l'automate, tant qu'il fonctionne, accomplit toujours les mêmes opérations, c'est-à-dire la même séquence de contrôle, dans l'ordre dans lequel celles-ci se présentent invariablement. Etant donné cela, et puisque qu'il n'existe aucune structure de test dans ce type de structure de contrôle - comme un branchement conditionnel par exemple - la sortie de l'automate demeure toujours la même.

8) Dans ces deux cas de figure, la séquence de contrôle de l'automate constitue à la fois son *input* et son *output* : en fait, ce qui se trouve représenté sur le support de la séquence de contrôle de l'automate est son *input* en même temps que cela correspond exactement, sur le mode analogique, à son *output*. Le schéma de perforation des cartes du métier à tisser automatique et la distribution des picots sur le cylindre de l'automate musical peuvent par conséquent être considérés comme des représentations analogiques du *pattern* devant être assemblé et du morceau musical devant être joué. D'où il ressort que les remarques n°6 et n°7 qui viennent d'être énoncées (pas de retour de l'*output* sur l'*input* ni non plus de retour de l'*output* sur la séquence de contrôle de l'automate), ne peuvent être véritablement distinguées l'une de l'autre.

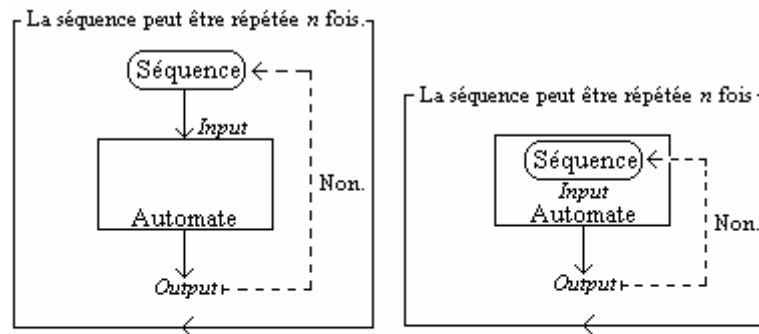


Fig. 8: schémas de fonctionnement de deux automates contrôlés par séquence. A gauche le support est externe, à droite, il est interne. La sortie n'influence pas la séquence contrôlant l'automate et celui-ci fait toujours la même chose

Les différentes observations qui viennent d'être formulées ci-dessus nous ont permis de définir avec précision ce que nous entendions lorsque nous disions qu'un automate était contrôlé par séquence. Cependant, ici, ce mode de contrôle n'a été considéré que sous sa forme première, autrement dit sous sa forme véritablement élémentaire. Le contrôle par séquence d'un automate, nous allons le voir incessamment, peut néanmoins se voir raffiné au

point que, sans être encore *programme*, il tend néanmoins à se rapprocher très sensiblement de cela.

2.2.4. Les automates arithmétiques de Charles Babbage : le premier *Difference Engine* et l'*Analytical Engine*.

Le mathématicien et économiste⁴⁰⁹ britannique Charles Babbage (1791-1871)⁴¹⁰, on le sait, conçut au cours du 19^{ème} siècle non pas deux mais trois machines à calculer mécaniques restées depuis extrêmement célèbres tant elles étaient inhabituellement complexes et comportaient de caractéristiques fort innovantes pour l'époque. Pourtant la première – le *Difference Engine* # 1 ou « machine à différences » - n'a jamais été achevée tandis que la deuxième et la troisième⁴¹¹ – l'*Analytical Engine* ou machine analytique et le *Difference Engine* #2 – ne furent tout bonnement jamais construites. Avant d'étudier la façon dont la machine à différences et la machine analytique pouvaient, ou plutôt auraient dues être contrôlées si l'une et l'autre avaient été effectivement réalisées, il nous faut dire quelques mots du contexte historique particulier dans lequel Charles Babbage travailla à la mise au point de ces deux formidables projets. Ceci nous permettra non seulement de saisir les motifs véritables qui conduisirent le mathématicien à entamer des travaux aussi considérables mais également de mettre en lumière les raisons pour lesquelles il pu bénéficier longtemps – en réalité une dizaine d'années - des largesses financières de la Couronne Britannique.

2.2.4.1. Les problèmes liés au calcul des tables mathématiques au 18^{ème} et 19^{ème} siècles.

La fin du 18^{ème} correspond à la période à laquelle débuta en Europe la publication à grande échelle de tables mathématiques destinées à embrasser un large spectre d'opérations ou de fonctions mathématiques fondamentales : il existait ainsi des tables imprimées pour l'addition, la soustraction, la multiplication comme il en existait aussi pour les logarithmes,

⁴⁰⁹ Charles Babbage fut notamment l'auteur de deux traités d'économie reconnus : *Economy of Machinery and Manufactures* (paru en 1835), et *Thoughts on the Principles of Taxation* (paru en 1852).

⁴¹⁰ L'année de naissance de Charles Babbage, contrairement à ce qui peut être lu quelquefois, n'est pas 1792 mais 1791. De même, la ville où il vit le jour n'est pas Devon mais Londres. Pendant un certain temps, il a effectivement subsisté un certain mystère autour de la naissance de Babbage mais des documents relatifs à son baptême ont été tardivement découverts qui ont permis de clarifier définitivement cette situation.

⁴¹¹ Ce calculateur, peut être moins connu que les deux autres, constituait une amélioration de la première machine à différences qui avait été incomplètement réalisée dans les années 1820. C. Babbage en dressa les plans en 1849, alors même qu'il travaillait encore à la conception de l'*Analytical Engine*. A l'instar de ce dernier, le D.E.2 ne fut jamais fabriqué (le Muséum des Sciences de Londres a construit, à partir des plans originaux qui avaient été dressés par C. Babbage, une réplique de cette machine en 1991. Elle y est toujours exposée).

les sinus ou les cosinus... Ainsi que le remarque Philippe Breton : « Avec l'industrialisation croissante, les besoins en calcul de tout genre allaient croissant. L'Angleterre par exemple, comme toutes les autres puissances maritimes, était grosse consommatrice de tables numériques destinées à la navigation.⁴¹² ». La possession de ces tables, ainsi que leur exactitude, constituaient par conséquent un enjeu réellement crucial (économique, militaire, scientifique), tant pour les Nations que les individus. C'est ainsi par exemple que l'astronome royal Nevil Maskelyne, à la demande expresse du gouvernement britannique, produisit chaque année à partir de 1766 un ensemble de tables de navigation – du reste assez précises – connu sous le nom de *Nautical Almanach*⁴¹³ (d'une façon qui laisse guère subsister de doutes quant à l'importance véritable qu'il pouvait effectivement revêtir pour les aventuriers des mers⁴¹⁴, ce dernier était également surnommé la « Bible des marins »). L'emploi de ces tables de calcul, bien entendu, n'était pas restreint au seul secteur de la navigation maritime, que celle-ci ait été du reste commerciale ou militaire. Elles se trouvaient également employées dans des domaines tels que l'astronomie, les mathématiques, la physique, l'architecture, la mécanique, les assurances, etc. (on sait notamment que parmi les nombreux ouvrages que comportait la bibliothèque privée du mathématicien Babbage ne figuraient pas moins de 125 volumes de tables mathématiques de diverses sortes). Dans tous les cas de figure, c'est-à-dire quel qu'ait pu être le type précis de ces tables mathématiques et le domaine dans lequel elles étaient effectivement usitées, deux caractéristiques ne peuvent manquer d'être repérées systématiquement à leur propos: 1) leur raison d'être consistait fondamentalement à diminuer la pénibilité du travail de calcul auquel se livrait celui qui y avait recours (il s'agissait par conséquent de dispositifs d'aide au calcul qui répondaient naturellement au projet leibnizien consistant à libérer l'homme de l'esclavage que représentait l'effectuation de tâches simples mais excessivement répétitives); 2) en dépit de toutes les précautions qui pouvaient être prises durant le processus de leur élaboration, elles se révélaient *toujours* truffées d'erreurs. Les tables de multiplication du Dr. Hutton, par exemple, permettaient de connaître la valeur du produit de x par y pour $0 \leq x \leq 100$ et $0 \leq y \leq 1000$: il fut trouvé jusqu'à quarante erreurs de calcul ou d'impression sur une seule page de ce document (pourtant ces tables étaient

⁴¹² In [Breton, 1990], p. 62.

⁴¹³ La dénomination exacte de l'almanach nautique était : *British Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris for the Meridian of the Royal Observatory at Greenwich*.

⁴¹⁴ A propos de la nécessité de disposer de tables mathématiques exactes (c'est-à-dire, autant que faire se peut, exemptes d'erreurs), John Herschel, un ami de Charles Babbage, devait déclarer : « *An undetected error in a logarithmic table is like a sunken rock at sea yet undiscovered, upon which it is impossible to say what wrecks may have taken place* ». Une simple erreur commise dans le calcul d'une valeur d'une table logarithmique ou bien durant le processus d'impression de celle-ci était donc susceptible d'entraîner des conséquences réellement catastrophiques pour ceux qui, confiants, l'utilisaient.

connues et très largement utilisées). Cette illustration, pour saisissante qu'elle puisse être, se trouve pourtant fort loin de constituer un cas de figure isolé : dans la première édition du *Nautical Ephemeris for Finding Latitude and Longitude at Sea*, on ne releva pas moins d'un millier d'erreurs. Et l'on pourrait ainsi multiplier les exemples *ad nauseum*.

On sait pourtant avec quelle extrême ingéniosité - et aussi avec quel luxe de précautions - le Baron Gaspard-Marie Riche de Prony, par ailleurs ingénieur des Ponts et Chaussées et ancien élève de Jean Rodolphe Perronet, organisa en France la production de tables mathématiques peu de temps après la Révolution (il commença à travailler sur ce projet herculéen dès 1790). Quelques temps après cela, on décida de réformer en profondeur nombre des anciennes institutions françaises parmi lesquelles figurait entre autres choses un système de taxation sur la propriété que l'on souhaitait voir devenir plus équitable. La révision de ce système de taxation impliquait – première tâche considérable - que l'on révisé l'ensemble des cartes qui spécifiaient le découpage géographique de l'hexagone. De Prony, nommé à la tête du Service du Cadastre, hérita de ce vaste chantier (peut être le plus immense de ce genre à avoir jamais été entrepris dans le monde). Sa tâche déjà incommensurable fut très largement alourdie par l'introduction du système métrique destiné à remplacer le vieux système impérial de poids et de mesures qui avait été en vigueur jusque-là: en effet, pour se trouver à même de mettre en oeuvre la nouvelle modalité de taxation sur la propriété, il fallait tout d'abord mettre à jour les cartes géographiques propres au territoire français. Or, pour accomplir ceci, il était impératif de procéder préalablement au calcul de nouvelles tables trigonométriques et logarithmiques: celles-ci, en plus de devoir maintenant atteindre respectivement une précision à la 25^{ème} et à la 19^{ème} décimale, devraient désormais être basées sur le système décimal, les anciennes tables étant devenues totalement inutilisables en raison même de l'adoption par la France du système métrique. Afin d'organiser de manière optimale le formidable appareil de production qui était nécessairement requis pour le calcul de ces tables (le temps, comme souvent, n'étant pas ici un facteur négligeable), Gaspard-Marie de Prony s'inspira directement d'un texte publié en 1776 par le célèbre économiste écossais Adam Smith: *An Inquiry into the Nature and the Causes of the Wealth of Nations*. Dans *De la richesse des nations*, A. Smith s'était fait le défenseur du principe de la division du travail. Par le truchement d'une illustration demeurée depuis fameuse - Smith avait en effet imaginé une manufacture d'épingles organisée selon ce modèle de production sériel et segmenté – l'économiste avait démontré combien un telle structure organisationnelle, lorsque appliquée à l'appareil productif, pourrait se révéler efficiente en terme de rendement. Les processus ou les opérations de production ayant peu ou prou cessé d'être opaques, ils pouvaient désormais se

voir appréhendés au moyen de la méthode analytique et voir ainsi leur déroulement dynamique organisé de manière rationnelle en vue de parvenir à un fonctionnement réellement optimal. C'est précisément ce schéma que retint G.-M. De Prony quant il du organiser son « officine » de calcul : en lisant *De la richesse des nations*, il avait en effet conçu l'idée selon laquelle une méthode qui paraissait si efficace pour fabriquer des épingles pourrait sûrement être appliquée, *mutatis mutandis*, au calcul de tables mathématiques. Il s'agirait désormais de calculer des tables logarithmiques comme on pouvait, au moins en droit, confectionner des épingles. Dans leur ouvrage, *Computer : A History of the Information Machine*, Martin Campbell-Kelly et William Aspray décrivent de façon relativement détaillée quelle était en réalité l'organisation de la « manufacture à logarithmes » de De Prony:

« De Prony organized his table-making “factory” into three sections. The first section consisted of half a dozen eminent mathematicians – including Adrien Legendre and Lazare Carnot – who decided on the mathematical formulas to be used in the calculations. Beneath them was another small section – a kind of middle management – that, given the mathematical formulas to be used, organized the computations and compiled the results ready for printing. Finally, the third and largest section, which consisted of sixty to eighty human computers, did the actual computation. The computers used the “method of differences”, which required only the two basic operation of addition and subtraction. Hence, the computers were not, and did not need to be, educated beyond basic numeracy and literacy. In fact, most of them were hairdressers who had lost their jobs because “one of the most hated symbols of the ancient régime was the hairstyles of the aristocracy”⁴¹⁵ ».

Ce compte rendu nous permet de distinguer et d'apprendre plusieurs choses importantes quant à la manière dont se trouvait structurée la production de ces tables mathématiques. Pour commencer, cette organisation était triptyque : 1) la première section était composée de mathématiciens confirmés - dont certains de grand renom - représentés en très faible nombre (une demi-douzaine au plus dirigés par Adrien M. Legendre). Leur travail était tout à la fois extrêmement crucial et fort spécialisé puisqu'il s'agissait pour eux de déterminer les formules analytiques devant être utilisées par la suite pour calculer les tables logarithmiques. Ces expressions devaient non seulement permettre d'engendrer des résultats avec la précision escomptée mais également être aisément calculables ; 2) un deuxième

⁴¹⁵ In [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], p. 12.

groupe de mathématiciens (les effectifs de celui-ci ne sont pas spécifiés ici mais il semble que leur nombre n'ait pas excédé la dizaine), placé hiérarchiquement « en dessous » du premier (en fait il occupait la place centrale du dispositif), se voyait confié la gestion (*management*), de la production des tables. Il s'agissait ici principalement d'organiser les calculs, de veiller à la bonne coordination de leur exécution et de compiler les résultats obtenus pour publication. Outre le rôle « d'administrateurs » que s'étaient vu assigné les mathématiciens composant cette deuxième section - mais Campbell-Kelly et Aspray n'en font pas mention - Michael R. Williams précise que ces derniers devaient également procéder au calcul des « constantes requises pour les formules⁴¹⁶ » ; 3) enfin, le troisième et dernier groupe, de loin le plus important en terme d'effectifs, était composé de soixante à quatre-vingt dix personnes – en majorité d'anciens perruquiers que la Révolution avait mis au chômage – dont les connaissances en matière de mathématiques étaient tout au plus élémentaires (remarquons ici que les auteurs utilisent le terme « *computers* », et non celui de « *mathematicians* », afin de les désigner). Il n'était point besoin ici de recourir aux services de mathématiciens réellement aguerris dans la mesure où la tâche qui était celle des individus employés dans cette section de calcul se résumait uniquement à l'exécution à la chaîne d'opérations arithmétiques aussi simples que l'addition et la soustraction. La méthode de calcul employée dans ce cadre étant celle des *différences*, il suffisait effectivement de savoir réaliser ces deux opérations correctement pour prétendre à faire partie du troisième groupe de calculateurs (c'est cette même méthode des différences, mais nous y reviendrons, que Charles Babbage devait mettre en œuvre un peu plus tard dans son *Difference Engine*). Pour finir, on remarquera donc que les aptitudes mathématiques propres aux individus employés dans cette structure étaient inversement proportionnelles à leur nombre tout de même qu'elles déterminaient leur place exacte ainsi que leur importance réelle dans la hiérarchie de l'organisation (*i.e.* leur appartenance à tel ou tel groupe de calcul).

En dépit des moyens humains et financiers engagés, de l'organisation quasi militaire du dispositif et des précautions pour le moins draconiennes qui furent effectivement prises par Gaspard de Prony dans le but d'empêcher que ne se produisent des erreurs pendant le processus de calcul – chaque valeur numérique calculée était ainsi vérifiée deux fois pour certifier son exactitude et il alla même jusqu'à installer les différents groupes de travail en plusieurs sites de l'hexagone pour prévenir une quelconque forme de collaboration – les tables

⁴¹⁶ « He [Gaspard-Marie de Prony] used three sets of people: six of the most famous French analysts to produce the formulae used in the computation, ten qualified mathematicians who very carefully computed the required constants for the formulae, and over 100 men who actually did the arithmetic», in [Williams, 1997], p.160.

qui furent finalement produites au sortir de dix années d'un labeur colossal et minutieux n'étaient pas exemptes d'erreurs, loin s'en faut. Bien entendu, des *errata* étaient régulièrement publiés au fur et à mesure que de nouvelles erreurs étaient découvertes. Malheureusement, il arrivait assez fréquemment que ces correctifs comportent autant d'erreurs de calcul, si ce n'est parfois plus, que les tables qu'ils étaient censés permettre de réviser. Il est assez intéressant de noter que ces erreurs multiples ne se produisaient pas nécessairement au cours de la procédure de calcul elle-même mais qu'il était assez ordinaire qu'elles surviennent durant les phases de typographie et d'impression des tables, autrement dit pendant la phase où celles-ci devaient être reproduites : quoiqu'il en soit, c'est à l'agent humain, à une extrémité ou à une autre de la chaîne de production des tables, que devaient être systématiquement imputés ces fourvoiements nombreux.

Charles Babbage, à l'instar d'ailleurs de la plupart des mathématiciens de la fin du 18^{ème} et du début du 19^{ème} siècle, était parfaitement conscient de la grande faillibilité de ces tables tout de même que de leur caractère absolument indispensable. En 1819, le mathématicien britannique se rendit pour la première fois à Paris. C'est à l'occasion de ce voyage qu'il fit notamment la connaissance des mathématiciens français Simon Laplace et Joseph Fourier, très grandes figures scientifiques de l'époque avec lesquelles il devait à partir de là nouer une amitié solide. C'est à cette occasion également que Babbage fut mis au courant des travaux qui avaient été effectués deux décennies auparavant par Gaspard-Marie de Prony et, surtout, qu'il eut l'opportunité d'étudier la façon (inédite), dont l'ingénieur français avait procédé pour organiser son équipe de calculateurs. De retour en Angleterre, il prépara à partir du tout début de l'année 1820 un ensemble de tables astronomiques à destination de la *Royal Astronomical Society* (C. Babbage fut, avec d'autres, l'un des membres fondateurs de cette société scientifique anglaise créée le 12 janvier 1820). Pour la confection de ces tables, C. Babbage ne s'inspira nullement de ce qu'il avait pu voir en France une année avant puisque, *grosso modo*, celles-ci furent calculées comme l'avaient été celles du *Nautical Almanach*. Un travail de préparation fut mené en amont du projet par C. Babbage et un de ses amis également membre de la R.A.S., John Herschel, tandis que la réalisation des calculs proprement dits se vit confiée à des mathématiciens indépendants. Durant cette délicate phase d'élaboration, le rôle de C. Babbage et de J. Herschel consista non seulement à vérifier la précision des calculs effectués par les différents mathématiciens engagés dans le projet, mais également à superviser la compilation et l'impression des résultats finalement obtenus. Cette expérience bien concrète, indubitablement, autorisa C. Babbage à mesurer réellement à quel point l'établissement de tables mathématiques constituait une tâche

fastidieuse et ô combien sujette à l'erreur : c'est quelques mois seulement après cela qu'il commença à travailler à la mise au point de son *Difference Engine* #1. Il demeure cependant assez difficile d'affirmer de façon ferme et définitive que c'est précisément à ce moment que le mathématicien britannique conçut effectivement l'idée de construire une machine afin d'automatiser des procédures de calcul de ce genre (éliminer presque totalement l'intervention humaine dans la chaîne de calcul et d'impression revenant dans ce cas à réduire considérablement le risque de voir apparaître des erreurs). Concernant la datation (approximative) de la genèse de cette idée, il existe en effet deux versions quelque peu distinctes. La première d'entre elles nous a été relatée par Charles Babbage. Dans son ouvrage autobiographique, *Passages from a Life of a Philosopher*, il devait en effet déclarer que l'idée d'une pareille machine (en somme celle encore indéfinie d'un *Difference Engine*), lui était venue dans des circonstances quelque peu inhabituelles alors qu'il était étudiant à Cambridge dans les années 1812-1813 (l'année exacte où se produisit cet événement n'est pas exactement précisée par Babbage). Ainsi devait-il écrire:

« *The earliest idea that I can trace in my own mind of calculating arithmetical tables by machinery arose in this manner : One evening I was sitting in the rooms of the Analytical Society at Cambridge, my head leaning forward on the table in a kind of dreamy mood, with a Table of logarithms lying open before me. Another member, coming into the room and seeing me half asleep, called out, "Well, Babbage, what are you dreaming about ?" to which I replied, "I am thinking that all these Tables (pointing to the logarithms) might be calculated by machinery.*⁴¹⁷ ».

Si le jeune Babbage eut effectivement une intuition géniale au cours de ce rêve à demi éveillé, force est faite de constater qu'un certain temps lui fut cependant nécessaire (sept ou huit années selon que l'on prend 1812 ou 1813 comme point de référence initial), pour qu'il commence effectivement à la concrétiser. Une chose demeure néanmoins certaine à ce propos: ainsi que nous l'avancions plus haut, c'est peu de temps après avoir lui-même participé à la réalisation d'un ensemble de tables logarithmiques – et pris pleinement conscience de la difficulté réelle de la tâche - qu'il entreprit la conception du *Difference Engine*. Une autre version a également été avancée par certains des biographes de Charles Babbage - nous

⁴¹⁷ Charles Babbage, *Passages from a Life of a Philosopher*, New Brunswick, N. J., I.E.E.E. Press and Rutgers University Press, 1994, p.42. Egalement publié in Martin Campbell-Kelly, *Works of Babbage*, New York, American University Press, vol. 2, 1989. Le passage que nous citons, assez connu, a notamment été reproduit in [Goldstine, 1972], p. 11 et [Williams, 1997], p. 163.

songeons ici à Mabeth Moseley et à Philip et Emily Morryson⁴¹⁸ - concernant cette histoire : travaillant de concert avec John Herschel à la vérification de calculs qui avaient été exécutés pour les tables astronomiques de la *Royal Astronomical Society*, Babbage, passablement irrité par les erreurs nombreuses qu'il rencontrait tout de même que par la stupide répétitivité de la tâche qu'il était en train d'effectuer, aurait ainsi déclaré à son compagnon d'infortune : « *I wish to God these calculations had been executed by steam.* », ce à quoi Herschel aurait assez laconiquement répliqué: « *It is quite possible.* ». On doit prendre soin de noter ici que ces deux versions de l'histoire, quoique très différentes l'une de l'autre, ne nous apparaissent nullement comme étant exclusives. Elles sont même, à notre sens, parfaitement conciliables. La seconde, pourtant, se révèle être, et de loin, la plus intéressante pour la suite de notre propos. Suivant en cela les réflexions d'Herman H. Goldstine, nous commencerons par remarquer que Charles Babbage pensait, pour ainsi dire, «dans les termes mêmes de la technologie qui dominait son époque». Lorsqu'il dit «*I wish to God these calculations had been executed by steam* », c'est bien entendu au *steam engine*, c'est-à-dire au moteur à vapeur qu'il songe en tout premier lieu. On sait pourtant fort bien que le *Difference Engine* #1, pas plus du reste que ses infortunés successeurs, l'*Analytical Engine* ou le *Difference Engine* #2, ne furent jamais mus au moyen d'un moteur à vapeur⁴¹⁹. A l'instar toujours de l'assistant et ami de John Von Neumann, nous croyons que l'attitude ou la posture intellectuelle adoptée ici par le mathématicien britannique est parfaitement révélatrice d'une tendance persistante qui devra caractériser et déterminer en quasi permanence le développement ultérieur du calcul automatique : le développement de nouvelles machines à calculer est ainsi très fréquemment le fait d'individus inspirés – ou bien encore de groupes d'individus - qui, percevant avec une acuité certaine les potentialités recelées par une nouvelle technologie, comprennent avant tout autre comment adapter cette dernière aux calculateurs. Agissant précisément en ce sens, ils ne tardent généralement pas à provoquer une avancée majeure dans ce domaine. Ce fut le cas pour Charles Babbage (nous allons voir comment), comme ce fut également le cas pour John V. Atanasoff et Clifford Berry avec la technologie électronique. Pour que ce type d'avancée puisse être effectivement concrétisé, il semble nécessaire de voir converger l'un vers l'autre deux éléments distincts et fondamentaux : tout d'abord une technologie nouvelle et prometteuse, mais dont la valeur a déjà été éprouvée ailleurs, doit être disponible. Ensuite, le besoin de faire réellement progresser le *state of the art* du domaine, ainsi que le nomment

⁴¹⁸ Mabeth Moseley est l'auteur de *Irascible Genius, A Life of Charles Babbage, Inventor*, Londres, 1964. Philip et Emily Morryson sont quant à eux les auteurs d'une biographie intitulée *Charles Babbage and his Calculating Engines, Selected Writings by Charles Babbage and Others*, Londres, 1961.

⁴¹⁹ Babbage envisagea pourtant qu'ils le soient.

britanniques et américains, doit être, d'une façon ou d'une autre, identifié et reconnu comme tel. Concernant ce dernier point, on sait pertinemment dans quelles circonstances Charles Babbage en vint à s'apercevoir qu'il était impératif d'améliorer rapidement la façon dont les tables mathématiques étaient calculées. Le mathématicien confirmé qui était en lui s'était en effet parfaitement rendu compte de l'importance réelle que revêtait ces instruments de calcul de la même manière qu'il était pleinement conscient de l'imperfection des méthodes qui étaient employées alors pour les établir et les publier (lesquelles, étant donné leur constante faillibilité, ne pouvaient avoir qu'une incidence fort regrettable sur la qualité générale des tables). Indubitablement, le rêve qu'il avait fait étant jeune homme ou bien son expérience « malheureuse » dans le calcul des tables astronomiques destinées à la *Royal Astronomical Society* – voire les deux – constituèrent à cet égard de très précieux guides pour la conduite de sa pensée. Reste alors à rendre compte de la nature du facteur proprement technologique. Or, ainsi que nous l'avons mentionné un peu plus haut, celui-ci n'était aucunement lié à l'emploi du moteur à vapeur, une technologie pourtant dominante à l'époque de Charles Babbage. En fait, plutôt que d'évoquer ici une technologie en particulier, il conviendrait bien mieux de parler de technologie organisationnelle, celle, justement, que le Gaspard-Marie de Prony lecteur d'Adam Smith avait mise en œuvre afin d'organiser de manière optimale sa « manufacture à logarithmes ». Charles Babbage - le mathématicien avait cédé la place à l'économiste cette fois - ne pouvait avoir manqué la portée véritable de ce type d'organisation (nous nous souvenons qu'il prit connaissance des travaux de De Prony lors du voyage qu'il effectua à Paris en 1819). La réalisation de l'étape suivante, qui allait s'avérer absolument décisive pour la suite de l'histoire du calcul artificiel, devait donc lui échoir : reprenant à son compte la méthode des différences finies qui avait été employée par l'ingénieur de Prony ainsi que le schéma organisationnel⁴²⁰ smithien que celui-ci avait défini - lequel était encore loin d'atteindre la perfection puisque les tables produites de la sorte étaient non seulement coûteuses mais toujours entachées d'erreurs - Babbage prit la décision cruciale de remplacer les calculateurs humains par une machine qui, elle, ne faillirait pas à la tâche.

Après cette très longue digression - mais nous croyons qu'elle s'imposait- nous allons maintenant examiner la manière dont pouvaient être contrôlées deux des machines à calculer mécaniques qui furent conçues au 19^{ème} siècle par Charles Babbage. Pour la première, il s'agira du *Difference Engine #1*. La seconde machine sera l'*Analytical Engine*.

⁴²⁰ Cette dernière affirmation vaut tout particulièrement pour l'*Analytical Engine*.

2.2.4.2. La méthode des différences finies.

Charles Babbage a nommé son premier calculateur mécanique « machine à différences » en raison du fait que celui-ci, pour fonctionner, reposait sur la méthode de calcul dite des différences (la même que celle qu'utilisa G. de Prony). Rappelons que cette méthode qui n'est plus guère utilisée de nos jours, permet, dans le cadre de l'évaluation des différentes valeurs successives que peut prendre une fonction polynomiale de degré n donnée, d'éliminer la multiplication et la division – lesquelles constituent des opérations arithmétiques relativement difficiles à effectuer et donc susceptibles de constituer la source d'erreurs de calcul – en les remplaçant par une opération réitérée plusieurs fois qui s'avère nettement plus facile à exécuter : l'addition. Quelques exemples simples nous aideront sûrement à mieux comprendre le déroulement de ce processus, et donc le fonctionnement du *Difference Engine* #1. Soit alors la fonction polynomiale de premier degré suivante : $f(x) = 2x + 3$. Nous commencerons par évaluer les valeurs prises par $f(x)$ pour n valeurs entières successives, par exemple 0, 1, 2, 3, et 4. En procédant de la sorte, nous obtenons cette série de résultats:

$$- f(0) = 3 ; f(1) = 5 ; f(2) = 7 ; f(3) = 9 ; f(4) = 11.$$

Il est alors possible de construire le tableau suivant:

Valeur de x	$f(x) = 2x + 3$	Colonne des différences (D1) $\Delta^1 f(x) = f(x_1) - f(x_2)$
0	3	-
1	5	2
2	7	2
3	9	2
4	11	2
5	...	...
6	...	...
...
$n - 2$	v	2
$n - 1$	w	2
n	y	2

La première colonne en partant de la gauche correspond à la valeur prise par la variable x (ici x peut prendre ses différentes valeurs dans l'intervalle $I = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots, n\}$). La deuxième colonne correspond aux résultats de la fonction $f(x)$ pour toutes les valeurs que x est susceptible de prendre dans I . La troisième colonne (D1) est appelée la colonne des différences (ou colonne de la série des premières différences puisque ici la fonction f est un polynôme de degré un). La constante numérique c qui y est représentée (ici il s'agit du nombre entier 2), est invariablement calculée en effectuant la *différence* de deux entrées successives (du « bas vers le haut »), figurant dans la colonne titrée « $f(x) = 2x + 3$ ». Ce qui rend la méthode des différences à la fois si pratique et si puissante pour calculer par interpolation les valeurs numériques de fonctions de ce type est un théorème qui stipule que la $n^{\text{ième}}$ différence d'un polynôme de degré n est une valeur constante et que toutes les différences de degré supérieur à n sont égales à 0 : en conséquence, elles peuvent être totalement ignorées. On travaille donc ici avec un ensemble fini de séries de différences. Sur le plan formel, la série des différences est notée $\Delta^1 f(x)$; on aura donc $\Delta^1 f(x) = f(x_1) - f(x_2)$. Si, dans l'exemple qui est le notre, $x_1 = 3$ et $x_2 = 2$, alors les entrées correspondantes dans la colonne $f(x) = 2x + 3$ seront respectivement égales à 9 et à 7. On obtient la valeur constante c de D1 en soustrayant 7 de 9, c'est-à-dire en effectuant la différence suivante : $\Delta^1 f(x) = f(3) - f(2)$. Ce qui donne bien la valeur 2. Une fois la constante c de la colonne des différences D1 clairement identifiée (il faut pour cela calculer $f(x)$ pour n valeurs successives de la variable x puis effectuer la différence $\Delta^1 f(x) = f(x_1) - f(x_2)$ sachant que $x_1 > x_2$), il devient possible de calculer par interpolation les différentes valeurs que peut prendre $f(x)$. En d'autres termes, et à partir de ce point, il ne sera plus du tout nécessaire d'effectuer $f(x)$, autrement dit de faire des multiplications. Les seules opérations qui devront désormais être réalisées seront de simples additions. Nous pourrions par exemple calculer les valeurs de $f(x)$ pour $x = 5$ et $x = 6$. A cette fin, il suffira de se conformer au processus élémentaire suivant : on ajoute tout d'abord la constance c , c'est-à-dire 2, à la valeur préalablement déterminée de $f(4)$, soit 11, ce qui donne 13. La raison d'être de cette méthode consiste précisément à éviter d'avoir à faire cela, mais il suffit pour s'en convaincre de calculer $f(5)$: $(2 \times 5) + 3 = 10 + 3 = 13$. Pour connaître ensuite la valeur de $f(6)$, on ajoute 2 à la valeur de $f(5)$, soit $2 + 13 = 15$. Or $(2 \times 6) + 3$, on le voit, est bien égal à 15. Et ainsi de suite, de manière parfaitement répétitive, jusqu'à $x = n$. S'il arrive que l'on veuille effectivement connaître la valeur y prise par $f(x)$ quand $x = n$, il suffira simplement d'effectuer la sommation des valeurs c et w , c'est-à-dire d'ajouter la valeur de la

constante c au résultat de $f(n-1)$, lequel aura lui-même été déterminé au préalable en ajoutant c à v , quantité qui constitue le résultat de $f(n-2)$...

Valeur de x	$f(x) = 2x + 3$	Colonne des différences (D1) $\Delta^1 f(x)$
0	3	-
...	...	2
4	11	2
5	11 + 2 = 13	2
6	13 + 2 = 15	2
...	...	2
$n - 2$	v	2
$n - 1$	w	2
n	$w + 2 = y$	2

Le cas de figure présenté ci-dessus, on le constate, est très élémentaire. En cela, il ne permet pas de rendre pleinement compte des capacités computationnelles qui étaient celles du *Difference Engine*. Puisque dans cet exemple il s'agissait de déterminer les valeurs successives d'un polynôme de premier degré (l'exposant de x , bien que non représenté, vaut 1), il n'a été possible de déterminer qu'une seule série de différences (la série de différences suivante, Δ^2 , étant égale à 0, il n'est en effet nullement besoin de la prendre en considération). Dans la pratique, la méthode des différences peut être employée pour calculer les valeurs numériques de n'importe quelle fonction mathématique susceptible d'être exprimée sous la forme d'une expression polynomiale simple, c'est-à-dire comme une somme de la forme $a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_1 x + a_0$ où n est un nombre entier positif et où chaque coefficient a_k est un nombre réel. Etant donné que le *Difference Engine* de C. Babbage travaillait uniquement avec des valeurs positives⁴²¹, il n'était en mesure d'additionner et de stocker que des nombres positifs (chaque coefficient a_k devait donc correspondre à un nombre positif). Considérons maintenant

⁴²¹ Il était cependant possible de représenter les nombres négatifs en utilisant la méthode dite des compléments négatifs. Si par exemple il s'avérait nécessaire de faire usage du nombre négatif -137 à un moment ou à un autre du calcul il était alors nécessaire de procéder comme suit : on soustrait - à la main - la valeur -137 à 10^{18} (chacune des sept colonnes que comportait le *Difference Engine* pouvait stocker un nombre de 18 chiffres), soit $1\,000\,000\,000\,000\,000\,000 - 137 = 99,999,999,999,999,863$. Cette dernière valeur est appelée le complément négatif de 137. Si ce dernier nombre (i.e. 99,999,999,999,999,863.), se voit maintenant additionné à un nombre positif, par exemple 263. Le résultat obtenu est $99,999,999,999,999,863 + 263 = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,126$. La valeur 1 figurant à l'extrême gauche de ce grand nombre étant ignorée, ce résultat peut se voir réduit à 126, valeur dont on peut s'apercevoir qu'elle correspond bien au résultat de la soustraction $263 - 137$. L'emploi de cette méthode n'allait cependant pas sans poser de nombreux problèmes puisque les nombres négatifs représentés sous cette forme ne se « comportaient » pas comme de véritables nombres négatifs, ce qui augmentait considérablement les risques d'erreurs.

un polynôme un peu plus complexe, soit la fonction f telle que $f(x) = x^2 + x + 41$. Puisque l'exposant le plus élevé de cette expression est 2, il s'agit d'un polynôme de deuxième degré. On applique alors la même méthode que précédemment seulement ici, il nous faudra déterminer à la suite deux séries de différences. On commence par évaluer normalement $f(x)$ pour les toutes premières valeurs entières successives de x (soit 0, 1, 2, 3 et 4).

Valeur de x	$f(x) = x^2 + x + 41$
0	41
1	43
2	47
3	53
4	61
...	...
$n - 1$	w
n	y

Une fois ces premières valeurs obtenues, il est possible de procéder à l'établissement de la première série Δ^1 de différences de la fonction $f(x) = x^2 + x + 41$. On effectuera donc l'opération suivante : $\Delta^1 f(x) = f(x_1) - f(x_2)$ avec $x_1 = 71$ et $x_2 = 61$, $x_1 = 61$ et $x_2 = 53$, $x_1 = 53$ et $x_2 = 47$, $x_1 = 47$ et $x_2 = 43$ puis enfin $x_1 = 43$ et $x_2 = 41$ (le résultat de la différence $x_1 - x_2$ se voit systématiquement reporté dans la cellule qui figure immédiatement à droite de celle où est inscrite x_1).

Valeur de x	$f(x) = x^2 + x + 41$	Première série des différences $\Delta^1 f(x)$
0	41	-
1	43	2
2	47	4
3	53	6
4	61	8
5	71	10
$n - 2$	v	...
$n - 1$	w	...
n	y	...

Etant donné qu'aucune valeur constante n'a été dégagée ici et puisque $f(x)$, on le sait, est un polynôme de deuxième degré, il est nécessaire de procéder à l'évaluation des valeurs de la seconde série des différences, c'est-à-dire de calculer les différences des différences de la première série. Cette seconde série, notée $\Delta^2 f(x)$, est obtenue en suivant la même procédure qu'au préalable : on soustrait les différentes valeurs adjacentes de Δ^1 les unes des autres (on enlève ainsi 8 de 10, puis 6 de 8, 4 de 6, et enfin 2 de 4).

Valeur de x	$f(x) = x^2 + x + 41$	Première série des différences $\Delta^1 f(x)$	Seconde série des différences $\Delta^2 f(x)$
0	41	-	-
1	43	2	-
2	47	4	2
3	53	6	2
4	61	8	2
5	71	10	2
...
$n - 2$	v	...	...
$n - 1$	w	...	...
n	y	...	...

En calculant $\Delta^2 f(x)$, on constate qu'une certaine régularité apparaît, quatre occurrences successives de la valeur 2 pouvant en effet être relevées. En fait, quelle que soit la valeur n que pourra prendre x , et puisque $f(x) = x^2 + x + 41$ est un polynôme de degré deux, cette observation demeurera toujours vraie (si on calcule la suite de différences $\Delta^3 f(x)$, on obtiendra une série de zéros).

Valeur de x	$f(x) = x^2 + x + 41$	Première série des différences $\Delta^1 f(x)$	Seconde série des différences $\Delta^2 f(x)$
0	41	-	-
1	43	2	-
2	47	4	2
3	53	6	2
4	61	8	2
5	71	10	...
6			
7			

...
$n - 1$	w	...	...
n	y	...	...

Il est donc possible de calculer les valeurs suivantes de x sans ne plus avoir à effectuer aucune multiplication : pour évaluer la valeur de $f(6)$ en n'effectuant strictement que des additions, nous procéderons comme suit : nous savons que pour $f(6)$ l'entrée de la colonne $\Delta^2 f(x)$ sera la constante 2. L'entrée de la colonne $\Delta^1 f(x)$ pour $f(5)$ étant 10, on ajoute à ce nombre la valeur 2, addition dont le résultat est 12. Pour connaître enfin la valeur de $f(6)$, on ajoute alors le nombre 12 à l'entrée correspondant à l'évaluation de $f(5)$, ce qui revient à effectuer 1 addition suivante : $12 + 71 = 83$. On peut ensuite vérifier l'exactitude de ce résultat en effectuant normalement $f(6)$:

$$\begin{aligned}
 f(6) &= 6^2 + 6 + 41 \\
 &= 36 + 6 + 41 \\
 &= 42 + 41 \\
 &= 83.
 \end{aligned}$$

Valeur de x	$f(x) = x^2 + x + 41$	Première série des différences $\Delta^1 f(x)$	Seconde série des différences $\Delta^2 f(x)$
0	41	-	-
...	...	...	2
4	61	8	2
5	71	10	2
6	83	12	2
...	...	...	2
n	y	...	2

De la même façon, on évaluera $f(x)$ pour $x = 7$: $12 + 2 = 14$; $14 + 83 = 97$, sachant bien entendu qu'il demeure toujours possible de vérifier la justesse de l'issue de cette série d'additions en calculant directement cette expression. On pourra ainsi continuer jusqu'à la $n^{\text{ième}}$ valeur de x . La procédure consistant à évaluer des polynômes au moyen de la méthode des différences finies, on l'a vu grâce à ces quelques exemples, est à la fois : 1) très simple et extrêmement récurrente puisque seule l'exécution répétée d'additions est ici requise ; 2) fiable car en éliminant de la sorte les n opérations multiplicatives susceptibles d'être incluses dans

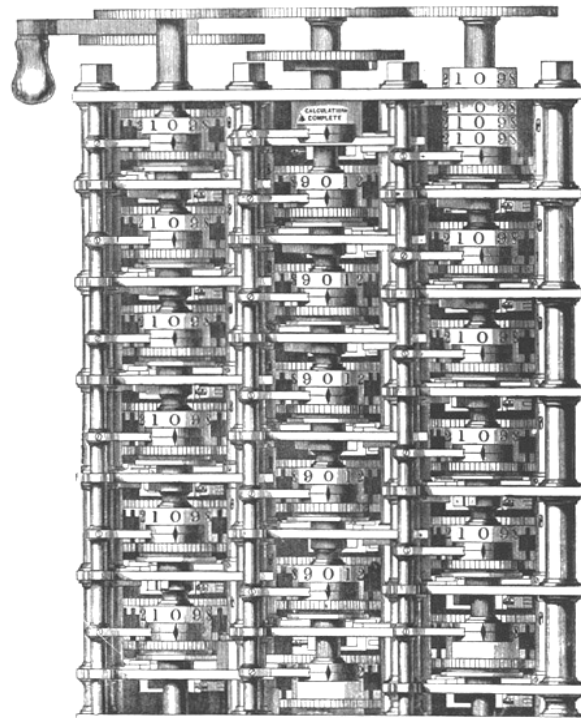
une expression de ce type, on diminue considérablement le risque de voir apparaître des erreurs durant l'effectuation des phases de calcul successives qu'implique son évaluation numérique (on ne supprime toutefois pas entièrement ce risque dans la mesure où la part d'intervention humaine dans le cours de ce processus demeure très importante). Charles Babbage, le premier, comprit que la méthode des différences finies, puisqu'elle était à ce point fiable et itérative, pouvait être *mécanisée*. Etant donné que le calcul des tables mathématiques - dont on a pu mesurer à quel point il constituait à l'époque un enjeu économique et stratégique tout à la fois crucial et délicat - pouvait reposer intégralement sur l'utilisation de cette méthode d'évaluation numérique, cela signifiait que la réalisation de celui-ci pourrait désormais être confiée à un *automate* spécifiquement conçu à cette fin.

Les machines à calculer mécaniques ordinaires qui existaient à l'époque de C. Babbage étaient sensiblement du même type que celles que Pascal et Leibniz avaient construites antérieurement. En d'autres termes, et outre le fait qu'elles ne travaillaient qu'avec des nombres entiers positifs, elles n'étaient capables d'effectuer simultanément qu'une seule opération arithmétique (addition, multiplication, division ou soustraction). Leur usage était donc limité à la solution d'un seul problème en même temps (on ajoute telles ou telles valeurs *ou* on divise telle autre par telle autre *ou* encore on soustrait...). Bien entendu, ceci n'exclue aucunement le fait qu'elles pouvaient être également employées pour évaluer numériquement des expressions complexes. Mais étant donné le *modus operandi* particulier qui était celui de ces instruments mécaniques, calculer un polynôme tel que $x^2 + x + 3$ (avec n valeurs entières passées successivement à la variable x), aurait nécessité que l'on fractionne préalablement cette expression pour se trouver ensuite en mesure de la traiter. Ici, la segmentation en unités élémentaires de calcul n'est guère complexe: 1) il faut évaluer tout d'abord effectuer le produit de x par x ; 2) *recupérer* cette valeur et lui ajouter x (ou 3); 3) *reprendre* la valeur numérique obtenue à l'issue de la phase de calcul précédente et ajouter 3 (ou x), à ce résultat. Dans un pareil cas, et puisque la machine ne pouvait réaliser qu'une seule opération en même temps, son utilisateur était donc contraint d'effectuer trois opérations successivement en prenant soin de bien noter sur un support externe (une feuille de papier par exemple), les résultats intermédiaires produits à chaque étape du processus. Le fait de devoir ainsi consigner à la main ces valeurs numériques puis d'avoir ensuite à les réintroduire manuellement dans la machine pour réaliser le pas de calcul suivant constituait, on s'en doute aisément, une source d'erreurs absolument considérable. L'emploi de ces instruments de calcul, pour utiles qu'ils aient pu être, se révélait donc souvent être à double tranchant.

2.2.4.3. Le *Difference Engine* #1 : description et principes généraux d'opération.

Le *Difference Engine* # 1 (ou D.E. #1), différait grandement des dispositifs mécaniques de calcul élaborés jusqu'alors. Charles Babbage l'avait en effet imaginé et (partiellement) développé dans le but spécifique de disposer d'un instrument de calcul automatique capable de produire en masse, rapidement, efficacement et avec une grande précision, des tables mathématiques qu'il devait en outre être à même « d'imprimer » directement. L'intervention humaine se trouvait par conséquent ici réduite au strict minimum : le rôle de l'opérateur (que Babbage nommait « superintendant mathématique »), se limitait en réalité à entrer les valeurs de départ nécessaires à l'effectuation du calcul de la table, à fournir de l'énergie motrice aux organes de calcul et « d'impression » de la machine par l'intermédiaire d'une manivelle couplée aux pièces de contrôle, et, enfin, à recueillir les résultats terminaux du calcul un fois ceux-ci « imprimés » par le dispositif spécialement conçu à cet effet. Puisqu'il s'agissait là uniquement de calculer des tables mathématiques, les mécanismes multiples constituant le D.E. #1 devaient littéralement « incarner » les algorithmes de la méthode des différences finies ainsi que l'unique opération arithmétique que celle-ci nécessitait pour se voir réalisée, c'est-à-dire l'addition (et le cas échéant la soustraction grâce à l'emploi de la méthode des compléments négatifs). Le D.E. #1, à la différence des autres calculateurs mécaniques de l'époque qui, eux, disposaient de mécanismes spéciaux pour accomplir les quatre opérations arithmétiques élémentaires (une à la fois), n'était donc capable d'effectuer qu'une seule et unique tâche : calculer automatiquement des tables mathématiques complètes. Or pour faire cela, seuls des mécanismes additionneurs étaient indispensables. Nous pourrions donc dire que le D.E. #1 était une sorte de *one kind calculator*⁴²².

⁴²² Ou calculateur ultra spécialisé. Ceci explique d'ailleurs pourquoi certains considèrent que le D.E. #1, en lieu et place de représenter une avancée notoire de la recherche dans le domaine du calcul automatisé en constitue plutôt un recul. Si la machine à calculer de Leibniz ou l'arithmomètre de Charles-Xavier Thomas de Colmar, plus anciens, étaient tous deux capables d'effectuer les quatre opérations arithmétiques, la machine à différences n'en pouvait réaliser en tout et pour tout qu'une seule : l'addition.



E. H. Babbage, del.
Impression from a woodcut of a small portion of Mr. Babbage's Difference Engine No. 1, the property of Government, at present deposited in the Museum at South Kensington.
It was commenced 1823.
This portion put together 1833.
The construction abandoned 1842.
This plate was printed June, 1853.
This portion was in the Exhibition 1862.

Fig. 9 : fac-similé⁴²³ du frontispice de l'édition originale de l'ouvrage biographique de Charles Babbage, *Passages from a Life of a Philosopher*, paru à Londres chez Longman & Co. en 1864. Sur cette gravure, qui ne représente seulement qu'une partie⁴²⁴ du *Difference Engine* #1, sont néanmoins visibles certains de ses mécanismes principaux.

Le *Difference Engine* #1 étant un calculateur mécanique extrêmement complexe - s'il avait été construit⁴²⁵, il aurait en effet comporté plus de 25000 pièces individuelles distinctes - il ne nous sera pas possible ici d'examiner son fonctionnement comme nous l'aurions souhaité, c'est-à-dire de façon véritablement détaillée. Dans ce qui suit, nous nous contenterons d'en décrire les principes opérationnels généraux et d'en étudier les traits qui nous ont semblé être les plus significatifs pour notre présent propos.

⁴²³ Document reproduit ici avec la très aimable autorisation du *Charles Babbage Institute* (Photograph Courtesy of the *Charles Babbage Institute* (C.B.I.), Université du Minnesota, Minneapolis, U.S.A., www.cbi.umn.edu / caseib@tc.umn.edu).

⁴²⁴ Cette gravure représente la partie du D.E. #1 qui fut assemblée en 1832 par Samuel Clément, le mécanicien en chef du projet, par ailleurs dessinateur et artisan de grand talent. Cette tranche du calculateur, aujourd'hui connue sous la désignation très explicite de « *finished portion of the unfinished engine* », correspond en fait à un septième seulement de la machine telle qu'elle aurait été si elle avait été terminée. Le nombre de ses éléments constitutifs est de deux milliers. Il n'est donc que partiellement représentatif de ce qu'aurait été vraiment le *Difference Engine*.

⁴²⁵ En 1822, C. Babbage présenta cependant à ses amis de la R.A.S. un modèle réduit opérationnel du D.E. #1 capable d'opérer sur des nombres à six chiffres et d'évaluer numériquement n'importe quelle expression polynomiale de deuxième degré.

Si la machine de Babbage avait été complétée, elle aurait mesuré 10 pieds en hauteur et en largeur⁴²⁶ (soit 3,048 mètres), et 5 pieds en profondeur (ce qui équivaut à 1,524 mètre). Quant à sa masse, elle aurait très sûrement avoisiné les 4 tonnes. Il se serait par conséquent agi d'un instrument extrêmement imposant sachant que la très grande majorité des dispositifs mécaniques de calcul construits au 18^{ème} siècle et au début du 19^{ème} pouvaient être installés sur une table de dimensions normales. Le *Difference Engine* #1 comprenait deux parties distinctes mais totalement interdépendantes : 1) une partie dévolue au calcul ; 2) une autre dédiée à « l'impression », ou plutôt, pour être exact, à la stéréotypie des résultats finaux⁴²⁷. Concernant la première de ces parties, on commencera par remarquer que la machine, une fois achevée, aurait dû comporter un ensemble principal de sept grands axes verticaux (les axes des différences), réalisés en acier français (trois d'entre eux sont d'ailleurs parfaitement visibles sur la gravure reproduite ci-dessus). Charles Babbage avait opté pour cette disposition verticale des axes porteurs – très inhabituelle alors – en prévoyant que la friction générée par l'opération des nombreux mécanismes de l'appareil serait sûrement moindre que si celle-ci avait été horizontale. Cet agencement original des pièces maîtresses du calculateur, puisqu'il permettait de réduire ainsi de manière appréciable les frottements mécaniques inévitablement engendrés lors de son fonctionnement, autorisait par conséquent une diminution sensible des risques de voir apparaître des dysfonctionnements perturbants tout de même qu'il contribuait aussi à prolonger la durée de vie de ses constituants. Le matériau de base essentiellement employé pour la fabrication des pièces mécaniques mobiles⁴²⁸ du calculateur (hors bien sûr les axes que nous venons de mentionner), était, non pas du cuivre comme on l'affirme parfois, mais un alliage métallique nommé *Gun Metal* dont la composition se trouvait être assez proche de celle du bronze : 85% de cuivre, 12 % d'étain et 3% de plomb ou de zinc, ces derniers métaux ayant été précisément sélectionnés en raison de leur pouvoir auto-lubrificateur (et ce toujours en vue de diminuer les frottements). Chacun des sept axes principaux du calculateur aurait dû comprendre 18 plateaux d'un diamètre de 5 pouces (12,7 centimètres), positionnés les uns au-dessus des autres. Sur la tranche de ces plateaux, dix symboles numériques – 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9 - étaient gravés selon un espacement régulier. Babbage dénomma ces roues *figure wheels* (littéralement « roues à chiffres »).

⁴²⁶ Certains auteurs ont cependant affirmé que la longueur et la largeur du premier *Difference Engine* n'aurait été que de 9 pieds (2, 743 mètres).

⁴²⁷ Dans ce qui suit, nous n'examinerons pas le fonctionnement du module « d'impression » du D.E.#1. Pour donner néanmoins une idée générale de son fonctionnement, nous dirons simplement qu'il s'agissait en réalité d'un dispositif relié mécaniquement à l'arbre des résultats de la machine et qui permettait d'estamper des feuilles de plomb qui devaient ensuite être utilisées pour l'impression des tables qu'elle calculait.

⁴²⁸ Lorsqu'en 1842 Babbage se détourna définitivement de la construction du *Difference Engine* #1 pour se consacrer à la mise au point de l'*Analytical Engine*, près de 12000 pièces avaient déjà été fabriquées.

Chaque colonne (ensemble axe vertical + plateaux), constituait par conséquent une sorte de *registre*, ou *mémoire* mécanique, pouvant servir à la représentation de n'importe quel nombre entier de 18 chiffres exprimé en base décimale, la roue occupant la position la plus basse sur l'arbre permettant de représenter les unités, celle située juste au-dessus de la première, les dizaines, puis les milliers, les dizaines de milliers, et ainsi de suite. Le D.E. #1 ayant été conçu pour calculer successivement jusqu'à six ordres de différences, (sa capacité de calcul⁴²⁹, si on l'exprime sous forme mathématique, était donc égale à $\Delta^7 f(x)-0$), chacune des six premières colonnes de la machine était utilisée pour représenter successivement une de ces séries tandis que la fonction de la septième consistait à stocker les valeurs de l'expression mathématique évaluée. En sus des plateaux numériques « configurables » manuellement, ces axes étaient également destinés à recevoir les mécanismes permettant d'assurer la propagation des retenues qui survenaient fréquemment – additions répétées oblige - dans le courant des calculs. Situé immédiatement derrière les sept colonnes dont nous venons de parler, on trouvait un deuxième ensemble d'arbres qui accueillait les mécanismes additionneurs (les nombres étant additionnés d'une colonne à une autre colonne). Afin de contrôler les mécanismes maîtres de la machine, un ensemble supplémentaire d'axes verticaux supportant un nombre variable de *barrels* - des tambours métalliques sur lesquels étaient vissés de petits éléments amovibles⁴³⁰ - devaient être installés en différents points accessibles du calculateur. Ces dispositifs devaient être mis en opération grâce à la roue directrice biseautée et dentée couplée à la manivelle que l'opérateur devait actionner (en avant ou en arrière), pendant toute la durée du calcul. Un de ces axes, le *Carrying and Intermediate Barrel Axis* (14 tambours), permettait de contrôler à la fois la synchronisation des opérations réalisées par la machine tout de même que les processus de rétroaction indispensables dans un calcul effectué selon le principe de la méthode des différences finies. Un deuxième axe de ce genre, nommé par Babbage *Bolting and Adding Barrel Axis* (12 tambours), en plus d'agir directement sur les dispositifs de verrouillage des différentes parties de la machine, servait à engager ou à désengager les mécanismes additionneurs en fonction de l'état de progression du calcul.

⁴²⁹ En pratique, une machine à même de calculer six ordres de différences aurait disposé d'une puissance computationnelle amplement suffisante pour calculer la plupart des tables mathématiques.

⁴³⁰ Hormis le fait qu'ils étaient pour ainsi dire paramétrables (il était possible de modifier le nombre de leurs picots et/ou leur disposition), on notera que ces tambours ressemblaient fort à ceux utilisés dans certains automates musicaux.

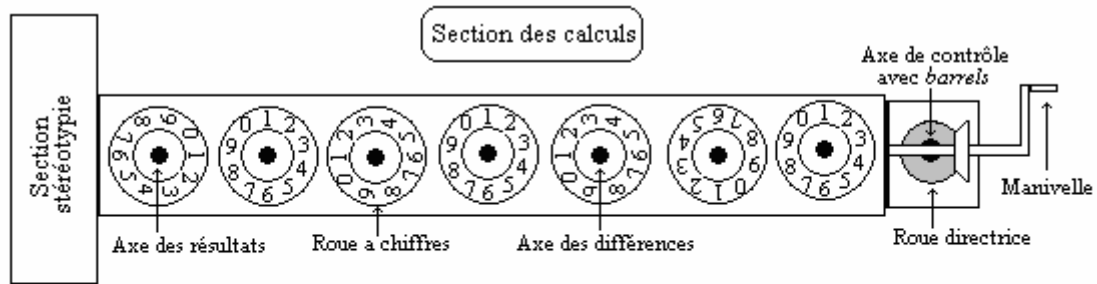


Fig. 10: le D.E.#1 vu de dessus. Adroite, la manivelle qui actionne la roue directrice sous laquelle se trouve un des axes de contrôle à tambours (*barrels*) de la machine. La partie centrale, avec les 7 roues à chiffres et les axes des différences, correspond à la "section" des calculs. A gauche se trouve le dispositif d'impression stéréotypique.

Le fonctionnement du calculateur, pour l'exposer de façon globale, aurait dû obéir à quatre grands cycles distincts, chacun d'entre eux correspondant en fait à un quart de tour de la roue directrice de l'appareil : 1) lors du premier cycle, les nombres représentés par les premier, troisième et cinquième axes des différences étaient respectivement ajoutés aux valeurs stockées sur l'axe des résultats et sur les deuxième et quatrième axes des différences ; 2) au cours du deuxième cycle, les opérations de retenue résultant du premier cycle étaient effectuées ; 3) pendant le troisième cycle les valeurs stockées sur les deuxième, quatrième et sixième axes des différences étaient respectivement ajoutées à celles représentées par les premier, troisième et cinquième axes des différences ; 4) durant le quatrième et dernier cycle, les opérations de retenue survenues durant le troisième cycle étaient effectuées.

En plus de ces divers mécanismes de calcul et de contrôle - dont on ne pourra au passage que saluer le caractère extrêmement ingénieux - il avait été également prévu par Babbage que la machine devrait être pourvue d'un certain nombre d'aménagements complémentaires destinés notamment à sécuriser son fonctionnement. Etant donné que le *Difference Engine #1* était entièrement mécanique et qu'il pouvait ainsi parfaitement arriver que certaines de ses pièces subissent à l'usage un léger déplacement susceptible de fausser les calculs, son concepteur avait songé à le pourvoir de dispositifs de sécurité - principalement des broches et des ressorts - capables de forcer de manière automatique le réajustement des éléments mécaniques accidentellement dessertis. Dans l'hypothèse - parfaitement concevable - où un dysfonctionnement important se serait occasionnellement produit qui n'aurait pu être corrigé par ces moyens, le calculateur se serait alors automatiquement immobilisé, empêchant par là la poursuite des calculs en cours jusqu'à ce que l'origine de l'incident soit localisée et la pièce coupable remise en place, réparée ou purement et simplement remplacée. D'une certaine façon, et ceci nous paraît être une chose véritablement remarquable, le premier

automate mathématique de Babbage était donc capable, toutes proportions gardées s'entend, « d'autocontrôler » en permanence l'intégrité de ses « circuits » mécaniques, de « s'auto-réparer », et, le cas échéant (qui était aussi le pire envisageable), de « signaler » à son opérateur l'apparition d'une complication réellement sérieuse en cessant tout bonnement de fonctionner. En plus de ces étonnants dispositifs de sûreté, Charles Babbage avait également imaginé un certain nombre de méthodes (et de mécanismes correspondants), destinées à accroître la « puissance » de calcul de sa machine à différences⁴³¹. Michael R. Williams a identifié quelques-uns d'entre eux :

« For example, to calculate a table of logarithms, it was necessary to approximate the logarithm function by a polynomial, evaluate this polynomial for about 100 values, then determine a new polynomial for the next portion of the table. The mechanism could be set so that, after a predetermined number of calculations, a bell would ring to inform the operator that it was time to reset the difference wheels for the new polynomial. There were also several adjustments which would enable the device to add any difference, any number of times, to a difference of any other order. This enabled computations of tables which did not have a constant difference but whose fourth difference, say, was some form of geometric series, or tables of astronomical data which fitted observed phenomena but whose analytic solution was not known. A series of comparison units were attached to each axle which would be able to detect when any column contained a specific value. These would then cause an automatic change (positive or negative⁴³²) in the constant, sixth, difference wheels, or ring a bell informing the operator that it was time to make the change⁴³³ ».

⁴³¹ Babbage avait prévu les risques d'erreurs dus à l'accumulation des arrondis pendant le calcul (*round-off error*). Il avait donc fait en sorte que le mécanisme additionneur du calculateur arrondisse, lorsque cela s'avérait nécessaire, le dix-huitième et dernier chiffre représenté sur la dernière roue numérique des axes des différences. En plus de cela, il existait également un dispositif permettant de lier entre eux deux axes pour les faire agir momentanément de concert. Etant donné que la capacité des registres mécaniques se trouvait multipliée par deux, il était donc possible d'effectuer des calculs avec des nombres de 30 chiffres (et non 36), sur trois ordres de différence (au lieu de six en temps normal).

⁴³² Les termes employés ici par l'auteur – *i.e. positive or negative (change)* – peuvent prêter quelque peu à confusion. Nous avons en effet précisé plus haut que le D.E. #1 ne pouvait représenter des nombres entiers négatifs (en tout cas autrement que par la méthode des compléments négatifs). Concernant ce changement imprimé automatiquement aux roues numériques de la colonne des différences constantes (axe n°6), si une condition prédéterminée était remplie, il est préférable de traduire *positive* par « dans le sens des aiguilles d'une montre » et *negative* par « dans le sens inverse des aiguilles d'une montre ».

⁴³³ In [Williams, 1997], p. 168.

Dans les deux cas de figure évoqués ci-dessus par M. R. Williams⁴³⁴ (calcul d'une table de logarithmes ou bien encore évaluation de tables mathématiques ne présentant pas une série de différences constante), il est essentiel de prendre bonne note du fait que le comportement futur de la machine à différences devait être entièrement déterminé par la détection automatique, via des « unités de comparaison », d'une *condition* particulière préétablie survenue dans le cours du calcul. Si, à un moment donné ou à un autre, cette condition se trouvait effectivement remplie (*i.e.* si la machine parvenait à un certain état interne spécifié à l'avance par le superintendant mathématique), une cloche asservie au calculateur devait retentir afin de provoquer sans tarder l'intervention de son opérateur (laquelle intervention se traduisait généralement par un réajustement des valeurs représentées par les roues numériques de tout ou partie des axes des différences ainsi que par une relance de l'appareil). Bien qu'il soit effectivement ici question d'*arrêt conditionnel*⁴³⁵, soit *un* des attributs logiques impérativement nécessaire pour définir la notion de *programme* en tant que telle, la présence de cette disposition particulière au cœur de la machine de Babbage est en réalité très loin de s'avérer suffisante pour défendre l'idée selon laquelle ce calculateur mécanique était contrôlé au moyen d'un programme. Le D.E. #1, en effet, n'était pas programmé mais bel et bien contrôlé par l'intermédiaire d'une séquence « d'instructions » (représentées par le nombre et les positions des picots présents sur les *barrels* de contrôle). En cela, et à quatre exceptions notables près, la plupart des points que nous nous sommes trouvés en mesure de spécifier en vue de rendre compte du fonctionnement logique du petit automate musical examiné plus haut peuvent, *mutatis mutandis*, lui être apposés (la séquence d'opérations effectuée par l'automate, une fois les tambours de contrôle chargés, est toujours la même ; le type du calcul réalisé n'influence en rien le *modus functionale* de l'automate ; chaque bit de contrôle des *barrels* sert à la commande d'un mécanisme individuel de l'automate; il n'existe pas de retour de l'*output* sur le dispositif de contrôle). Les quatre différences capitales qui permettent toutefois de distinguer radicalement le calculateur de Babbage de ce dernier (hormis bien entendu le fait qu'il s'agit dans ce cas d'un automate mathématique et non plus d'un moulin à musique), sont les suivantes : 1) la machine disposait de mémoires ou registres mécaniques – à savoir les axes des différences – qui autorisaient non seulement le stockage des valeurs initiales, intermédiaires et finales qui s'y trouvaient représentées mais aussi leur modification (hors celle du résultat final); 2) elle était capable de

⁴³⁴ Il va de soi que ce que nous allons dire maintenant ne se limite pas uniquement à ces deux exemples particuliers.

⁴³⁵ Par exemple : *si* la troisième roue à chiffres du sixième axe des différences est incrémentée de telle sorte qu'elle finisse par atteindre la valeur 9 *alors* la machine s'arrête (et la cloche carillonne).

stopper automatiquement sa marche et d'avertir son opérateur si et seulement si une certaine *condition* préalablement établie par ce dernier se trouvait effectivement rencontrée durant la computation: le déroulement normalement continu des différents cycles de la séquence de contrôle pouvait être ainsi interrompu par l'occurrence, pendant le calcul, d'un événement numérique particulier préfixé (*i.e.* d'un état spécifique du calculateur); 3) le D.E.#1, pour fonctionner, reposait fondamentalement sur l'accomplissement séquentiel de processus *rétroactifs*: au cours de la réalisation du premier cycle d'opération (soit à l'instant t_1), on a vu que les nombres représentés par les premier, troisième et cinquième axes des différences devaient être ajoutés à ceux représentés par les deuxième, quatrième et sixième axes. Une fois les éventuelles retenues apparues pendant cette première phase de calcul ajoutées à ces résultats numériques intermédiaires (ce qui correspond au deuxième cycle de la machine ou à l'instant t_2), les valeurs représentées par les deuxième, quatrième et sixième axes, de façon *rétroactive*, étaient additionnées à celles représentées par les premier, troisième et cinquième axes des différences (instant t_3). En d'autres termes, cela signifie que non seulement l'état interne du calculateur à un instant t donné dépendait en permanence de ses états précédents mais qu'en plus de cela, les valeurs entrées à l'instant t_0 (soit durant la phase d'initialisation du calculateur), et qui avaient servi à calculer celles déterminées aux instants t_1 puis t_2 étaient en retour modifiées par ces dernières à l'instant t_3 . En dépit peut-être des apparences, on ne saurait cependant affirmer ici de manière légitime que l'*output* du calculateur pouvait servir à modifier directement son *input* puisque c'est bien au cours du troisième cycle de computation - et non à la fin du quatrième et dernier cycle machine, lequel produisait effectivement l'*output* de la machine - que les valeurs employées pour initialiser le D.E. #1 étaient altérées par celles qu'elles avaient permis de calculer durant les première et deuxième phases d'opération. A un moment donné de la procédure de calcul (en l'occurrence t_3), il est exact que les valeurs d'entrée de la machine étaient bien modifiées *automatiquement*, mais les nombres qui leur étaient additionnés par *feedback* à ce moment précis ne correspondaient aucunement aux valeurs de sortie de l'automate. Il s'agissait seulement de résultats intermédiaires permettant de calculer cet *output* au cours de l'étape suivante; 4) enfin, caractéristique logique toute aussi fondamentale que celles dont nous venons de parler, l'*output* calculé par la machine pouvait être récupéré et utilisé afin de constituer un nouvel *input*. La sortie de la machine n'était donc pas la même chose que son entrée (si les valeurs obtenues en *output* devaient être toujours identiques aux nombres spécifiés en *input*, à quoi bon alors effectuer ces calculs? A quoi bon encore construire une machine pour les effectuer?). Il nous faut néanmoins observer que cette procédure ne s'effectuait pas de façon

automatisée puisque l'intervention de l'opérateur humain, systématiquement, était exigée afin de « réinjecter » sur le premier axe des différences le résultat de l'évaluation préalablement effectuée.

La modalité de contrôle du *Difference Engine #1*, de par son admirable sophistication, différait considérablement de celle, nettement plus élémentaire, d'une machine comme le moulin à musique. Pourtant, dans l'un et l'autre cas, il s'agissait bel et bien d'automates contrôlés par séquence et non pas d'instruments programmés. Il est vrai que certains des traits logiques et techniques du premier calculateur de Babbage – comme le fait qu'il disposait de registres, que des valeurs stockées par ces mémoires mécaniques pouvaient être modifiées par *feedback* durant le calcul ou encore qu'il pouvait détecter si oui ou non une certaine condition se trouvait satisfaite puis « agir » en conséquence - peuvent effectivement laisser penser qu'il pouvait être programmé. La possession de l'ensemble de ces caractéristiques spécifiques est en effet nécessaire pour que l'on puisse parler de programme. Cependant elle est loin d'être suffisante. Pour que l'on se trouve en mesure d'affirmer légitimement que le D.E. #1 était un automate programmable, il aurait fallu non seulement que celui-ci soit capable d'utiliser par *rétroaction* et *automatiquement* son *output* comme *input* mais, en plus de cela, il aurait été également nécessaire que son *output*, toujours de manière *rétroactive*, puisse servir à modifier *automatiquement* sa séquence de contrôle. En d'autres termes, et sans qu'aucune forme d'intervention humaine soit jamais nécessaire, il aurait fallu que la série de nombres obtenus à l'issue d'un calcul puisse être réutilisée directement par la machine pour accomplir une autre computation et qu'elle permette en outre de modifier par *feedback* la configuration initiale de ses organes de contrôle pour autoriser par exemple la réalisation d'un *branchement conditionnel*. Or tel n'était pas le cas : le D.E. #1 ne pouvait donc être programmé.

Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer à plusieurs occasions, les concepts de « programme » et de « séquence de contrôle » tout de même que ceux de « programmable » et de « contrôlé par séquence » sont très différents les uns des autres. Pourtant, et malgré les dissemblances qui les séparent radicalement, ces notions sont en même temps extrêmement proches (puisque en définitive c'est par le truchement de la séquence ou du programme qu'un automate peut être contrôlé). Dans la littérature dédiée à l'histoire de l'informatique, ou plus largement à celle des instruments de calcul, une certaine pratique – qui est somme toute fort courante - va même jusqu'à consacrer l'usage des vocables « programme » ou « programmable » pour qualifier la façon dont les machines à calculer pouvaient être contrôlées, qu'il se soit agi effectivement d'instruments disposant d'un programme, c'est-à-dire finalement d'ordinateurs, ou bien alors, ce qui n'est plus du tout la même chose,

d'automates mathématiques contrôlés au moyen d'une séquence d'instructions (comme l'étaient par exemple le D.E. #1 ou l'I.B.M. A.S.C.C.). Le fait que cette assimilation soit chose relativement ordinaire constitue en réalité un précieux révélateur de la proximité conceptuelle de ces termes en même temps qu'une pratique qui tend à estomper, voire à faire totalement disparaître, leurs différences essentielles (cette substitution se faisant bien entendu au profit de la notion actuelle de programme). Si nous acceptons, ne serait-ce que provisoirement, de nous ranger à cette vue, alors nous pourrions dire qu'il n'existe pas de réelle différence entre un contrôle par « programme » - ou ce qui est conçu ici comme tel - et un contrôle par séquence dépourvu de processus de *feedback* : en effet, dans les deux cas, l'*output* produit par l'automate, quel qu'il soit, demeure toujours le même et ne peut pas être utilisé pour modifier sa suite d'instructions. Le mode opératoire du premier *Difference Engine*, nous l'avons vu, impliquait bien une procédure automatisée de rétroaction, mais celle-ci ne permettait pas l'utilisation directe des valeurs numériques produites en sortie du calculateur comme valeurs d'entrée pour un nouveau processus de computation et encore moins la modification de sa séquence de contrôle durant ou à la fin d'un calcul. Or si ces conditions nécessaires ne se trouvent pas remplies d'une façon ou d'une autre, il n'est aucunement permis de parler de programme car c'est bien à un automate contrôlé par séquence, et non à une machine programmable, que l'on a affaire.

La machine à différences de Babbage, justement parce qu'elle était capable de *feedback*, était bien plus proche d'une machine programmée que ne l'étaient par exemple les automates de Vaucanson ou bien encore les machines musicales à cylindres. Mais en dépit de sa nature absolument admirable et de toutes les caractéristiques techniques inédites qu'introduisait, il s'agissait encore d'un automate contrôlé par séquence.

2.2.4.4. Du *Difference Engine* #1 à l'*Analytical Engine*.

Le premier plan connu de l'*Analytical Engine* (A.E.) est daté du mois de septembre 1834. A cette période, et bien qu'il ait renoncé à recourir aux services inestimables de Samuel Clement, Charles Babbage se trouvait encore en position de pourparlers avec les autorités anglaises pour la poursuite du développement du *Difference Engine* (lequel était de toute façon propriété du gouvernement britannique depuis le mois février 1830). C'est en fait peu de temps après que le fragment du *Difference Engine* ait été assemblé et testé que Babbage conçut les idées absolument révolutionnaires qui le conduisirent à imaginer l'*Analytical*

Engine. Choissant de faire contre mauvaise fortune bon coeur, il profita du fait que Clement lui avait momentanément soustrait les plans du D.E. #1 pour tenter de repenser le design de ce calculateur et surtout d'en parfaire la flexibilité (initialement tout au moins, il n'était nullement dans son intention de faire *tabula rasa* de ce tout qui avait été accompli auparavant). Travaillant au perfectionnement de l'architecture de son calculateur, Babbage en vint peu à peu à réaliser que la mise en place appropriée de quelques éléments de connexion supplémentaires, en d'autres termes de quelques rouages de transmission adéquatement positionnés, permettrait de faire en sorte que les valeurs représentées sur l'arbre des résultats puissent être automatiquement réutilisées pour modifier celles représentées par les roues numériques du dernier axe des différences. Dans un premier temps, cette disposition totalement inédite des éléments de la machine – que Babbage avait d'ailleurs surnommée « *the engine eating its own tail* » - devait entraîner deux mutations radicales : 1) sur le plan de l'agencement matériel de la machine tout d'abord : pour des raisons d'ingénierie, l'introduction de ce nouveau processus de *feedback* dans la boucle opérationnelle de la machine nécessitait que la disposition de ses éléments mécaniques essentiels obéisse à un schème organisationnel circulaire et non plus linéaire, comme cela avait été précisément le cas avec le *Difference Engine* ; 2) sur le plan mathématique maintenant : ce design original et ce qui en avait conditionné la conception, c'est-à-dire la possibilité à la fois théorique et matérielle d'un reflux des résultats des opérations vers leur source, signifiaient qu'il devenait désormais possible de calculer automatiquement des tables mathématiques dont les fonctions ne possédaient pas de solution analytique élémentaire. En définissant cette solution architecturale inédite, Babbage était en réalité parvenu à accroître considérablement l'étendue du domaine computationnel de son calculateur. Mais ce n'est pas tout. Cette deuxième machine devait en effet être capable d'effectuer non plus seulement l'addition, comme cela avait été le cas auparavant, mais bien la totalité des opérations arithmétiques. Cette caractéristique particulière lui conférait par conséquent une puissance de calcul que n'avait jamais possédée sa devancière. Avec cela, l'*Analytical Engine* ne constituerait plus l'expression ou l'incarnation mécanique d'un seul et unique théorème de l'analyse, à savoir celui de la méthode des différences finies, mais posséderait au contraire toute la généralité et toute la puissance permises par les quatre opérations fondamentales de l'algèbre et leurs infinies combinaisons. En ce sens, et selon l'expression d'Ada Augusta Lovelace, l'A.E. était bien un « *embodying of the science of operations* », c'est-à-dire une concrétisation matérielle de l'arithmétique. C'est là précisément ce qui en faisait une machine de la nature la plus générale.

Babbage poursuivit plus avant l'exploration des potentialités recelées par ce nouveau concept pendant quelques mois encore et c'est très probablement à la fin de 1834 ou au tout début de l'année 1835 qu'il fit une découverte fondamentale – peut-être conviendrait-il mieux de dire ici qu'il eut une sorte de révélation – qui, de son propre aveu, n'eut de cesse de le surprendre à partir de là. En travaillant, il commença en effet à réaliser que les registres mécaniques du type de ceux qu'il avait utilisés pour représenter les valeurs numériques sur le *Difference Engine* (i.e. les axes des différences), étaient en fait des *unités autonomes parfaitement identiques* les unes aux autres. En conséquence, et plutôt que de continuer à appréhender ces mécanismes comme des dispositifs autorisant simplement l'addition d'une certaine quantité à une autre (représentée par leur voisin immédiat), il était à présent possible de les considérer comme de véritables « magasins » à nombres (*storehouse of numbers*), sachant en outre que les valeurs entreposées de la sorte pouvaient parfaitement se voir transférées d'un registre à n'importe quel autre sans nécessairement faire l'objet d'un quelconque traitement arithmétique. L'implémentation de nouveaux processus de rétroaction dans la machine avait nécessité l'adoption d'une architecture circulaire, la circularité avait permis la saisie intellectuelle de l'identité fondamentale partagée par certains des mécanismes les plus essentiels de l'automate arithmétique et cette unité, à son tour, avait conduit à l'obtention d'une puissance et d'une généricité mathématiques jamais atteintes jusque-là dans la sphère des machines à calculer. Si le D.E. #1 était un *special purpose calculator*, c'est-à-dire un automate mathématique capable de réaliser un type unique de calcul, l'A.E. serait un *general purpose calculator*. La teneur du courrier que Babbage expédia dans le courant du mois de mai 1835 à l'astronome et mathématicien belge Adolphe Quételet démontre à quel point il se montra lui-même extrêmement surpris par la portée extraordinaire de sa découverte : « ... *for six months [I have] been engaged in making the drawings of a new calculating engine of far greater power than the first. I am myself astonished at the power I have been enabled to give to this machine; a year ago I should not have believed this result possible.*⁴³⁶ ».

Pendant tout le restant de son existence, Charles Babbage continua à travailler au développement de sa machine analytique, concevant de nouveaux composants et s'efforçant de corriger et d'améliorer le dessin des anciens. Ce formidable instrument de calcul, cependant, en demeura toujours au stade de pur exercice théorique dans la mesure où aucune

⁴³⁶ Cité in Herman Berg, *On locating the Babbage-Quetelet Letters, Annals of the History of Computing*, Vol. 14, n°1, pp. 6-8, 1992.

partie importante de l'A.E. ne fut jamais intégralement construite⁴³⁷. A l'instar du *Difference Engine #1* il devait donc s'agir uniquement ici – nous empruntons l'expression à Jean-Claude Beaune⁴³⁸ - d'une « utopie positive ». Comme de bien entendu, le prestigieux inventeur ne tarda guère à porter à la connaissance du gouvernement britannique le résultat de ses récents travaux en arguant que la construction de la nouvelle machine, incomparablement plus puissante et de portée plus générique que le *Difference Engine #1*, coûterait bien moins cher et durerait nettement moins longtemps que le simple achèvement de la première. Est-il réellement besoin de préciser ici que sa nouvelle proposition – qui de part sa nature même s'inscrivait nécessairement dans une sorte de rapport concurrentiel avec la première machine à différences - fut accueillie plutôt fraîchement par les autorités anglaises ?

2.2.4.5. Design et modalités de fonctionnement de l'*Analytical Engine*.

Pour nous autres, philosophes et historiens de l'informatique, l'invention de l'*Analytical Engine* représente incontestablement l'un des moments les plus cruciaux qui puisse être appréhendé dans toute l'histoire des instruments de calcul automatiques. En effet, si l'A.E. était plus proche des grands calculateurs électromécaniques fabriqués pendant la deuxième guerre mondiale qu'il ne l'était en réalité de l'ordinateur, force nous est pourtant faite de constater qu'il possédait déjà – sous une forme élémentaire s'entend - nombre de ses caractéristiques logiques et techniques. Entre la fin de l'année 1834, date à laquelle il commença effectivement à travailler sur sa nouvelle machine, et 1871, année où il décéda, Babbage ne cessa d'apporter des modifications plus ou moins notables au design original de l'A.E. Il va de soi que cela ne contribue certes pas à faciliter l'entreprise visant à faire la description de cette machine. De plus, et contrairement à ce qu'il avait fait pour le *Difference Engine # 1* dans son *Treatise on the Economy of Machinery*, Charles Babbage ne détailla que très succinctement le fonctionnement de ce nouveau calculateur sous forme écrite⁴³⁹. Le seul et unique compte rendu précis de ce genre jamais réalisé de son vivant résulta en fait de la

⁴³⁷ Dans *Babbage's Analytical Engine*, un article qu'il signa au mois d'avril 1910 dans les *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (n° 70, pp. 517-526, 8 avril 1910), le Major General H. P. Babbage précise que son père, quelques années seulement avant sa mort, avait entrepris de fabriquer la section de l'*Analytical Engine* qu'il nommait le *Mill* (le moulin) et qui était destinée à effectuer les opérations d'addition, de soustraction, de multiplication et de division. A partir de 1880, H. P. Babbage reprit le travail de son père et acheva avec succès la construction du *Mill* en 1888.

⁴³⁸ In [Beaune, 1980], p. 215.

⁴³⁹ Il consacra notamment le huitième chapitre de son ouvrage autobiographique *Passages from the Life of a Philosopher* à une présentation assez générale de l'*Analytical Engine* (cette section était intitulé *Of the Analytical Engine*).

transcription d'une conférence sur l'*Analytical Engine* qu'il donna au moins d'août 1840 à Turin. Ce travail assurément précieux – et sur lequel nous ne manquerons pas de nous appuyer par la suite - fut publié en langue française à Genève⁴⁴⁰ au mois d'octobre 1842, et consigné originellement⁴⁴¹ par l'officier du corps des ingénieurs militaires italiens Luigi Federico Menabrea (par ailleurs futur Premier Ministre de l'Italie unifiée par Giuseppe Garibaldi).

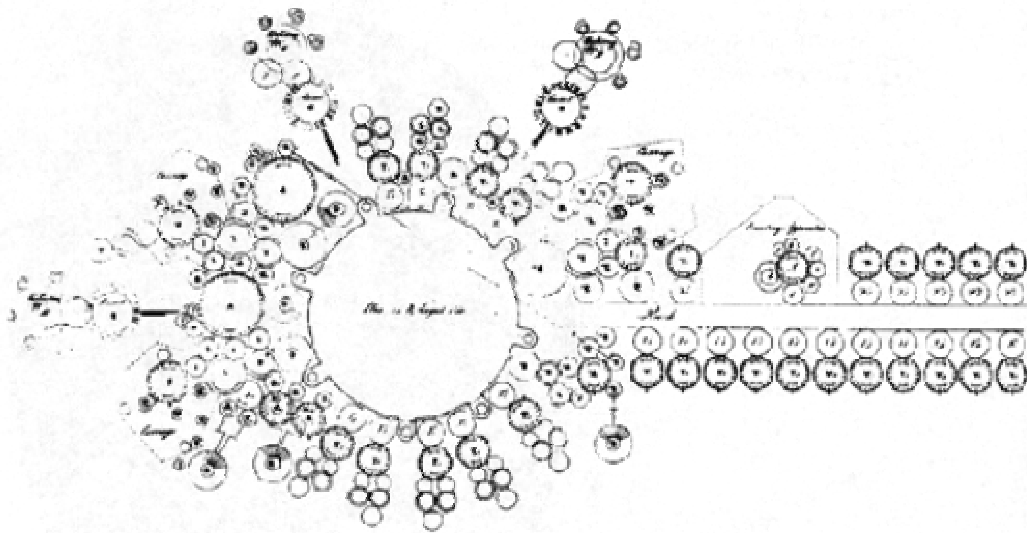


Fig. 11: reproduction d'une lithographie originale de Charles Babbage présentant l'*Analytical Engine* en vue de dessus.

Quoiqu'il en soit, il apparaît en définitive qu'en 1840, le design et l'organisation de la majorité des composants mécaniques essentiels de la machine avait été définis tandis que la plupart des modifications qui survinrent après cette date peuvent être - et sont généralement - considérées comme des amendements mineurs. En conséquence, c'est à cette « version » de l'A.E. que nous nous référerons préférentiellement afin de tenter d'en comprendre les modalités fondamentales d'opération. Le diagramme présenté ci-dessus représente l'architecture de l'*Analytical Engine* telle que fixée par Babbage aux alentours de l'année 1840. Si elle avait été construite à cette époque, on estime que quelques-unes des dimensions de cette machine auraient très vraisemblablement été les suivantes : pour l'ensemble, 15 pieds de hauteur (ce qui correspond à 4,572 mètres). Le *Mill* (la partie circulaire du calculateur),

⁴⁴⁰ Luigi Federico Menabrea, *Notions sur la machine analytique de Charles Babbage*, Bibliothèque Universelle de Genève, n°82, Octobre 1842.

⁴⁴¹ Ada Augusta, Comtesse de Lovelace et fille du fameux poète britannique Lord Gordon Byron, traduisit en anglais et compléta de nombreuses annotations l'édition helvétique de l'article de L. F. Menabrea. Ce texte traduit et retravaillé paru pour la première fois au mois d'août de l'année 1843 dans le cadre de l'édition de ses *Scientific Memoirs* (t. 3, pp. 666-731).

aurait eu 6 pieds de diamètre (1, 82 mètres). Quant à la partie droite de la machine (nommée *Storehouse*), sa longueur aurait sûrement atteint entre 10 et 20 pieds (soit entre 3,048 et 6.096 mètres). Outre bien entendu l'organisation circulaire des éléments de sa section gauche, on ne manquera pas de remarquer l'étonnante complexité du dispositif (sur ce plan déjà, le différentiel avec le *Difference Engine #1* est réellement frappant). Plus de 200 arbres et roues à chiffres composent en effet cet arithmomètre (notons que la disposition verticale des axes a été conservée, toujours dans la perspective de maximiser la diminution des frottements mécaniques des éléments survenant pendant le fonctionnement de l'automate). Plus haut, nous nous souvenons que nous affirmions que la complexité du *Difference Engine #1* nous interdisait d'en décrire de façon véritablement détaillée le fonctionnement. Bien entendu, ce qui pouvait être allégué à propos de la machine à différence vaut *a fortiori* pour la machine analytique. Fort heureusement, nombre des éléments qui figurent sur cette lithographie correspondent en réalité à des éléments de contrôle. En tant que tels, ils peuvent être purement et simplement négligés sans pour autant que la compréhension du fonctionnement général de la machine risque d'en pâtir.

La machine comportait trois parties ou sections principales :

1. Le *Storehouse*, ou « magasin à nombres ». Il s'agissait là de la *mémoire* de l'automate (les nombres représentés par l'un des 16 registres mécaniques que comprenait le *Storehouse*, nous l'avons dit, pouvaient être transférés de l'un à l'autre sans forcément subir entre-temps de transformation mathématique). Ses éléments constitutifs étaient distribués parallèlement et de manière *linéaire* (deux ensembles dépendants de registres se faisant face l'un à l'autre).
2. Le *Mill*, ou « moulin », sorte d'*unité arithmétique* mécanique, qui permettait l'effectuation automatique de l'addition, de la multiplication, de la soustraction et de la division. Son organisation était *circulaire*.
3. Les *Control Barrels*, c'est-à-dire les tambours de contrôle que l'on pourrait comparer, ainsi que le suggère Michael R. Williams⁴⁴², à des unités de contrôle par microprogramme.

⁴⁴² In [Williams, 1997], p. 179.

La fonction du *Storehouse*, en fait un ensemble de seize axes verticaux à roues numériques différant sensiblement⁴⁴³ de ceux qui avaient été employés sur le *Difference Engine* #1, consistait à permettre le stockage des quantités devant être traitées et produites au cours des calculs. A ce sujet, il est extrêmement intéressant de remarquer que Babbage avait dès le commencement pris le soin de concevoir ce dispositif de telle sorte que des axes supplémentaires puissent aisément lui être adjoints afin d'en accroître la capacité de stockage. Il semble que l'intention finale de Babbage ait été de doter son calculateur de cinquante registres de ce type à même de stocker cent nombres de quarante chiffres⁴⁴⁴ chacun (ce qui permet au passage de comprendre pourquoi il demeure relativement difficile de préciser avec certitude quelle aurait été réellement la longueur du *Storehouse*). Une certaine forme d'évolutivité matérielle destinée à étendre la capacité représentationnelle du calculateur – autrement dit sa mémoire – avait donc été envisagée ici par son inventeur. Un mécanisme additionnel nommé *Counting Apparatus*, littéralement « appareil de comptage », était couplé à cette unité mémorielle primordiale qui autorisait le comptage des itérations d'une opération arithmétique par incrémentations successives. Il était ainsi possible de tester si une condition donnée – par exemple : telle opération a-t-elle été effectuée n fois et si non poursuivre la réalisation du processus jusqu'à ce que tel soit le cas - se trouvait ou non effectivement remplie. Ainsi sa fonction ne différait-elle guère de celle des boucles logicielles de comptage – comme FOR...NEXT ou WHILE...DO - que nous utilisons fréquemment dans le cadre des langages de programmation de haut niveau. Le *Storehouse* était mécaniquement couplé au *Mill*, de loin la section la plus complexe et la plus imposante du calculateur. En plus des dispositifs permettant la réalisation des quatre opérations arithmétiques élémentaires, le « moulin » comportait différentes structures mécaniques, comme des propageurs de retenues, des accumulateurs et des « tables » (T_1, T_2, \dots, T_9), toutes appelées à entrer en jeu, à un moment donné ou un autre lorsque la machine était mise en opération. Les accumulateurs principaux, au nombre de trois, servaient de registres mémoire temporaires. Les dispositifs mémoriels de l'arithmomètre de Babbage n'étaient donc pas concentrés en un seul et même point de la machine mais plutôt distribués – il est vrai inégalement - sur l'ensemble de ses sections. Deux de ces accumulateurs étaient dédiés au stockage des opérandes tandis que le

⁴⁴³ Ces axes étaient indexés de la sorte : V_0 pour le premier d'entre eux, V_1 pour le deuxième, V_n pour le $n^{\text{ième}}$, ..., et V_{15} pour le dernier. A la différence des registres mécaniques utilisés sur le D.E. #1 et qui n'étaient capables de stocker qu'un seul nombre, ceux de l'*Analytical Engine* avaient été conçus pour en stocker deux simultanément.

⁴⁴⁴ Jean-Claude Beaune, avec raison, avance d'autres chiffres. Ainsi écrit-il « ... la machine de Babbage [enchaîne] les opérations jusqu'à prétendre effectuer un calcul sur 1000 nombres de 50 chiffres », in [Beaune, 1980], p. 215. Il semblerait effectivement que dans certains de ses écrits, Babbage ait évoqué l'idée d'étendre autant les capacités computationnelles de son arithmomètre.

troisième servait à la gestion des différents pas de calculs impliqués par les opérations de multiplications. Les « tables » – en réalité un ensemble de neuf axes à roues numériques – se trouvaient sollicitées lorsque des opérations de division et de multiplication devaient être calculées. Quant une multiplication de la forme $a \times b$ se présentait, les neuf premiers multiples de a (soit $a, 2a, \dots, na, 9a$), étaient respectivement stockés sur chacun de ces arbres puis l'un de ces produits intermédiaires était ajouté au registre des résultats de la machine en fonction de la valeur courante prise par le multiplicateur (b). Enfin, nous évoquerons les *Control Barrels*. Il s'agissait de volumineux cylindres de contrôle à picots en apparence similaires à ceux employés sur le *Difference Engine #1* ou, plus généralement, sur les automates musicaux. Ceci précisé, il nous faut immédiatement ajouter qu'ils étaient en réalité assurément plus sophistiqués que les deux types de tambours que nous venons de citer. Tout d'abord, les cylindres de contrôle de l'A.E. étaient capables d'accomplir un mouvement rotatif double: ils pouvaient ainsi pivoter selon le sens des aiguilles d'une montre ou bien alors dans le sens contraire. Ensuite, leur fonction consistait à implémenter *physiquement* les routines ou suites de « micro-instructions » nécessaires à l'exécution des opérations arithmétiques élémentaires requises par les calculs. Les picots ou les clous (*studs*), dont était garnie leur enveloppe permettaient ainsi d'actionner les tiges de contrôle (*control rods*), utilisées en vue de procéder à l'engagement ou au désengagement des différents leviers et trains d'engrenages commandant la mise en œuvre des mécanismes correspondant précisément à ces « instructions ». Enfin dernier point, mais très sûrement un des plus remarquables et des plus intéressants qui soit susceptible d'être relevé ici, ces tambours possédaient en sus de cette fonction directrice la capacité additionnelle de se voir configurés de manière à pouvoir automatiquement pivoter, après exécution du pas de la « micro-instruction » en cours, vers une nouvelle position : celle correspondant à l'étape suivante de cette « micro-instruction ». Bien évidemment, tout ceci était exclusivement réalisé par l'entremise de complexes dispositifs mécaniques et il n'existait rien dans l'A.E. qui fut de nature aussi « immatérielle » que ce que nous désignons habituellement sous l'appellation générique de « logiciel ». Et pourtant la comparaison avec la structuration des instructions informatiques - ou plutôt des micro-instructions, lesquelles sont stockées sur des supports mémoires inaltérables⁴⁴⁵ et non des RAM. - vaut largement la peine d'être effectuée tant elle se révèle instructive (à la condition toutefois qu'elle ne soit pas exagérément filée). Paolo Zanella et Yves Ligier définissent l'instruction machine de la sorte: « [Elle] doit fournir au

⁴⁴⁵ C'est-à-dire des R.O.M., acronyme signifiant *Read Only Memory* ou « mémoire en lecture seule ».

*cpu toutes les informations pour déclencher une opération élémentaire. Elle doit contenir un code opération qui est essentiel pour spécifier le type d'action demandé. En outre, elle doit contenir une ou plusieurs adresses, par exemple, l'adresse de l'opérande (ou des opérands), l'adresse où envoyer le résultat, l'adresse où chercher l'instruction suivante*⁴⁴⁶... ».

Les « instructions » supportées par les cylindres de contrôle (*i.e.* les séries individuelles de picots positionnés sur la surface verticale des tambours), ne possédaient il est vrai que très peu de choses en commun avec les instructions ou les micro-instructions à champs multiples que nous connaissons et qui nous permettent, comme on le sait, de piloter les machines informatiques modernes. Il apparaît cependant possible de se les représenter comme un type d'instructions élémentaires à deux champs dont le premier, sorte de code opérationnel, permettait d'agir directement sur les organes de contrôle dirigeant les différents mécanismes de calcul ou de stockage de l'A.E. et le second de renvoyer à la position (et non l'adresse !), du pas d'« instruction » subséquent. On peut donc dire qu'il s'agissait là d'une forme primitive de *pointage* permettant de réaliser, sur les modes matériel et positionnel, un type très élémentaire d'adressage direct. Du fait de son architecture logique inédite, de l'agrégation et de la mise en synergie de l'ensemble de ses constituants originaux, bref de tout ce qui rendait possible sa très grande généralité arithmétique, l'*Analytical Engine* était un calculateur appelé à introduire une rupture absolument décisive dans la longue lignée des machines à calculer mécaniques qui, du premier calculateur de Wilhelm Schickard à l'arithmomètre de Charles Xavier Thomas de Colmar en passant bien entendu par la *Pascaline* de Blaise Pascal, le multiplicateur de Gottfried W. Leibniz, l'additionneur de Samuel Morland ou bien encore la « machine d'arithmétique » de René Grillet, avaient été conçus et réalisés pendant plus de deux siècles. L'A.E. avait été conçu pour fonctionner de manière entièrement automatique, l'intervention de l'opérateur humain – ou de l'*analyst*, ainsi que le nommait parfois Babbage – devant se trouver ici réduite au strict nécessaire ou plutôt, ce qui revient en fait au même, à ce qui résistait encore irréductiblement à une quelconque forme d'interprétation ou de traduction machinale. On est alors en droit de se demander par quel genre de moyens une machine à calculer aussi complexe que l'était effectivement le successeur du *Difference Engine* #1 était capable d'opérer de façon autonome ? Comment, pour le dire autrement, était-il possible que ce dispositif se trouve en mesure d'exécuter automatiquement et *ad litteram* une succession précise d'opérations mécaniques

⁴⁴⁶ In [Zanella et Ligier, 1999], p. 183.

correspondant à l'évaluation d'une expression algébrique donnée pour un certain nombre de valeurs numériques préfixées ?

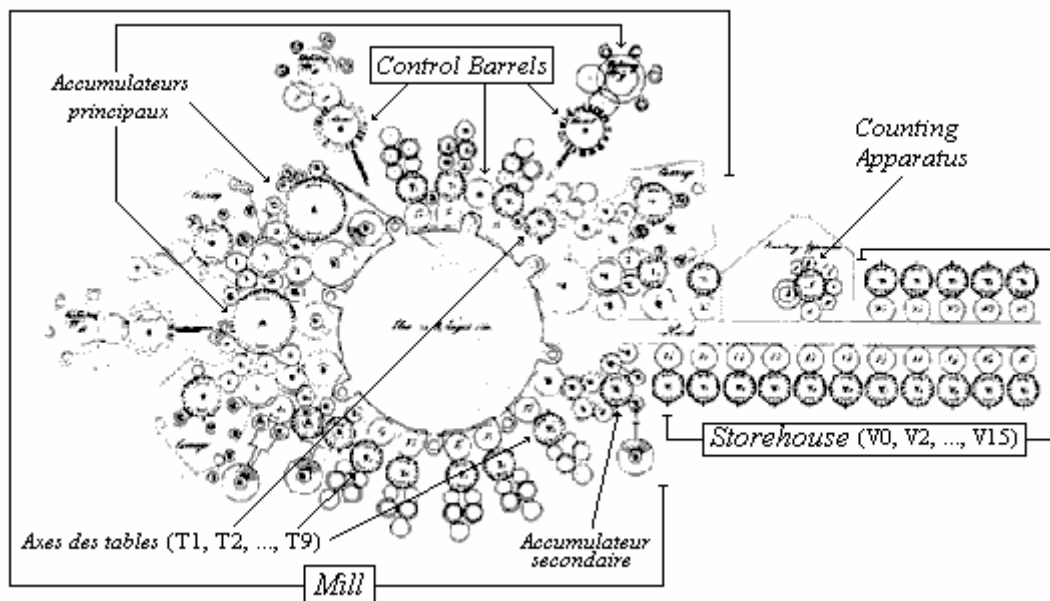


Fig. 12 : l'Analytical Engine présenté en vue de dessus. Sur ce schéma, nous avons distingué les trois sections principales du calculateur tout de même que quelques-uns de ses groupes mécaniques essentiels. A droite, on voit donc le Storehouse avec ses 16 registres mécaniques arrangés de façon linéaire (numérotés de V0 à V15). A gauche se trouve le Mill dont les nombreux éléments constitutants étaient disposés de manière circulaire. Sont également visibles le Counting Apparatus, quelques-uns des Control Barrels, les axes des tables (numérotés de T1 à T9), ainsi que les trois accumulateurs principaux de la machine et un de ses accumulateurs secondaires.

La solution pratique retenue par Babbage devait en fait être celle que Joseph Marie Jacquard, reprenant là en la perfectionnant une invention due en 1725 au mécanicien tisserand lyonnais Basile Bouchon, avait utilisée quelques quatre décennies auparavant pour automatiser la conduite des métiers à tisser et révolutionner ainsi l'industrie européenne du textile à l'orée du 19^{ème} siècle. Dans le huitième chapitre de son ouvrage autobiographique, *Passages from a Life of a Philosopher*, Charles Babbage s'est essayé à expliquer pourquoi il avait précisément élu ce mode de contrôle en vue d'automatiser l'opération de son calculateur. On remarquera tout d'abord deux choses concernant l'extrait que nous présentons ci-après: la première d'entre elles est que Babbage s'adresse en tout premier lieu à ceux qui non seulement possèdent déjà une certaine connaissance des principes qui régissent le fonctionnement des métiers à tisser de type Jacquard mais sont également familiers des formules propres au champ de l'analyse mathématique. Ensuite, l'ensemble du discours – qui se déroule résolument sur un ton explicatif - se construit et tire sa force d'une analogie

fondamentale dont les termes essentiels ne sont autres que le métier à tisser et l'*Analytical Engine* :

« To those who are acquainted with the principles of the Jacquard loom, and who are also familiar with analytical formulæ, a general idea of the means by which the Engine executes its operations may be obtained without much difficulty. In the Exhibition of 1862 there were many splendid examples of such looms.

It is known as a fact that the Jacquard loom is capable of weaving any design which the imagination of man may conceive. It is also the constant practice for skilled artists to be employed by manufacturers in designing patterns. These patterns are then sent to a peculiar artist, who, by means of a certain machine, punches holes in a set of pasteboard cards in such a manner that when those cards are placed in a Jacquard loom, it will then weave upon its produce the exact pattern designed by the artist.

Now the manufacturer may use, for the warp and weft of his work, threads which are all of the same colour; let us suppose them to be unbleached or white threads. In this case the cloth will be woven all of one colour; but there will be a damask pattern upon it such as the artist designed.

But the manufacturer might use the same cards, and put into the warp threads of any other colour. Every thread might even be of a different colour, or of a different shade of colour; but in all these cases the form of the pattern will be precisely the same--the colours only will differ.

The analogy of the Analytical Engine with this well-known process is nearly perfect⁴⁴⁷».

D'emblée, il ne manquera pas de nous paraître fort étonnant que l'auteur consacre autant de temps à décrire les diverses opérations caractéristiques du fonctionnement élémentaire du métier à tisser Jacquard et qu'il en passe finalement si peu à rendre compte de celles de sa nouvelle machine. Mais l'analogie qu'il s'efforce de déployer ici étant selon lui presque parfaite (« *nearly perfect* » écrit-il), il lui paraît évident que tous ceux qui se sont déjà intéressés à ces métiers à tisser *et* qui en même temps connaissent le domaine de l'Analyse ne rencontreront nulle espèce de difficulté à comprendre les modalités d'opération de

⁴⁴⁷ In [Babbage, 1994], pp. 88-89.

l'*Analytical Engine* s'ils sont préalablement parvenus à saisir celles du métier automatique. Le métier Jacquard, commence-t-il par noter, est un dispositif capable de tisser n'importe quel motif (*design*), susceptible d'être produit par l'imagination humaine. Cependant, et avant qu'il ne soit effectivement possible de tisser de telles figures (comme des motifs géométriques particuliers ou un portrait par exemple), il fallait impérativement de procéder à un certain nombre de travaux préparatoires. Il était ainsi chose courante que des artistes talentueux (*skilled artists*), soient commissionnés par les manufacturiers du marché de la soie afin de concevoir ces ouvrages à la fois premiers et indispensables. Une fois pareille composition achevée, elle se trouvait confiée à un « artiste particulier » (*peculiar artist*) - comprendre ici un artisan spécialisé - qui au moyen d'une machine spécifique fabriquait un assortiment de cartons perforés dont la structure « géométrique », conjointement commandée par la disposition particulière de ces perforations et celle de leur absence, devait correspondre très exactement à celle du modèle original (il s'agit donc d'une forme élémentaire de codage). Pour enfin obtenir une étoffe représentant le motif ou le modèle (*pattern*) originalement conçu par l'artiste, qu'il se soit agi d'une figure humaine, d'un paysage ou bien d'une structure à sergée, il suffisait alors de « charger » le métier Jacquard avec cet ensemble de cartons et de placer ce dernier en opération. Parvenu à ce point - Babbage s'est jusqu'ici contenté d'évoquer la suite d'opérations requise pour parvenir à tisser un motif particulier à partir de l'exécution d'une matrice originale - l'auteur nous invite à imaginer deux cas de figures en apparence différents. Un ensemble de cartons perforés étant initialement fourni, le fabricant peut tout d'abord choisir d'utiliser pour tisser le motif qu'il représente des fils de trame (*weft threads*) et des fils de chaîne (*warp threads*) de teinte absolument uniforme⁴⁴⁸. Dans un pareil cas, il va de soi que si la matrice originale était une peinture quadrichrome représentant un visage, le produit confectionné de la sorte perdra nécessairement en complexité par rapport à son modèle puisque l'étoffe tissée ne laissera voir au final qu'une seule et unique couleur (quelle qu'elle puisse être par ailleurs). Cependant, la *forme* du motif tissé (dans notre exemple il s'agit d'un visage), demeurera exactement la même que si l'on avait employé quatre fils de couleurs distinctes. La seule différence notable est qu'ici cette forme ne se révélera pas dans le jeu déterminé d'un « quatuor » de teintes de fils entrecroisés correspondant au spectre de couleurs original mais bel et bien dans le relief et le damasquiné d'une étoffe totalement monochrome. Maintenant - et en supposant que l'on conserve toujours le même ensemble de cartons perforés - si en lieu et place d'une unique couleur de fils de

⁴⁴⁸ Babbage suppose qu'il s'agit de fils blancs ou écrus (*unbleached or white threads*).

chaîne on décide au contraire d'en utiliser un très grand nombre⁴⁴⁹, on obtiendra une étoffe extrêmement diversifiée sur le plan chromatique (à tel point d'ailleurs qu'elle risque même d'en devenir passagèrement ininterprétable). Mais là encore, et quelle que soit la richesse de la palette de coloris utilisée, on ne tardera pas à se rendre compte que la *forme* du motif original est parfaitement conservée dans la structure de l'étoffe. Simplement dans ce cas cette forme – ce visage – se trouvera pour ainsi dire « noyée » dans le chaos tournoyant des teintes par trop disparates.

Il ne nous semble guère difficile d'entendre tout ce que Charles Babbage expose ici. Pourtant, après lecture, on est toujours en droit de se demander quel rapport tout cela entretient véritablement avec l'A.E. : après tout Babbage ne fait quasiment jamais mention de son calculateur dans le texte alors qu'il n'a de cesse de discourir sur le métier Jacquard. Pour parvenir à saisir la nature véritable de cette relation que l'on remplace à présent l'expression « métier à tisser » par « machine analytique », que l'on substitue aux termes « fils de trame » et « fils de chaîne » la formule « variables ou constantes numériques » Que l'en remplace encore le vocable « motif » par l'expression « formule algébrique ». Que l'on se souvienne enfin que les deux machines considérées sont conduites en usant exactement des mêmes moyens, c'est-à-dire grâce à des ensembles de cartons perforés qui dans tous les cas servent à représenter un modèle: figure géométrique dans le premier cas, formule algébrique et données numériques dans le second. Mieux que quiconque – en tout cas mieux que nous ne saurions nous-même le faire - la Comtesse Ada Augusta de Lovelace a su trouver les mots appropriés pour exprimer parfaitement l'essence de cette analogie. Ainsi pu-t-elle écrire : « *The distinctive characteristic of the Analytical Engine, and that which has rendered it possible to endow mechanism with such extensive faculties as bid fair to make this engine the executive right-hand of abstract algebra, is the introduction into it of the principle which Jacquard devised for regulating, by means of punched cards, the most complicated patterns in the fabrication of brocaded stuffs ... We may say most aptly, that the Analytical Engine weaves algebraical patterns just as the Jacquard-loom weaves flowers and leaves*⁴⁵⁰ ».

A l'instar du métier à tisser Jacquard auquel il empruntait le principe du contrôle par séquences de cartons perforés, l'A.E. était donc capable de « tisser » automatiquement des « *patterns* ». Mais là on l'on rencontrait habituellement des matrices de cartons permettant de

⁴⁴⁹ L'auteur suggère même que l'on utilise pour *chaque* fil de chaîne une couleur ou une nuance de couleur différente.

⁴⁵⁰ Traduction anglaise par la Comtesse Ada Augusta de Lovelace de *Notions sur la machine analytique de Charles Babbage* de Luigi Federico Menabrea, note A, août 1843, in Ada Augusta de Lovelace, *Scientific Memoirs*, t. 3, pp. 666-731.

réaliser de sublimes brocards représentant qui des ornements floraux ou géométriques, qui des figures humaines ou animales, il n'était désormais plus question que de chiffres et d'expressions mathématiques. Les motifs ou formes que « tissait » la machine analytique de Babbage étaient bien, selon la tournure choisie d'Ada Augusta de Lovelace, des figures algébriques, ses « fils de trame » et ses « fils de chaîne » des quantités numériques constantes ou variables. Quant aux instructions supportées par les « cartes des opérations », et puisqu'elles servaient à spécifier l'ordre précis dans lequel les opérations mathématiques devaient être réalisées par le calculateur, elles représentaient ni plus ni moins que la structure formelle de l'expression arithmétique à évaluer. De la même manière que la ou les couleurs de fil susceptibles d'être diversement employées pour tisser tel ou tel thème laissaient toujours apparaître la forme exacte de celui-ci au cœur de l'étoffe finie, les multiples combinaisons de valeurs utilisées pour évaluer une expression arithmétique ne pouvaient non plus en altérer la forme : le résultat du calcul effectué par la machine exprimait ainsi toujours fidèlement sa structure quelles que soient les quantités numériques particulières ayant servi à instancier ses variables.

Rapidement, examinons à présent de quelle manière Babbage avait imaginé faire réaliser tout cela à l'A.E. Un exemple que nous empruntons ici à L. F. Menabrea nous aidera sûrement à mieux concevoir les choses. Nous nous empressons d'ajouter ici qu'il s'agit là d'un cas de figure relativement simple qui, s'il permet effectivement de donner une bonne idée générale de la manière dont la deuxième machine de Babbage aurait dû opérer, ne prétend en aucun cas rendre raison de la complexité véritable de son fonctionnement.

La machine analytique aurait du recevoir en entrée non pas deux ensembles de cartes, comme on l'entend dire parfois, mais trois⁴⁵¹ :

1. Les *Operation Cards*, ou « cartes des opérations » : ce type de cartes perforées servait à la représentation des opérations qui permettaient de commander les mouvements des différents modules mécaniques du *Mill* via divers leviers et trains d'engrenages. Elles constituaient, sous forme d'un code directement « interprétable » par la machine, une image fidèle – mais codée – de l'expression algébrique devant être évaluée. Ainsi contrôlé, le « moulin » pouvait effectuer l'une des quatre opérations arithmétiques élémentaires – addition, soustraction, multiplication et division – au moment précis où la réalisation d'un calcul l'exigeait. Les *Operation Cards* – que l'on pourrait alors

⁴⁵¹ Il y avait par conséquent autant de dispositifs de lecture qu'il existait de types de cartes.

comparer aux instructions de nos ordinateurs – comprenaient encore deux sous-ensembles de cartes : les *Combinatorial Cards* et les *Index Cards* (respectivement les « cartes combinatoires » et les « cartes d'index »). Pendant le calcul, leur rôle consistait à faire avancer ou reculer la chaîne de cartes perforées dans le lecteur. Leur fonction apparaît donc similaire à celle que remplissent les instructions de contrôle de boucle et de branchement sur les machines modernes.

2. Les *Number Cards*, ou « cartes des nombres » : ainsi que sa désignation l'indique, ce deuxième ensemble de cartes était employé pour représenter des valeurs numériques. En fonction des besoins, il permettait d'alimenter le calculateur en valeurs constantes. Puisque qu'il était ainsi possible de charger celles-ci au fur et à mesure de la progression d'une computation, on pouvait y employer plus de constantes que la capacité des registres mécaniques de l'*Analytical Engine* ne l'aurait normalement autorisé.
3. Les *Variable Cards*⁴⁵² ou « cartes des variables » : les *Variable Cards* permettaient de diriger le transfert des quantités numériques stockées dans le *Storehouse* vers le *Mill* afin que celles-ci servent d'arguments à l'opération en cours. Elles étaient également capables d'effectuer l'opération inverse⁴⁵³, c'est-à-dire de transférer une valeur stockée dans un registre du *Mill* vers l'un des 16 axes du *Storehouse*. Lorsqu'une carte des variables opérait un transfert du premier genre, elle pouvait soit remettre à zéro le registre concerné soit encore laisser intacte cette valeur dans la perspective d'un usage futur.

Soit alors le système algébrique suivant⁴⁵⁴ qui comprend deux équations du premier degré à deux inconnues :

$$\begin{cases} mx + ny = d \\ m'x + n'y = d'. \end{cases}$$

Les termes « m », « n », « d », « m' », « n' » et « d' » représentent les arguments ou variables de ces deux équations tandis que « x » et « y » en figurent les inconnues. On commence par exprimer ces deux équations sous forme fractionnaire de façon à ce que ni x ni

⁴⁵² H. P. Babbage nomme ces cartes « *Directive Cards* ».

⁴⁵³ Les deux fonctions assurées par les *Variable Cards* - mais l'une est seulement la réciproque de l'autre - ne sont pas sans nous rappeler celle de l'instruction MOV utilisée en assembleur.

⁴⁵⁴ D'après L. F. Menabrea.

y n'apparaissent dans le corps des numérateurs et dénominateurs des quotients résultant de cette transformation mathématique :

- de $mx + ny = d$ l'on déduit que $x = \frac{dn' - d'n}{n'm - nm'}$.

- de $m'x + n'y = d'$ l'on déduit que $y = \frac{d'm - dm'}{mn' - m'n}$.

Pour calculer l'une ou l'autre de ces deux équations, nous remarquons qu'en vertu des lois fondamentales qui régissent les rapports de priorité d'exécution entre les quatre opérations arithmétiques élémentaires, il est tout d'abord nécessaire d'effectuer successivement quatre multiplications, puis deux soustractions, et enfin une division, ce qui représente un total de sept opérations individuelles réalisées les unes après les autres (de même que trois types d'opérations différents). Afin de déterminer la valeur de x par exemple, on commencera par évaluer les produits dn' , $d'n$, $n'm$, nm' . On soustraira ensuite le résultat du produit $d'n$ de celui de dn' avant de procéder identiquement avec les résultats des produits nm' et $n'm$. Une fois les résultats de ces deux opérations de soustraction obtenus, il sera alors possible d'effectuer la division terminale et par conséquent de connaître la valeur de x en fonction de celles, contingentes, prises par les 8 autres variables⁴⁵⁵ de l'expression. Ces formules mathématiques, on le voit, peuvent donc être réduites à des séquences d'opérations élémentaires s'enchaînant pas à pas selon un ordre rigoureux : c'est justement la possession de cette qualité particulière qui les rend aisément mécanisables. Afin que l'A.E. puisse évaluer ces deux expressions algébriques pour z vecteurs de 8 quantités numériques données, il aurait fallu préparer deux ensembles de cartes⁴⁵⁶ – un groupe de cartes d'opérations et un autre de cartes de variables - de la manière suivante. Etant donné qu'il existe six variables différentes dans ces expressions (« m », « n », « d », « m' », « n' » et « d' »), ainsi que deux occurrences de « n » et « n' », il est tout d'abord nécessaire de réserver huit registres du *Storehouse* afin de stocker les quantités numériques qu'elles permettent de représenter. Sachant que V_p constitue l'identificateur unique d'un registre particulier du *Storehouse* la distribution pourra être réalisée ainsi : $V_0=m$, $V_1=n$, $V_2=d$, $V_3=m'$, $V_4=n'$, $V_5=d'$, $V_6=n$, $V_7=n'$. Rappelons seulement qu'étant donné le fait que les axes ou registres mécaniques de la

⁴⁵⁵ Six variables distinctes figurent dans l'expression mais deux d'entre elles apparaissent deux fois (d'où les huit registres). Dans la pratique toutefois il n'est pas nécessaire d'utiliser les registres V6 et V7. Leurs contenus respectifs sont en effet absolument identiques à ceux des registres V1 et V4, qui lors de leur utilisation, ne sont ni remis à zéro ni non plus écrasés par une autre valeur.

⁴⁵⁶ Il ne se présente aucune constante dans le corps de ces deux équations.

machine analytiques sont tous conçus, sans exception aucune, comme des unités fonctionnellement identiques, la distribution particulière que nous venons de proposer ne possède strictement rien de nécessaire. En l'occurrence, nous aurions tout aussi bien pu employer ici les registres V2, V8, V5, V15, V11, V0, V12 et V2 sans que cela ne modifie en rien le fonctionnement du calculateur. Le fait que l'on doive dans ce cas de figure particulier employer huit registres (en fait six), pour y stocker des valeurs numériques ne dépassant pas la capacité de représentation de ces derniers constitue en réalité la seule condition que l'on se doit de respecter impérativement. Ceci étant précisé, il est alors possible d'exprimer de manière formelle la totalité du processus – contenus et fonctions des diverses cartes d'opérations et de variables compris - grâce au tableau suivant :

Désignation des registres initialisés.	Variables stockées dans les registres initialisés.	Numéros des opérations.	Cartes des opérations.	Cartes des variables.		Progression des opérations.
			Symboles des opérations.	Registres sur lesquels les opérations doivent être effectuées.	Registres destinés au stockage des résultats des opérations.	
V0	m	1	x	V2 x V4 =	= V8	= dn'
V1	n	2	x	V5 x V1 =	= V9	= $d'n$
V2	d	3	x	V4 x V0 =	= V10	= $n'm$
V3	m'	4	x	V1 x V3 =	= V11	= nm'
V4	n'	5	-	V8 - V9 =	= V12	= $dn'-d'n$
V5	d'	6	-	V10 - V11 =	= V13	= $n'm-nm'$
V6	n	7	/	V12 / V13 =	= V14	= $x = \frac{dn'-d'n}{n'm-nm'}$
V7	n'					

Les deux groupes de cartes que nous avons mentionnés permettent d'indiquer à la machine comment et sur quels axes elle doit précisément opérer à une étape donnée - et une seule - de l'ensemble du processus computationnel. Avant que le calculateur ne soit placé en opération, il est bien évidemment nécessaire d'initialiser les roues numériques de chacun des huit registres du groupe (V0,..., V7) avec les quantités décimales particulières respectivement représentées par les variables m, n, d, m', n', d', n et n' . L'A.E., en effet, était incapable de travailler avec des entités symboliques autres que celles couramment utilisées pour signifier les nombres décimaux. Le contenu de tous les autres registres du *Storehouse* est mis à 0 (*i.e.* V8=0, V9=0,...,V15=0). La première opération rencontrée par la machine est un produit dont le multiplicateur (d) est stocké sur le registre V2 et le multiplicande (n') sur le registre V4 du *Storehouse*. La première carte des variables autorise le transfert vers le *Mill* des

quantités numériques mémorisées sur ces deux axes. Là, la première carte des opérations commande alors à l'*Analytical Engine* d'effectuer le produit $V2 \times V4$ (soit dn'). Le résultat de cette multiplication est ensuite renvoyé vers le *Storehouse* où il est stocké sur le registre V8 (c'est-à-dire le premier registre de la série d'axes mis à zéro). Précisons qu'au moment où le premier de ces transferts est réalisé, les axes V2 et V4 sont automatiquement remis à zéro et leurs valeurs antérieures, d et n' , conservées dans deux des registres du *Mill*. Le résultat de leur produit, une fois déterminé, est quant à lui temporairement stocké dans un autre des registres de cette unité. Maintenant, il se peut parfaitement que les quantités qui viennent d'être chargées dans l'unité arithmétique de l'A.E. doivent à nouveau faire l'objet d'une utilisation dans un pas de calcul ultérieur (c'est par exemple le cas de la valeur représentée par le registre V4, laquelle se trouve utilisée à la fois dans la première et la troisième opération de multiplication). Pour éviter d'avoir à employer plus de registres mécaniques qu'il n'en est réellement nécessaire lors de l'effectuation de chaque computation – et du même coup réduire le risque d'erreurs que ne manquerait sûrement pas d'entraîner un pareil « jonglage » durant la phase d'élaboration des cartons de contrôle – les contenus des registres utilisés lors des différentes étapes du calcul sont systématiquement réaffectés aux axes d'où ils provenaient initialement (V2 et V4 retrouvent donc leurs valeurs initiales – d et n' – après avoir été remis à zéro le temps que le produit $d \times n'$ soit évalué dans le *Mill*). Les trois multiplications suivantes sont réalisées en recommençant la procédure que nous venons de détailler à ceci près que les registres du *Storehouse* destinés à recevoir les résultats respectifs de ces opérations changent à chaque pas de calcul : 1) opération n°2 : transfert des valeurs de V5 et V1, soit d' et n , dans le *Mill* ; mise à zéro de V5 et V1 ; calcul de $d' \times n$; transfert et stockage du résultat obtenu sur le registre V9 ; transfert de d' et de n sur les axes V5 et V1 du *Storehouse* ; 2) opération n°3 : transfert des valeurs de V4 et de V0 (n' et m), dans le *Mill*⁴⁵⁷ ; mise à zéro de V4 et V0 ; calcul de $n' \times m$; stockage du résultat de cette multiplication sur le registre V10 ; transfert des quantités n' et m sur les registres V4 et V10 ; 3) opération n°4 : transfert des valeurs de V1 et V3 (n et m'), dans le *Mill* ; mise à zéro de V1 et V3 ; évaluation de $n \times m'$; chargement du résultat sur le registre V11 ; transfert de n et m' sur les registres V1 et V3.

Les deux opérations suivantes sont des soustractions. Même s'il ne s'agit plus ici de transposer puis de multiplier le contenu de deux registres l'un par l'autre, le processus suivi par la machine, fondamentalement, demeure le même qu'auparavant (seule la nature de l'opération change). Pour la première soustraction par exemple (opération n°5), les valeurs

⁴⁵⁷ On notera ici le réemploi de la valeur conservée sur l'axe V4.

stockées sur les registres V8 et V9, et qui représentent respectivement les quantités numériques obtenues après avoir multiplié le contenu de V4 par celui de V2 et celui de V1 par celui de V5, sont transférées dans le *Mill* et les axes V8 et V9 mis à zéro. La soustraction $dn' - d'n$ est alors effectuée dans la section arithmétique de la machine puis son résultat – qui constitue le numérateur de la division finale – est renvoyé vers l'axe V12. Les quantités dn' et $d'n$ sont après cela transférées vers les registres d'où elles avaient été originellement extraites. La soustraction subséquente (opération n° 6), permet de calculer de la même façon le dénominateur du quotient terminal. Enfin, la septième et dernière opération de la série conduit à l'évaluation numérique de x : les contenus des registres V12 et V13 (correspondant respectivement aux valeurs égales aux résultats des opérations de soustraction $dn'-d'n$ et $n'm-nm'$), sont à cette fin transférés dans le *Mill* où la valeur représentée par le registre V12 est divisée par celle stockée dans le registre V13. Le résultat final, donc la valeur de l'inconnue, est finalement affecté au registre V14. Notons que cette quantité – comme du reste toutes les valeurs intermédiaires évaluées durant cette procédure – était susceptible d'être « imprimée », perforée sur des cartons et réutilisée, immédiatement ou non du reste, dans le cadre d'une autre computation. L'architecture de la machine, ou si l'on préfère son design, prévoyait la réalisation de l'ensemble de ces opérations.

Pour connaître à présent la valeur de y , il est bien entendu possible d'effectuer une série d'opérations analogue à celle que nous venons d'examiner. Entre la fin du premier processus et le début du second, donc avant que le groupe de registres (V0,..., V7) ne soit initialisé avec l'ensemble de variables (m, \dots, n') , on supposera seulement que tous les axes du *Storehouse* ont été repositionnés sur la valeur 0. Notons que les différentes quantités respectivement affectées aux variables m, n, d, m', n', d', n et n' dans l'évaluation numérique de cette formule sont strictement identiques à celles qui étaient impliquées dans la phase de calcul précédente. Une fois encore, le processus pourra être exprimé sous la forme d'un tableau :

Désignation des registres initialisés.	Variables stockées dans les registres initialisés.	Numéros des opérations.	Cartes des opérations.	Cartes des variables.		Progression des opérations.
			Symboles des opérations.	Registres sur lesquels les opérations doivent être effectuées.	Registres destinés au stockage des résultats des opérations.	
V0	m	1	x	V5 x V0 =	= V8	= $d'm$
V1	n	2	x	V2 x V3 =	= V9	= dm'
V2	d	3	x	V0 x V4 =	= V10	= mn'
V3	m'	4	x	V3 x V1 =	= V11	= $m'n$
V4	n'	5	-	V8 - V9 =	= V12	= $d'm - dm'$
V5	d'	6	-	V10 - V11 =	= V13	= $mn' - m'n$
V6	n	7	/	V13 / V14 =	= V14	= $y = \frac{d'm - dm'}{mn' - m'n}$
V7	n'					

Bien que ce *modus operandi* permette *in fine* au calculateur d'évaluer les deux formules algébriques présentées plus haut, il apparaît en réalité qu'il recèle nombre de défauts avérés ou potentiels. Pour commencer, une telle stratégie implique la réalisation successive de deux procédures distinctes, ce qui n'apparaît bien entendu guère économique lorsque l'on songe à la fois au temps nécessaire pour paramétrer l'*Analytical Engine* avant une computation tout de même qu'à celui requis pour la préparation des différents lots de cartes de contrôle. Ensuite, la fabrication des quatre ensembles de cartons de contrôle⁴⁵⁸ indispensables ici s'effectuant à la main, le risque de voir des erreurs commises au cours de ce processus est forcément plus important que si leur nombre avait été moindre. Or on se souvient justement que Charles Babbage avait entrepris la construction de ses machines dans une double perspective: d'une part réduire les temps de computation nécessaires à l'élaboration des tables mathématiques et d'autre part éliminer purement et simplement les erreurs dont étaient systématiquement truffés ces instruments lorsqu'ils étaient calculés par des groupes de mathématiciens et calculateurs humains. A juste titre, on se demandera alors quel intérêt véritable il y aurait eu à disposer d'une machine aussi formidable que l'*Analytical Engine* si tous les gains qu'elle était censée permettre de réaliser à la fois en terme de temps de calcul et de précision se trouvaient d'emblée hypothéqués lors des phases préparatoires précédant obligatoirement sa mise en opération. Cependant on va voir sans plus tarder que la nature fondamentalement combinatoire de l'arithmétique tout de même que la manière dont avait

⁴⁵⁸ Deux groupes de cartes pour piloter les opérations et deux autres pour contrôler les transferts des variables.

été conçue la machine permettaient dans la très grande majorité des cas de contourner efficacement ce goulet.

Si l'on procède à l'examen attentif des deux équations de notre exemple, on ne tardera pas à s'apercevoir qu'elles participent l'une et l'autre d'une seule et même structure mathématique. Dans les deux cas en effet, la suite d'opérations élémentaires devant être réalisée par le calculateur sera la suivante : $x, x, x, x, -, -, /$. Puisque ces formules algébriques font système et qu'elles font intervenir les mêmes variables, on sait également que pour une évaluation donnée de ces expressions, les quantités numériques devant être affectées à ces termes primitifs seront parfaitement identiques. De plus, et en vertu de la propriété de commutativité de la multiplication qui énonce que pour tout a et pour tout b on a $ab = ba$, on remarquera encore qu'elles possèdent en commun le même dénominateur⁴⁵⁹. Tout ceci, fondamentalement, implique que tout ou partie de ce qui se trouvera déterminé pour calculer la première de ces formules pourra être immédiatement réutilisé afin de calculer la seconde. Par conséquent, il s'avère tout à fait possible de fusionner les deux procédures en une seule, ce qui non seulement autorise la réduction du nombre total d'opérations à effectuer mais également celle du nombre des cartons perforés nécessaires au contrôle de la machine. Le temps de préparation des éléments de contrôle et celui requis pour l'effectuation réelle du calcul - tout de même que le risque lié de voir apparaître des erreurs - ne peuvent s'en trouver, on le comprend, que très sensiblement diminués. Le tableau suivant représente le déroulement logique⁴⁶⁰ de la procédure finale :

⁴⁵⁹ Donc $n'm - nm' = mn' - m'n$.

⁴⁶⁰ Notons deux choses. Premièrement, et étant donné la double occurrence des variables n et n' dans la séquence d'opérations, il est possible ici de n'utiliser que six registres au lieu de huit (il en résulte une économie de deux registres). Deuxièmement, on remarquera que tous les registres du *Storehouse* ayant été employés pendant le calcul, le résultat de la seconde division doit être stocké sur l'axe V0. Le fait que la valeur qu'il permettait de conserver jusque-là - c'est-à-dire m - se trouve écrasée lors de ce processus n'est nullement dérangeant puisque ce quotient, dont le numérateur et le dénominateur sont respectivement stockés sur les colonnes V14 et V12, constitue la toute dernière opération du processus.

Registres sur lesquels sont stockées les valeurs d'initialisation.	Cartes des opérations.		Cartes des variables.		Progression des opérations.
	Numéros des opérations.	Nature de chaque opération.	Registres sur lesquels les opérations doivent être effectuées.	Registres destinés au stockage des résultats des opérations.	
$V0 = m$	1	x	$V0 \times V4$	$V6 =$	$V6 = mn'$
	2	x	$V3 \times V1$	$V7 =$	$V7 = m'n$
$V1 = n$	3	x	$V2 \times V4$	$V8 =$	$V8 = dn'$
	4	x	$V5 \times V1$	$V9 =$	$V9 = d'n$
$V2 = d$	5	x	$V0 \times V5$	$V10 =$	$V10 = d'm$
	6	x	$V2 \times V3$	$V11 =$	$V11 = dm'$
$V3 = m'$	7	-	$V6 - V7$	$V12 =$	$V12 = mn' - m'n$
	8	-	$V8 - V9$	$V13 =$	$V13 = dn' - d'n$
$V4 = n'$	9	-	$V10 - V11$	$V14 =$	$V14 = d'm - dm'$
	10	/	$V13 / V12$	$V15 =$	$V15 = \frac{dn' - d'n}{mn' - m'n} = x$
$V5 = d'$	11	/	$V14 / V12$	$V0 =$	$V0 = \frac{d'm - dm'}{mn' - m'n} = y$

L'A.E., comme du reste le D.E. #1, avait été conçu pour faciliter et accélérer l'établissement des tables mathématiques dont on a pu voir à quel point elles étaient indispensables en bien des domaines de l'activité humaine. A la différence du *Difference Engine* toutefois, la seconde machine de Babbage était capable d'effectuer les quatre opérations arithmétiques élémentaires (ce qui évitait d'avoir à recourir à la méthode des différences pour réaliser les calculs). Une des caractéristiques les plus intéressantes de la machine analytique tenait directement à la manière dont elle était contrôlée. Chaque fois qu'une nouvelle table, donc qu'une nouvelle fonction mathématique devait être calculée, il était bien évidemment impératif de fabriquer selon un protocole rigoureux les différents groupes de cartons perforés permettant à la machine d'effectuer cette computation. Or ces éléments de contrôle, une fois produits, ne devaient pas être détruits après emploi mais au contraire précieusement conservés. De ce fait, et après qu'un certain nombre de tables ait été calculé, l'A.E. aurait finalement disposé d'une véritable bibliothèque de fonctions mathématiques (de la même manière qu'il existe aujourd'hui des bibliothèques de routines, par exemple les bibliothèques standard et MFC&T⁴⁶¹ en C++, dans la plupart des langages de programmation de haut niveau). Il est en fait possible de se représenter ces « routines » ou

⁴⁶¹ Microsoft Foundation Classes and Templates.

groupes de cartes de contrôle comme autant de cadres applicatifs logiques permanents utilisables et réutilisables à volonté : en effet, seules les valeurs numériques passées aux variables des fonctions dont elles étaient censé autoriser l'évaluation automatique auraient dû être modifiées lors de chaque computation. Excepté certaines expressions algébriques récurrentes, les « routines » que l'on aurait été en mesure de trouver dans la librairie de la machine analytique auraient évidemment été celles correspondant aux fonctions transcendentes nécessaires à l'établissement des tables mathématiques les plus fréquentes, à savoir :

$$1) \text{ arc tangente : } \arctan x = \frac{x}{1+x^2} \times \left(1 + \frac{2}{3} \times \frac{x^2}{1+x^2} + \frac{2}{3} \times \frac{4}{5} \times \left(\frac{x^2}{1+x^2} \right)^2 + \dots \right)$$

$$2) \text{ cosinus : } \cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots$$

$$3) \text{ exponentielle : } \exp. x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

$$4) \text{ logarithme : } \ln x = 2 \times \left[\left(\frac{x-1}{x+1} \right) + \frac{1}{3} \times \left(\frac{x-1}{x+1} \right)^3 + \frac{1}{5} \times \left(\frac{x-1}{x+1} \right)^5 + \dots \right]$$

$$5) \text{ sinus : } \sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots$$

6) racine carrée principale d'un argument N par la méthode d'approximation par récurrence de Newton-Raphson.

En combinant certaines de ces formules les unes avec les autres, c'est-à-dire, du point de vue de la machine, en appariant certaines séquences de contrôle avec d'autres selon une modalité d'assemblage particulière, il était en outre possible d'augmenter l'étendue de la bibliothèque de fonctions mathématiques de l'*Analytical Engine* de façon extrêmement peu coûteuse. Ainsi par exemple pour calculer la tangente d'un quelconque argument x . Puisque

l'on sait que $\tan x = \frac{\sin x}{\cos x}$, il aurait suffi de lier par concaténation les groupes de cartons

perforés permettant d'évaluer individuellement \sin de x (numérateur) et \cos de x (dénominateur), puis d'effectuer automatiquement la division. Il apparaît ainsi que l'architecture de l'A.E., de la même manière qu'elle autorisait l'utilisation ou la réutilisation à un instant t_k des valeurs qui avaient pu être calculées à un instant t_{k-n} , permettait aussi que des séquences de contrôle définies pour computer des fonctions précises à un moment donné du

passé se retrouvent par la suite liées entre elles afin que l'on puisse en évaluer de nouvelles. Etant donné la possibilité de réaliser cette forme de rétroaction « différée », c'est donc en plus d'un sens que l'on peut légitimement affirmer de la machine analytique qu'elle se « mordait la queue ».

On observera encore ici que l'évaluation numérique de ces fonctions « primitives » ne reposait pas sur le calcul d'un polynôme particulier, comme c'est fréquemment le cas aujourd'hui des routines scientifiques utilisées sur nos ordinateurs modernes, mais sur la computation d'une série mathématique présentant un développement géométrique. L'avantage majeur que présente indéniablement la méthode du calcul des fonctions par approximation polynomiale est qu'elle permet d'éviter de manière efficace le problème de la convergence lente des séries rencontré quelquefois lorsque certaines variables sont passées à celles-ci. Mais ce gain, qui se traduit évidemment par une diminution très appréciable du temps de calcul nécessaire à la détermination numérique d'une fonction, s'assortit obligatoirement d'une contrainte non négligeable: les polynômes utilisés à cette fin, en effet, ne représentent que des *approximations* des expressions mathématiques devant être évaluées et non ces expressions elles-mêmes. En d'autres termes, et même si ces formules sont parfaitement susceptibles de se voir optimisées afin de convenir exactement à la longueur des mots de la mémoire d'un ordinateur donné (disons deux octets par exemple), la précision absolue à laquelle elles permettront de parvenir en définitive se trouvera systématiquement bornée à la fois par leur type particulier et par cette limitation spatiale particulière. Pour gagner plus encore en précision, il sera par conséquent nécessaire de définir une nouvelle approximation polynomiale de la fonction à calculer correspondant spécifiquement au degré d'exactitude recherché, ce qui, on s'en doute, ne se fait pas toujours sans poser de problèmes tant sur les plans théorique que matériel. A l'inverse, la méthode mathématique employée pour calculer de pareilles fonctions avec l'A.E. autorisait la réalisation d'éléments de contrôle – *i.e.* d'ensembles de cartons perforés – codant exactement pour le développement des équations considérées. Puisqu'il n'était pas question ici d'expressions constituant des approximations des formules à évaluer mais bel et bien de ces formules elles-mêmes exprimées sous une forme codée permettant leur calcul par des moyens mécaniques, le niveau de précision atteint par l'*Analytical Engine* était virtuellement illimité. Bien évidemment, et puisque que l'on sait par ailleurs que tout automate arithmétique « concret » - qu'il soit simple calculateur mécanique ou, comme le *Earth Simulator* de NEC, supercalculateur parallèle à multiprocesseurs vectoriels - tombe invariablement sous le coup de contraintes spatio-

temporelles indépassables dans l'absolu⁴⁶², il semble inutile de préciser que dans les faits ce n'était pas le cas. Il convient pourtant de se souvenir que Babbage avait prévu de doter les registres mécaniques du *Storehouse* et du *Mill* d'une cinquantaine de disques numériques ce qui, avec 16 colonnes disponibles⁴⁶³, aurait dû finalement conduire à l'obtention d'une capacité totale de stockage de seize nombres composés chacun de cinquante chiffres. C'était là en vérité une capacité mémoire amplement suffisante pour réaliser le type de calculs pour lequel l'*Analytical Engine* avait été conçu.

2.2.4.6. L'*Analytical Engine* était-il un calculateur programmable ?

Tout au long de cette section, et grâce à l'étude circonstanciée de quelques automates conçus durant les 18^{ème} et 19^{ème} siècles – tambour musical, automates zoomorphes ou anthropomorphes de Vaucanson, *Difference Engine*, *Analytical Engine* - nous nous sommes efforcés de démontrer en quoi les notions de contrôle par séquence et de contrôle par programme pouvaient différer l'une de l'autre (une distinction primordiale sur laquelle nous reviendrons encore sous peu puisque jusque-là nous nous sommes principalement attachés à définir ce qu'était le premier type de contrôle). En dépit du fait que l'on rencontre assez communément le vocable « programme » pour désigner le mode de conduite d'une machine qui se trouvait en réalité pilotée au moyen d'une séquence de contrôle, il s'avère que cet emploi - que Jean-Pierre Sérès a pu qualifier avec raison de « commode » - est parfaitement abusif. Ici comme ailleurs, on s'en doute, la généralisation d'une pratique ne saurait prétendre à en fonder la légitimité. Ne nous y trompons pas. Malgré les apparences, ces deux concepts ne sont nullement réductibles l'un à l'autre et rien, si ce n'est précisément une assez fâcheuse propension à céder à la tentation de ce que nous considérons être ni plus ni moins qu'une forme de confusion conceptuelle doublée d'un anachronisme, ne semble pouvoir justifier un pareil usage. Certes, dans l'un et l'autre cas, on ne peut que s'accorder à reconnaître qu'il est bien question d'un procédé technique autorisant la conduite automatique d'une machine en vue de la réalisation d'une tâche particulière. Pourtant, la seule existence de cette propriété fondamentale, laquelle se trouve effectivement partagée par les concepts de « programme » et de « contrôle par séquence », ne saurait aucunement autoriser que l'on en

⁴⁶² La mémoire d'un ordinateur, tout de même que sa puissance de calcul, ne sont pas extensibles à l'infini. De plus il est certains calculs qui, si en droit peuvent être réalisés, exigeraient en fait un tel temps de computation que celui-ci en deviendrait absolument rédhitoire.

⁴⁶³ En outre, l'architecture de l'*Analytical Engine* n'était pas « fermée », ce qui revient à dire qu'il était toujours possible, si le besoin se présentait effectivement, d'ajouter de nouveaux registres au *Storehouse* et au *Mill* afin d'augmenter la capacité mémoire de la machine.

arrive à prétendre que tous deux recouvrent une seule et même chose. Un automate programmable, qu'il soit du reste construction purement intellectuelle - comme une machine de Turing - ou *a contrario* dispositif matériel, est en effet capable de calculer une classe de fonctions mathématiques⁴⁶⁴ nettement plus étendue que celle que peut traiter un automate contrôlé par séquence. C'est en cela, en cet écart de puissance computationnelle fondamentale que réside précisément leur différence essentielle, et c'est bien là ce qui interdit au moins en principe que l'on puisse les confondre. Sur le plan logique, nous allons le voir, c'est également ce qui permet de faire définitivement le départ entre un ordinateur et une simple machine à calculer.

Compte tenu de l'architecture extrêmement originale de l'*Analytical Engine* et de la position absolument centrale qu'il occupe en raison de cela dans l'histoire du calcul artificiel, on imagine aisément que ce calculateur – ou plutôt ce projet de calculateur – fut et est encore souvent considéré comme une machine programmable. Ainsi à son propos Michael R. Williams a pu écrire la chose suivante:

« *The program for the Analytical Engine was to be stored on a series of punched card*⁴⁶⁵ ... ».

Dans le même esprit, on pourrait également citer Philippe Breton :

« *Le deuxième projet de Babbage, un « moulin à chiffres » qui devait effectuer toutes les opérations mathématiques devra attendre l'ère des grands calculateurs du milieu du XX^e siècle pour s'incarner dans un dispositif fonctionnant effectivement. De fait, les plans de cette machine prévoyaient un programme enregistré sur cartons perforés*⁴⁶⁶ ... ».

Ou encore Donald D. Spencer: « ... *the Analytical Engine is the world's first computer and it can be programmed to solve a wide variety of logical and computational problems*⁴⁶⁷ ... ».

⁴⁶⁴ En vérité, il peut computer toutes les fonctions calculables, c'est-à-dire toutes les fonctions qui peuvent être spécifiées sous la forme d'une procédure effective, ou, pour le dire encore autrement, sous forme d'un programme ou d'un algorithme.

⁴⁶⁵ In [Williams, 1997], p.184.

⁴⁶⁶ In [Breton, 1990], p. 63.

⁴⁶⁷ In [Spencer, 1999], p. 11.

Il ressort clairement de cela que pour ces auteurs, il ne semble faire aucun doute quant au fait que la deuxième machine de Babbage pouvait effectivement être programmée. En réalité, il nous faut bien concéder que l'A.E. exhibait nombre de caractéristiques logiques et techniques qui, considérées toutes ensemble, semblent contribuer à en faire un très proche parent des ordinateurs. Ainsi par exemple le design particulier de cette machine impliquait que la section dédiée à l'effectuation des calculs se trouve physiquement *séparée* de celle destinée au stockage des quantités numériques à traiter (ce n'était pas le cas sur le *Difference Engine*). Or - et c'est précisément là un des points cruciaux qui, avec sa généricité, confère à l'*Analytical Engine* toute son importance historique - il s'agit bien d'un des traits architecturaux les plus caractéristiques des machines de type Von Neumann sur lesquelles, rappelons-le si besoin est, unité arithmétique et logique et mémoire interne constituent des entités fonctionnelles totalement distinctes. La terminologie employée par Babbage pour décrire son calculateur est également susceptible de se voir rapprochée avec une certaine facilité de celle couramment utilisée aujourd'hui en informatique. John Walker, le fondateur de la société *Autodesk, Inc.*, par ailleurs co-auteur du célèbre logiciel de D.A.O. *AutoCAD*, s'est livré à cette comparaison fort intéressante dont nous ne reproduisons ici qu'une partie seulement⁴⁶⁸ :

Machine analytique	Ordinateur
<i>Analyst</i>	Programmeur
<i>Attendant</i>	Opérateur
<i>Axis</i>	<i>Buffer</i>
<i>Barrel</i>	Microcode (R.O.M.)
<i>Card</i>	Instruction
<i>Operation Card</i>	Instruction arithmétique
<i>Combinatorial Card</i>	Instruction, contrôle de transfert (test, saut)
<i>Number Cards</i>	Instruction, chargement immédiat (<i>load</i>)
<i>Variable Cards</i>	Instruction, chargement / stockage
<i>Function Library</i>	Librairie de routines (ou de fonctions)
<i>Column (of Rack)</i>	Cellule mémoire (R.A.M.)
<i>Cycle</i>	Boucle (<i>loop</i>)

⁴⁶⁸ La liste comparative proposée par John Walker peut être trouvée dans son intégralité à l'adresse suivante : <http://www.fourmilab.to/babbage/contents.html>

<i>Mill</i>	Unité arithmétique et logique (A.L.U.)
<i>Rack (of Columns)</i>	Mémoire / <i>Random Access Memory</i>
<i>Store</i>	Zone mémoire principale (R.A.M.)
<i>Turn of the Handle</i>	Cycle d'horloge

Le fait qu'une telle juxtaposition soit seulement envisageable et que, de surcroît, elle puisse se voir menée pour ainsi dire de manière aussi « naturelle » concoure très sensiblement à laisser penser que l'A.E. était le précurseur direct de l'ordinateur et donc qu'il pouvait être programmé. Si l'on ajoute à cela que le mode de contrôle par cartons perforés sur lequel reposait fondamentalement son fonctionnement fut repris et adapté presque un siècle après que Babbage eut commencé de concevoir cette machine pour piloter la très grande majorité des grands calculateurs électromécaniques des années quarante – on pensera notamment à l'Harvard Mark I / I.B.M. A.S.C.C., à l'I.B.M. C.P.C., à la série des *Bell Labs Computers*⁴⁶⁹, à l'I.B.M. S.S.E.C. ou encore aux Z1, Z2, Z3 et Z4⁴⁷⁰ allemands – alors on comprend que cette idée puisse encore trouver matière à se voir renforcée. De plus – autre facteur contribuant indirectement à entériner cette thèse - il n'est peut-être pas superflu de rappeler ici que sur certains des premiers ordinateurs construits à partir de 1946 (nous songeons notamment à l'E.D.S.A.C.), on usait encore de bandes perforées en carton pour assurer non seulement le stockage permanent des programmes mais également leur chargement dans la mémoire interne de la machine. La question à laquelle nous devons à présent tenter d'apporter une réponse claire est donc la suivante : l'*Analytical Engine* était-il réellement, ainsi que l'avancent certains, un automate arithmétique programmable ?

De façon générale, un automate contrôlé par séquence peut se voir défini de la sorte : 1) c'est un dispositif spécialisé dans l'effectuation d'un type unique de processus : la tâche qu'il est en mesure de réaliser est donc toujours la même; 2) la sortie de la machine ne peut servir à influencer l'ordre dans lequel se présentent ses instructions ni non plus leur nature. L'examen approfondi que nous avons fait de l'architecture et du fonctionnement de l'A.E. démontre bien que cette machine ne possédait ni l'une ni l'autre de ces caractéristiques spécifiques. Certes, il s'agissait bien d'un calculateur, ce qui implique évidemment que le seul type de tâches dont il était capable relevait exclusivement du domaine du calcul. Mais cet artefact, contrairement au *Difference Engine* qui était une machine à calculer étroitement spécialisée, possédait une

⁴⁶⁹ A l'exception du *Bell Labs Computer Model 1* qui utilisait trois télétypes.

⁴⁷⁰ Précisons que les calculateurs de Konrad Zuse (Z1, Z2, Z3 et Z4), n'utilisaient pas à proprement parler des supports cartonnés mais plutôt des films. Cependant le principe qui sous-tendait le processus de contrôle était le même qu'avec les cartes perforées.

portée mathématique véritablement générique. Autrement dit, et étant donné que la gamme de calculs qu'il pouvait exécuter était extrêmement diversifiée, il ne se trouvait pas condamné à faire toujours la même chose. Reste alors, second point, à aborder la question décisive de l'influence qu'étaient susceptibles d'exercer les sorties intermédiaires ou terminales de la machine sur son entrée, c'est-à-dire, pour le formuler encore différemment, celle du *feedback* mécanique. Sans la capacité pour un calculateur à exécuter automatiquement des processus de type rétroactif affirmions-nous plus haut, on ne saurait à juste titre commencer à parler à son propos de machine programmable. Attendu que l'*Analytical Engine* était en mesure d'utiliser de façon automatique les valeurs qu'il avait préalablement calculées afin d'effectuer de nouvelles computations – autrement dit qu'il pouvait employer son *output* comme *input* - il ne saurait subsister aucun doute quant au fait qu'il était bien capable d'un certain genre de rétroaction. De plus, nous avons également vu que les ensembles de cartons perforés qui étaient employés pour assurer son contrôle composaient une véritable bibliothèque de fonctions mathématiques réutilisables à souhait sous forme individuelle ou combinée (cette sorte de *feedback* différé n'étant pas automatisée, elle nécessitait l'intervention d'un opérateur pour se voir réalisée). Mais ces traits spécifiques suffisaient-ils pour autant à faire de l'*Analytical Engine* un automate programmable c'est-à-dire, à l'instar de l'ordinateur⁴⁷¹, un calculateur universel ? Nous avancerons ici une réponse négative. La deuxième machine de Babbage, en effet, ne disposait pas d'instruction de *branchement conditionnel*⁴⁷². Or c'est là une notion absolument centrale dans les domaines du calcul universel et de la programmation. Sans ce type d'instruction en effet, il s'avère que la classe de fonctions calculables susceptible d'être traitée par un automate arithmétique, donc sa puissance ou sa généralité, se trouvent immensément réduites. Le branchement conditionnel est en réalité une opération qui permet à

⁴⁷¹ Nous remarquons qu'en droit et en fait, un automate arithmétique, pour être programmable *et* universel, n'a pas nécessairement besoin d'être un ordinateur (ni non plus, bien entendu, de disposer d'une mémoire infinie). La première machine universelle programmable fut en effet le calculateur Z3 que Konrad Zuse conçut en pleine seconde guerre mondiale alors qu'il était affecté à l'usine aéronautique Henschel (la construction du Z3 débuta en 1939 et il était opérationnel le 5 décembre 1941). Doté d'une mémoire de 64 registres pouvant chacun stocker des nombres d'une longueur de 22 bits représentés en binaire et en virgule flottante, le Z3 n'était pas encore entièrement automatique puisque les valeurs initiales servant aux calculs devaient être entrées à la main dans les mémoires.

⁴⁷² Babbage fit bien mention de cette idée à propos de l'A.E., mais il ne décrivit jamais de manière détaillée de quelle façon ce processus pourrait être implémenté en pratique. Par ailleurs, et c'est ce qui nous enjoint précisément à affirmer que l'A.E. ne disposait pas du branchement conditionnel, on sait à quelles immenses difficultés techniques se heurtèrent les concepteurs des calculateurs électromécaniques des années quarante – lesquels étaient tous contrôlés par cartes ou par bandes - lorsqu'ils tentèrent de réaliser des dispositifs permettant d'effectuer cette instruction. L'A.S.C.C. par exemple n'en disposait pas. En revanche, il pouvait répéter une opération particulière un certain nombre de fois. Le nombre d'itérations ainsi effectuées était contrôlé par un dispositif de comptage spécial (en l'occurrence le registre n° 72), et lorsqu'il atteignait une valeur spécifiée à l'avance, la machine s'arrêtait. Mais en dernier lieu, la tâche consistant à savoir où reprendre la procédure de calcul à partir de ce point revenait toujours à l'opérateur humain, et non au calculateur.

un calculateur, lorsque certaines conditions spécifiées à l'avance sont rencontrées au cours d'une procédure de calcul, de modifier l'ordre dans lequel ses instructions se présentent. De la sorte, la machine peut utiliser son *output* pour influencer directement sur le déroulement normal de ses propres instructions de contrôle (et éventuellement s'arrêter). Elle est ainsi capable, étant donné une configuration ou un état particuliers, de prendre automatiquement une « décision » quant à la suite à donner à une procédure de calcul en cours de réalisation (*i.e.* procéder à l'exécution d'une instruction différente de celle qui suit l'ordre venant d'être immédiatement exécuté ou bien stopper sa marche). C'est précisément ce que fait une machine universelle de Turing, soit un des modèles logico-mathématiques de l'ordinateur, chaque fois que sa tête de lecture/écriture se positionne sur une des cases de son ruban supposé infini. Lorsque ce faisant elle rencontre un certain symbole de son alphabet ou encore une case vide, il lui faut se référer à sa table de transition d'états - à son programme - pour « savoir » quoi faire ensuite. En fonction de la nature du symbole lu et de son programme, donc de son état courant et de ce qui spécifié dans l'entrée de la table de transition correspondant précisément à ce cas de figure particulier, la machine peut « décider » de son action à venir. Avant de reculer, d'avancer d'une case ou bien de s'arrêter, peut-être lui faudra-t-il laisser intact ce symbole ou au contraire l'effacer et en inscrire un nouveau. Ceci, à la limite, nous importe peu. Ce qui compte véritablement ici, c'est que cette machine – entièrement spécifiable sous forme symbolique quant un automate contrôlé par séquence l'est sous forme diagrammatique - n'exécute pas une séquence linéaire d'instructions de manière absolument rigide mais qu'il est au contraire capable d'utiliser les symboles présents sur son ruban, qu'il s'agisse du reste des symboles initialement présent sur son ruban ou de ceux ultérieurement calculés, pour modifier l'ordre même d'exécution de ces dernières. L'A.E., comme du reste la totalité des automates contrôlés par séquence, n'était pas capable de cela et c'est ce qui nous conduit précisément à dire qu'il n'était pas programmable, au sens où l'est un ordinateur. Le diagramme⁴⁷³ ci-dessous résume les différences fondamentales entre machines contrôlées par séquence et machines contrôlées par programme.

⁴⁷³ D'après Andreas Brennecke, *A Classification Scheme for Programmed Controlled Calculators*, Table 2, in [Rojas, Hashagen et al., 2000], p.67.


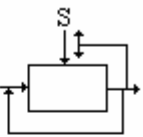
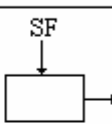
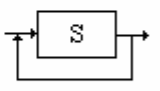
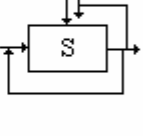
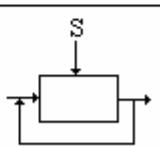
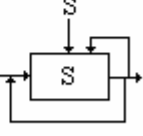
Machine contrôlée par séquence		Machine contrôlée par programme	
Contrôle par séquence fixe (support interne et externe).		Automate dont la sortie peut modifier l'ordre de lecture des instructions.	
			Automate à programme interne (ordinateur). L'ordre de déroulement des instructions peut être modifié par sa sortie.
Contrôle par séquence avec utilisation de la sortie comme entrée. (support interne et externe).		Automate dont la sortie peut influencer l'ordre de lecture des instructions et servir elle-même d'instruction à la machine (ordinateur).	
			

Fig. 13: différences entre contrôle par séquence et contrôle par programme.

L'*Analytical Engine* constitue un moment de rupture essentielle dans l'histoire des automates arithmétiques. En introduisant de nouvelles techniques puisées dans la sphère industrielle – notamment l'utilisation des cartons perforés pour assurer le contrôle des machines – ainsi que des concepts et des schémas architecturaux inédits dans le champ du calcul artificiel, Babbage devait exercer une influence immense sur la très grande majorité de ceux qui furent appelés à lui succéder. L'A.E., comme nous nous sommes efforcés de le montrer, n'était pas un calculateur universel de même qu'il n'était pas programmable. Mais il n'en demeure pas moins qu'un siècle après sa conception – et même avant si l'on songe aux machines de bureau mécaniques des américains Herman Hollerith, James Powers ou William S. Burroughs par exemple – certaines de ses caractéristiques les plus remarquables furent reprises par les constructeurs des grands calculateurs électromécaniques et par ceux des premiers ordinateurs.

2.2.5. Machines analogiques et machines digitales.

Les ordinateurs que nous utilisons aujourd'hui, tout comme les machines de type E.D.V.A.C. qui furent construites à partir de 1946 aux Etats-Unis et au Royaume-Uni, sont par essence des automates *numériques* (de manière équivalente, on les qualifie aussi de machines *digitales*). En vérité, et bien sûr sans prétendre l'ombre d'un instant qu'ils sont véritablement justiciables d'une forme de comparaison directe en dehors de cela justement, la très grande majorité des dispositifs d'aide au calcul qui ont été inventés – de l'abaque à l'*Analytical Engine* en passant par l'Arithmomètre ou les grands calculateurs électromécaniques des années quarante – étaient des machines digitales. Une autre lignée majeure d'instruments de calcul mécaniques, dits *analogiques* ou *continus*, commença cependant à apparaître vers le milieu du 19^{ème} siècle notamment avec les planimètres conçus par l'ingénieur allemand J. H. Herman, les physiciens britanniques James Clerk Maxwell et James Thomson, puis les prédicteurs de marées et les analyseurs différentiels fabriqués par le frère de ce dernier - qui fut donc pionnier en la matière - le grand physicien écossais Lord Kelvin (Sir William Thomson). Comme le souligne Philippe Breton avec très grande justesse, ces deux groupes de machines à calculer (calculateurs analogiques et calculateurs numériques, c'est-à-dire calculateurs mécaniques, électromécaniques et ordinateurs), furent « ...*construits non pas à la suite les uns des autres, comme sous l'effet d'un progrès constant, mais simultanément*⁴⁷⁴ ». Il n'y eut donc pas développement consécutif et comme cumulatif de deux types de machines⁴⁷⁵ différant fondamentalement en principe, les unes ayant été pour ainsi dire bâties sur et grâce aux progrès théoriques et techniques autorisés par leurs hypothétiques devancières, mais bel et bien croissance simultanée et parallèle de deux approches radicalement distinctes du calcul artificiel. Qu'est-ce donc alors qui fonde cette différence modale profonde ? Qu'est-ce qui permet, aussi, d'expliquer que des calculateurs aussi élaborés et aussi puissants que l'étaient effectivement les machines analogiques – mais aussi les grands monstres électromécaniques de la seconde guerre mondiale – aient totalement disparu dès après les années 1950 en laissant pour ainsi dire le champ absolument libre à la domination sans partage, ou ce qui n'allait pas tarder à devenir tel, de l'ordinateur ?

Répondre à cela – en d'autres termes comprendre la dynamique et l'épuisement final de cette alternative artefactuelle - exige une fois de plus que nous fassions retour vers la

⁴⁷⁴ In [Breton, 1990], p.68.

⁴⁷⁵ Ou plutôt de trois types puisque l'ordinateur, bien qu'automate numérique, ne partage plus grand chose en commun avec ses immédiats prédécesseurs mécaniques et électromécaniques sur les plans logique et architectural.

mathématique et l'histoire de la mécanisation et de l'automatisation du calcul. Avant d'aborder ces questions assurément passionnantes, il nous faut toutefois préciser en quoi consistent justement les principes fondamentaux sur lesquels reposent respectivement ces deux genres d'instruments. En procédant de la sorte, on se trouvera en effet à même d'entendre mieux tout ce que nous serons susceptibles de dire par la suite concernant leur développement et, le cas échant, leur « chute » ou leur triomphante consécration.

Comment décrire le *modus operandi* d'une machine analogique ? Comment, de la même manière, pouvoir rendre compte de celui d'une machine digitale ? Les déterminations, on l'imagine, ne manquent pas qui permettent finalement de répondre de façon plus ou moins complète, de façon plus ou moins satisfaisante à ces interrogations éminemment liées. Loin de la formulation de définitions minimalistes qui en disent souvent assez pour que l'on comprenne peu ou prou ce qui constitue leur objet sans pour autant qu'elles se forcent jamais à le dire complètement, deux penseurs majeurs de la figure de l'automate, le mathématicien John Von Neumann et le philosophe Jean-Claude Beaune, nous semblent avoir parfaitement appréhendé et exprimé l'essence et les enjeux dont sont respectivement porteurs ces deux genres de machines à calculer. Le premier, inventeur de l'ordinateur, parle cela va de soi en mathématicien et en ingénieur brillant, le second, non moins remarquable, en épistémologue. Les propos par conséquent, diffèrent en nature. Toutefois, gageons-en, c'est au point nodal où viennent converger leurs explications, dans la différence et la complémentarité indispensables des perspectives et compréhensions scientifiques adoptées de part et d'autre que l'on se trouvera à même de saisir le plus sûrement la nature profonde de ces deux lignées contemporaines de calculateurs.

2.2.5.1. Spécificités et limitations des machines et des calculateurs analogiques.

Commençons donc par la machine analogique et la définition qu'en donne l'inventeur de l'E.D.V.A.C. :

« Dans une machine analogique, chaque nombre est représenté par une quantité physique appropriée, dont la valeur, mesurée selon une unité définie au préalable, est égale au nombre en question. Cette quantité peut-être l'angle de rotation d'un certain disque, ou l'intensité d'un certain courant électrique, ou la valeur d'un certain voltage (relatif), etc. Pour permettre à la machine de calculer, c'est-à-dire d'opérer sur ces nombres selon un plan

prédéterminé, il est nécessaire de disposer des organes (ou des composants) qui puissent effectuer sur ces quantités représentatives les opérations de base des mathématiques⁴⁷⁶. »

Voici pour l'analyse du célèbre mathématicien de l'*Institute for Advanced Study*.
Quelle est, maintenant, celle que fait le philosophe des sciences et des techniques ? :

« Une alternative s'amorce, et deux voies s'ouvrent à l'automatisme mécanique... [La seconde consiste à] simuler le phénomène à étudier par un autre phénomène, régi par les mêmes équations, mais contenant des paramètres sur lesquels on peut agir plus rapidement, sans passer par la continuité étalée des enchaînements successifs et redondants. Continuité fonctionnelle et non continuité temporelle. Les moteurs électriques donneront à cette option théorique un contenu technique en formulant mécaniquement, par des résistances variables, selfs et potentiomètres, les équations différentielles d'un système matériel et ses équations aux dimensions. Simuler un phénomène physique par un autre : c'est l'amorce de la théorie des modèles et l'idée clé des machines analogiques⁴⁷⁷ ... ».

A la lecture de ces deux passages – mais point besoin non plus d'être grand clerc pour concevoir cela - on peut comprendre une chose incontinent : le fonctionnement des planimètres, des prédicteurs de marées et des analyseurs différentiels – toutes sortes de machines analogiques donc – est fondé sur le principe ... de l'analogie. Soit. Mais une définition circulaire, pour légitime qu'elle puisse être parfois, est par trop souvent impuissante à révéler quoi que ce soit sur ce sur quoi elle prétend justement statuer. Qu'est-ce que signifient alors les termes *analogie* et *analogique* tels que précisément employés ici, c'est-à-dire dans la sphère du calcul mécanique ? Selon André Lalande, l'*ἀναλογία* est « l'identité du rapport qui unit deux à deux les termes de deux ou plusieurs couples ». Au sens euclidien du mot – mais après tout il en existe bien d'autres - il s'agit également d'une *proportion mathématique*. C'est cette dernière acception qui devra tout particulièrement retenir notre attention car c'est bien dans la relation ou la proportion qu'entretiennent l'un à l'autre un certain type de phénomènes réels exprimés formellement et un autre, dont les instances se trouvent représentées grâce à quelques moyens physiques spécifiquement choisis, que s'élaborent la possibilité et l'efficacité mêmes de ces machines. La prise en compte des notions de représentation et de simulation, on l'aura peut-être déjà pressenti, s'avèreront par

⁴⁷⁶ In [Von Neumann, 1958], trad Fr., 1996, pp. 15-16.

⁴⁷⁷ In [Beaune, 1980], pp. 214-215.

ailleurs absolument incontournables si l'on ambitionne de les comprendre vraiment. Une simple montre bracelet à deux aiguilles, par exemple, est un instrument analogique. L'angle particulier qu'à tout instant l'aiguille des heures et celle des minutes forment sert ainsi à la *représentation* de l'heure courante. Bien entendu, la plupart des montres – quant elles ne sont pas digitales ou, comme on dit à tort, à « quartz » – disposent sur le pourtour de leur cadran d'une graduation numérique ou symbolique destinée essentiellement à faciliter mais aussi à accélérer la lecture de l'heure. Mais un adulte, avec un minimum de pratique, peut très bien se dispenser de pareils marquages et disposer d'une montre dont le fond parfaitement vierge ne l'empêchera nullement de connaître l'heure qu'il est : savoir interpréter l'angle aigu, droit, obtus ou plat formé par les aiguilles d'une montre à tel ou tel moment de la journée – donc savoir « lire » une configuration purement géométrique - c'est connaître l'heure, c'est-à-dire finalement se référer de manière indirecte à un phénomène astronomique dans une perspective généralement utilitaire. Sur le plan principiel – mais bien entendu les objectifs poursuivis et les moyens techniques mobilisés ici ne sont pas les mêmes – les calculateurs analogiques ne fonctionnent pas autrement. Ils incarnent ainsi littéralement une analogie du problème, ou plutôt une analogie de la classe de problèmes, à traiter. Puisqu'il est ici question de computation, ce qui se trouve représenté sous forme analogique – par l'entremise d'axes de longueurs variables, d'angles de rotation d'un disque ou encore d'intensités de courants électriques – ce sont les quantités numériques, variables et constantes, impliquées dans le calcul. Ce que l'on ne peut calculer que très difficilement par l'entremise des moyens mathématiques ou mécaniques « conventionnels » se voit donc traduit ou exprimé sous la forme d'un complexe appareillage *ad hoc* – ce qui explique au demeurant pourquoi les calculateurs analogiques sont à de très rares exceptions près des machines spécialisées dans la réalisation d'un type spécifique de calculs - constituant une analogie matérielle ou un équivalent concret du problème physico-mathématique à résoudre. Un phénomène physique régi par certaines équations différentielles est remplacé – simulé – par un autre phénomène physique, en l'occurrence un artefact spécialement conçu pour l'occasion, dont la structure et le comportement particuliers représentent et obéissent aux mêmes équations que le phénomène imité. Hors leur évidente hétérogénéité ontologique – ce qui est imité *n'est pas* ce qui imite et ce qui imite *n'est pas* ce qui est imité- la seule différence réellement notable ici est que ce dispositif est plus aisément manipulable, plus facilement et plus rapidement paramétrable, bref plus « simple » que l'objet ou le phénomène naturel ou artificiel auquel il renvoie et dont il sert à reproduire exactement le comportement dynamique sur le plan mathématique. On déplace ainsi le problème initial, ardu et peu commodément maîtrisable, en

lui conférant forme mécanique, en le modélisant sans en altérer la structure logique fondamentale, de façon à ce qu'il puisse être résolu à la fois avec efficacité et célérité. Comme le remarque judicieusement J.-C. Beaune, les calculateurs analogiques ouvrent sur le règne de la modélisation (permise fondamentalement par le développement de l'analyse harmonique et de l'analyse dimensionnelle), c'est-à-dire finalement sur l'observabilité et la répétition facilitées – bref la maîtrise à moindre coût - de phénomènes physiques autrement fort difficiles à appréhender, à reproduire et à comprendre. Tel est l'enjeu fondamental du calculateur analogique, du modèle scientifique expérimental qu'il constitue en tout premier lieu. Pour voir ensuite les machines à calculer automatiques devenir modèles des processus cognitifs, se faire véritables instruments d'exploration et de reproduction du connaître en acte pourrions-nous dire, il faudra cependant attendre l'apparition d'ordinateurs puissants⁴⁷⁸, les articles fondateurs de McCulloch et Pitts, de Turing, et les travaux subséquents de Newell, Shaw, Simon (créateurs du *Logic Theorist*) et de John McCarthy (développeur du LISI Processing).

Comme nous l'affirmions plus haut, les instruments de calcul analogiques (tout de même que les traités théoriques en faisant description), sont fort anciens. Le plus vieil astrolabe jamais découvert daterait ainsi de 1062. A la fin du 14^{ème} siècle (très vraisemblablement autour de l'année 1392), l'auteur des célèbres *Canterbury Tales*, le britannique Geoffrey Chaucer, a rédigé en anglais un *Treatise on the Astrolabe* destiné à son jeune fils Lewis (ce qui paraît en fait constituer le motif principal pour laquelle il ne l'a pas écrit en latin). Dans sa *Grande Syntaxe Mathématique* (ou *Almageste*), un traité renommé d'astronomie qui fut rédigé au premier siècle de notre ère, Ptolémaïs de Thébaïde fait déjà mention de la projection stéréographique, un concept absolument indispensable pour envisager la fabrication d'un astrolabe. Des astronomes et mathématiciens grecs, tels Théon d'Alexandrie (fin du 4^{ème} siècle après J.-C.), ou Philoponus (début du 6^{ème} siècle après J.-C.), décrivent également cet instrument dans certains de leurs textes. On peut donc légitimement supposer que cet instrument était d'usage relativement courant dans les premiers siècles de l'ère chrétienne. C'est cependant vers le milieu du 19^{ème} siècle que les dispositifs analogiques vont connaître un essor véritable dans le domaine des sciences et de l'ingénierie. A cette époque, les physiciens avaient développé un appareil conceptuel suffisamment sophistiqué pour leur permettre de décrire sous forme d'équations mathématiques le fonctionnement de

⁴⁷⁸ Dans son article « La naissance de l'intelligence artificielle », [Vandeginste et al. 1987], pp. 19-49, Jacques Pitrat rappelle que la plupart des premiers programmes d'intelligence artificielle seront « passés » sur l'I.B.M. 704 et ses variantes, un ordinateur à notation en virgule flottante introduite sur le marché en décembre 1955 par l'entreprise américaine.

mécanismes assez complexes. De la même manière, ils étaient capables d'effectuer l'opération inverse, *id est*, à partir d'un ensemble d'équations donné, de construire un appareil dont le fonctionnement ou le mouvement étaient en parfaite harmonie avec ces expressions mathématiques. Herman H. Goldstine décrit ainsi ce processus: « *The designer of an analog device decides what operations he wishes to perform and then seeks a physical apparatus whose laws of operation are analogous to those he wishes to carry out. He next builds the apparatus and solves his problem by measuring the physical, hence continuous, quantities involved in the apparatus*⁴⁷⁹. ».

Toute l'économie de l'approche analogique reposait par conséquent sur la possibilité de substituer un système matériel particulier à un problème mathématique donné, bref de *simuler* une expression mathématique au moyen d'une machine *ad hoc*. En vue d'illustrer immédiatement ses propos, Goldstine présente un exemple relativement élémentaire et commun de machine analogique, en l'occurrence la *slide rule*. Comme on le sait sûrement, une règle à calcul est constituée de deux « barres » graduées selon les logarithmes des nombres et dont la jonction mécanique leur permet d'effectuer un mouvement coulissant l'une par rapport à l'autre. Sur un tel instrument de calcul, qui permet d'effectuer l'addition de deux grandeurs, les quantités numériques sont en fait représentées par des *longueurs* de « barres ». Ce qui est par conséquent ajouté ici, ce ne sont pas des nombres mais les longueurs spécifiques qui, sur l'un et l'autre des éléments mobiles de la règle, servent à représenter ces valeurs numériques (la lecture du résultat de la sommation est alors facilitée par les graduations présentes sur les deux pièces coulissantes). En outre, et puisque l'on sait que $\log(x \times y) = \log(x) + \log(y)$, la règle à calcul, en effectuant déjà l'addition de deux longueurs, peut sans grande difficulté supplémentaire être aussi utilisée pour réaliser l'opération de multiplication. Dans tous les cas de figure pourrions-nous donc dire, et puisque avant toute chose la règle à calcul permet la mesure de longueurs, « elle » calcule sans réellement calculer.

Un autre genre d'instruments analogiques, il est vrai un peu plus récent que la règle à calcul dont la conception remonte à l'époque de William Oughtred et de Richard Delamain, est le planimètre (selon Georges Stibitz, le mathématicien à l'origine de la série des calculateurs des *Bell Labs*, son invention doit être attribuée à l'ingénieur allemand J.H. Herman en 1814). Les planimètres sont des dispositifs qui permettent, toujours sur le mode analogique, de calculer l'intégrale d'une fonction $f(x)$. En d'autres termes, et attendu que l'expression mathématique qu'ils simulent est une intégrale du type $\int_a^b f(x)dx$, ils ont été

⁴⁷⁹In [Goldstine, 1972], p. 40. Nous observons que l'auteur a souligné les termes « *analogous* » et « *measuring* ».

conçus afin de mesurer l'aire délimitée par une courbe fermée tracée sur un plan (ou une carte). Les planimètres, par essence, sont par conséquent des intégrateurs mécaniques. Des noms prestigieux, nous l'avons dit, sont associés à la conception de ces instruments. On citera notamment James Clerk Maxwell, qui en construisit un exemplaire en 1855 mais aussi James Thomson qui, s'inspirant de la réalisation du grand physicien écossais, en fabriqua également un au tout début des années 1860. Il devait d'ailleurs présenter cette machine aux membres de la prestigieuse *Royal Society* en 1876. Le délai de seize années qui s'écoula effectivement entre l'année où il développa cette machine et celle où il en fit officiellement la présentation est généralement attribué au fait qu'au court de cet intervalle, il se trouva dans l'incapacité de lui trouver une quelconque utilité pratique. Cette situation quelque peu surprenante, comme on dit quelquefois, se « débloqua » à l'occasion des discussions qu'il eut avec son frère à propos de la conception d'une machine analogique destinée à prédire les marées. Dans ses *Principles of Mechanics and Dynamics*, ouvrage coécrit avec son ami le physicien écossais Peter Guthrie Tait, Lord Kelvin cite son frère :

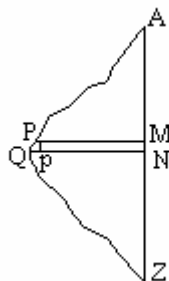
« The idea of using pure rolling instead of combined rolling and slipping was communicated to me by Prof. Maxwell, when I had the pleasure of learning from himself some particulars as to the nature of his contrivance... I succeeded in devising for the desired object a new kinematic method. Now, within the last few days, this principle, on being suggested to my brother as perhaps capable of being usefully employed towards the development of tide-calculating machines which he had been devising, has been found by him to be capable of being introduced and combined in several ways to produce important results⁴⁸⁰. ».

Pour concevoir ce planimètre, qui constituait donc une version amendée de celui fabriqué en 1855 par J. C. Maxwell, James Thomson eu la chance de jouir de l'aide inestimable de l'éminent scientifique britannique. La transformation majeure qui fut opérée sur cet instrument était la suivante : là où un principe cinématique combinant mouvements circulaires (*rolling*) et mouvements de translation ou de « glissement » (*slipping*) avait régi le fonctionnement des éléments de la machine, ne devait plus désormais subsister que le premier type de mouvements (les pièces mobiles principales en étaient un disque, une sphère et un cylindre). Ainsi modifiée, la machine devenait réellement fiable et, ainsi que l'a écrit J. Thomson, on pouvait désormais envisager de l'employer de diverses manières - elle et le

⁴⁸⁰ Thomson and Tait, *Principles of Mechanics and Dynamics*, Appendice B': III, « *An Integrating Machine having a new Kinematic Principle* », pp. 488-490; cité in [Goldstine, 1972], p. 41.

nouveau principe cinématique sur lequel elle reposait - pour « produire des résultats importants ». Puisque plus tard, en réalité à partir des années 1930, il sera largement repris par les concepteurs d'analyseurs différentiels, il serait peut être opportun à ce point d'examiner en détail le principe général de fonctionnement de ces instruments tout de même que la façon dont celui-ci fut effectivement réalisé au moyen de disques métalliques verticaux et horizontaux placés au contact les uns des autres. Dans sa « *Description of a New Form of the Planometer, an Instrument for Measuring the Areas of Plane Figures drawn on Paper* », un texte⁴⁸¹ paru pour la première fois en 1855 dans les *Transactions of the Royal Scottish Society of Arts* (Vol. IV), J. C. Maxwell a distinctement analysé le *modus operandi* des planimètres:

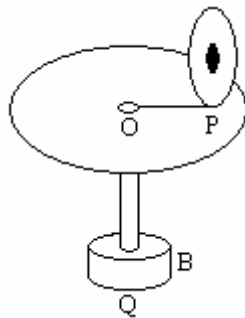
« En vue de réfléchir au principe qui régit les instruments de cette sorte, il sera nettement plus approprié de supposer l'aire de la figure mesurée par une ligne droite imaginaire qui, se déplaçant parallèlement à elle-même tout en modifiant dans le même temps sa propre longueur afin de correspondre à [la largeur de] cette zone, pourra alors balayer celle-ci très précisément. Soit alors AZ un segment vertical fixe et APQZ la limite de l'aire considérée. Soit également un segment horizontal PM capable de se mouvoir parallèlement à lui-même de A vers Z de telle manière que ses extrémités, respectivement P et M, suivent parfaitement le dessin de la courbe et le segment fixe AZ durant ce mouvement de translation.



Supposons à présent que le segment horizontal libre (que nous nommerons « ligne génératrice ») passe de la position PM à la position QN, la distance MN représentant alors une petite distance unitaire, disons un pouce pour être précis. Au cours de ce déplacement, la ligne génératrice balayera la bande étroite PMNQ dont la surface excède la portion PMNp par le petit triangle PQp. Mais puisque MN, la hauteur de la bande ainsi balayée, vaut un pouce, la zone couverte contiendra autant de pouces carrés que PM mesure de pouces en longueur ; de la sorte, lorsque la ligne génératrice descend d'un pouce, elle balaie un nombre de pouces carrés égal au nombre de pouces linéaires spécifiant sa longueur.

⁴⁸¹ Ce travail a fait l'objet d'une réédition dans *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Dover Edition, New York, 1965, pp. 230-232 ; cité in [Goldstine, 1972], p. 41-43.

Donc, si nous avons une machine dotée d'un index de n'importe quelle sorte qui, lorsque la ligne génératrice se déplace d'un pouce vers le bas, avance d'autant de degrés que cette ligne possède de pouces en longueur et si encore cette ligne génératrice, à chaque fois qu'elle se meut ainsi, voit sa longueur modifiée en conséquence, l'index indiquera finalement le nombre de pouces carrés balayés durant la totalité de l'opération. Par la méthode ordinaire des limites, il peut être démontré que si ces changements sont rendus continus au lieu d'être discrets, l'index mesurera encore l'aire de la courbe suivie par l'extrémité de la ligne génératrice...



Nous devons à présent considérer les différentes méthodes permettant de communiquer le mouvement requis à l'index. La meilleure consiste à employer deux disques : le premier d'entre eux, qui tourne sur un axe vertical OQ, possède une surface plate et rugueuse. Quant au second, il est disposé verticalement de manière à ce que sa circonférence repose sur la surface plate du premier disque en un point nommé P. De cette façon, il peut être mis en mouvement [circulaire] par la rotation du disque sur lequel il se trouve placé. La vitesse du deuxième disque dépendra de OP, la distance qui sépare le point de contact P du centre du disque horizontal ; si l'on fait en sorte que la distance OP soit toujours égale à [la longueur de] la ligne génératrice [i.e. $OP = PM$], les conditions de l'instrument seront intégralement remplies. Ceci est accompli en amenant le disque-index à se mouvoir le long du rayon du disque horizontal ; lorsque l'instrument fonctionne, le mouvement du disque-index est composé d'un mouvement roulant dû à la rotation du premier disque, et d'un mouvement de glissement dû à la variation [de la longueur] de la ligne génératrice⁴⁸². ».

Comme nous l'avons dit, la fonction d'un planimètre consiste à mesurer des aires. Ce faisant, il ne réalise pourtant aucun calcul. Plutôt, il mesure. Dans un instrument analogique,

⁴⁸² Cette traduction est nôtre.

quel qu'il soit au demeurant, il n'existe en effet rien de tel qu'une unité mécanique spécifiquement dédiée aux opérations arithmétiques élémentaires (à la manière du *Mill* de l'*Analytical Engine*). Ce sont en fait la disposition et le mouvement physique des éléments constitutifs du planimètre qui représentent l'opération d'intégration qu'il effectue sans jamais procéder à une quelconque évaluation numérique : ici, aucune valeur, à proprement parler, n'est jamais passée à l'intégrale $\int_a^b f(x)dx$. Cependant la sortie de l'appareil, qui correspond donc à la position terminale du disque-index (ou du cylindre-index), à la fin du processus, retourne bien la valeur de l'aire de la figure mesurée ou « calculée ».

Sir William Thomson – Lord Kelvin – fut le premier à faire réellement usage du nouveau principe cinématique conjointement développé par son frère et James C. Maxwell pour fabriquer des instruments susceptibles de réaliser des tâches qui, par leur nature, dépassaient les capacités normales des mathématiciens humains. Il inventa ainsi plusieurs dispositifs – sans toujours les réaliser si l'on pense à son *Differential Analyser* - reposant sur cette modalité fonctionnelle :

- un *Tide Gauge*, pour mesurer la hauteur de la mer à un instant donné par rapport à une ligne référentielle prédéterminée (une courbe devait être tracée sur une feuille de papier en fonction de ce repère permanent).
- un *Tidal Harmonic Analyser*, qui, comme l'a écrit J. C. Maxwell, permettait « *d'obtenir simultanément huit des intégrales requises par une expression des séries de Fourier à partir de l'enregistrement de n'importe quelle quantité variant périodiquement telle la hauteur de la marée, la température de la pression de l'atmosphère ou l'intensité des différents composants du magnétisme terrestre* ». Il est extrêmement intéressant de remarquer que Lord Kelvin, dans ses *Mathematical and Physical Papers*, fit la déclaration suivante à propos de cet analyseur harmonique : « *The object of this machine is to substitute brass for brain in the great mathematical labor of calculating the elementary constituents of the whole tidal rise and fall*⁴⁸³ ». Selon les termes même employés par Kelvin, il ne s'agissait donc plus ici de remplacer l'action du mathématicien par la machine mais plutôt le *cerveau* de celui-ci par un mécanisme fait de cuivre. C'est là bien entendu un thème que nous ne manquerons pas de retrouver largement développé, mais dans un tout autre contexte, sous les plumes d'Alan M. Turing et de John Von Neumann, les « pères » de

⁴⁸³ Lord Kelvin, *Mathematical and Physical Papers*, vol. VI., p. 280; cité in [Goldstine, 1972], p. 43.

l'ordinateur... Un autre instrument analogique du même genre, mais un peu plus petit que le précédent, fut également construit par Lord Kelvin avec le soutien financier de la *British Association for Advancement of Science* et de la *Royal Society*⁴⁸⁴. Ce dispositif pouvait prendre en charge les fonctions harmoniques de la forme suivante : $A + B \sin \theta + C \cos \theta + D \sin 2\theta + E \cos 2\theta$. Cette expression formelle, qui correspond entre autres choses à une fonction de l'angle directionnel θ d'un navire, peut exprimer la déviation de l'aiguille de la boussole de bord d'un vaisseau par rapport à la lecture vraie de l'azimut (notons qu'elle peut également exprimer d'autres phénomènes similaires eux aussi susceptibles de faire l'objet d'une analyse harmonique). Une fois les coefficients A, B, C, \dots identifiés, de petits blocs métalliques pouvaient être insérés dans le logement de la boussole de manière à compenser exactement la déviation de l'aiguille magnétique. Notons que cette procédure était encore en usage au cours de la deuxième guerre mondiale.

- un *Tide Predictor* permettant, à partir de relevés conventionnels ou des courbes enregistrées par le *Tide Gauge*, de prédire pour une zone maritime spécifique⁴⁸⁵ non seulement le comportement des marées à venir mais aussi la hauteur de l'eau à n'importe quel moment de n'importe quel jour de l'année⁴⁸⁶.
- un *Differential Analyser* : de loin la machine la plus intéressante ici pour notre propos puisqu'il s'agissait d'un calculateur mécanique analogique capable de procéder à l'intégration d'équations linéaires générales du second ordre avec des coefficients variables. Ce sont là des expressions mathématiques de première importance dans le champ de la physique puisqu'elles permettent *inter alia* de décrire le comportement d'une chaîne pendante, d'un flux d'air dans un tuyau de section irrégulière, d'un écoulement d'eau dans un canal de largeur et de profondeur inégales ou encore celui de la conduction de la chaleur dans une barre métallique de section et de conductivité non uniformes. Elles concernent tout autant l'ingénieur et le militaire puisqu'en général, les circuits électriques et les trajectoires balistiques peuvent être décrits en usant de ce moyen.

⁴⁸⁴ D'après J. Ramunni, cette machine fut adoptée par le *Meteorological Committee* pour traiter des problèmes météorologiques.

⁴⁸⁵ Un port par exemple.

⁴⁸⁶ Cette machine resta en usage dans le port de Liverpool jusqu'au début des années 1960 (!).

Lord Kelvin envisagea la construction d'un analyseur différentiel réalisant l'équation différentielle⁴⁸⁷ suivante : $\frac{d}{dx} \times \left(\frac{1}{p} \times \frac{du}{dx} \right) = u$. Pour cela, la machine analogique devait être principalement composée de deux modules d'intégration. Le premier d'entre eux aurait dû servir à former l'expression : $g_1(x) = \int_0^x u_1 dx$, le second l'expression $u_2(x) = \int_0^x p(x)g_1(x)dx$. Il avait été prévu que le schème opératoire de l'appareil serait de type itératif : après avoir entré une approximation de u dans la machine, disons u_1 , on obtenait par conséquent u_2 . Il était ensuite nécessaire de reprendre cette valeur, de la réinsérer dans l'analyseur (sous forme analogique s'entend), ce qui permettait alors de calculer u_3 . En répétant le même processus n fois, il était donc possible de produire successivement u_4 , puis u_e , u_{e+1} et ainsi de suite jusqu'à u_n . Cette procédure, en général, est convergente, ce qui signifie qu'au fur et à mesure que l'opération se voit réitérée, le résultat obtenu en sortie de l'appareil est raffiné : en d'autres termes, et avec le temps, ce résultat tend à approcher la « vraie » solution du problème de façon asymptotique. Alors qu'en 1876 il travaillait encore à la mise au point de sa machine, Lord Kelvin fit une découverte mathématique qui ne manqua ni de le surprendre, ni de le réjouir: selon ses termes propres, il existait en effet un « *compel agreement* », c'est à dire un accord ou plutôt une concordance irrésistible, entre la fonction placée en entrée de la double machine et celle qui était produite en sortie. Nous n'examinerons pas ici de manière détaillée la découverte et la démonstration de Lord Kelvin (rapportées par ailleurs dans un article coécrit avec son frère en 1876). Nous nous contenterons plutôt de les présenter dans leur généralité (nous emprunterons là à H. H. Goldstine), et surtout de souligner les conséquences assurément remarquables qu'elles eurent sur le schéma organisationnel de son analyseur différentiel. On constatera donc que dans le corps de la seconde intégrale apparaît une occurrence de la fonction $g_1(x)$, laquelle fonction est en fait également calculée dans la première intégrale. Ceci, en terme différentiels, peut être exprimé de la manière suivante : $dg_1 = u dx, du = p g_1 dx$. De ce fait, il est possible de procéder à une simplification de ces relations en éliminant dans l'une et l'autre les occurrences de $g_1(x)$. A partir de la mise en rapport des deux nouvelles égalités obtenues par ce moyen, il est alors possible de retrouver l'expression spécifiquement représentée par l'analyseur différentiel, à savoir

⁴⁸⁷ Dans laquelle la variable p correspond à une fonction de x . Au début du processus, une approximation de u , nommée u_1 , devait être fournie.

$\frac{d}{dx} \times \left(\frac{1}{p} \times \frac{du}{dx} \right) = u$. Ainsi que l'explique H. H. Goldstine⁴⁸⁸, Lord Kelvin remarqua que si l'on pouvait faire en sorte que le résultat de la seconde intégration constitue directement l'entrée de la première, cela permettrait de transformer u (en l'occurrence u_1), en u_2 en une seule opération. D'un point de vue purement pratique, ce « *back-coupling* » des équations implique qu'avec une seule itération, ou, si l'on préfère, un « cycle » machine unique, le problème peut se trouver résolu. L'idée clé, ici, était qu'avec ce schème il devenait en principe possible de résoudre des équations différentielles du $n^{\text{ième}}$ degré en chaînant ensemble un nombre suffisant d'intégrateurs de manière à ce que la sortie de chacun d'entre eux puisse servir d'entrée au suivant. Sur le plan formel donc, la question avait pour ainsi dire été élégamment résolue. Restait néanmoins à mettre au point un dispositif mécanique particulier permettant de connecter l'un à l'autre les deux modules intégrateurs de la machine de sorte à ce que la sortie du second puisse effectivement servir d'entrée au premier. Il s'agissait par conséquent d'automatiser le processus d'alimentation précisément requis ici. Or ceci, à l'époque, n'alla pas sans poser d'insurmontables difficultés techniques. Sur cet analyseur différentiel, la sortie d'un intégrateur – le résultat de son opération – était en effet mesurée grâce à la rotation d'un cylindre relié à une sphère elle-même mue par le mouvement circulaire du disque sur lequel il reposait. Le fonctionnement général de l'appareil, on le voit, reposait donc intégralement ou quasi intégralement sur le principe de la friction mécanique. Le moment de torsion (*torque*) – c'est-à-dire la capacité pour un axe ou un disque à entraîner un autre par friction mécanique – de ces pièces était malheureusement très faible. Si une tension trop importante se voyait appliquée à tout ou partie de l'ensemble des éléments du système, certains d'entre eux tendaient invariablement à glisser ou à « patiner », ce qui avait bien sûr pour conséquence inévitable de rendre aussitôt les résultats des calculs totalement invalides. Lord Kelvin, pour des raisons d'ordre purement technologique – des motifs techniques « victoriens » pourrions-nous dire – se révéla finalement dans l'incapacité de remédier à ce problème de « pertes » mécaniques, ce qui permet de comprendre pourquoi il ne se trouva jamais en mesure de donner corps au calculateur analogique qu'il avait imaginé. Il fallut en réalité attendre les années 1930 et les travaux de recherches conduits par Vannevar Bush et Harold L. Hazen au département d'ingénierie électrique du M.I.T. pour voir enfin se dessiner une solution technologique réellement probante.

⁴⁸⁸ [Goldstine, 1972], p. 50.

Entre 1927 et 1942 Vannevar Bush et ses collaborateurs construisirent en fait trois calculateurs analogiques (à l'origine, tous semblaient destinés à l'analyse des réseaux électriques). La première de ces machines, qui fut développée en 1927 sur la base du *continuous intergraph*⁴⁸⁹ pour résoudre des équations différentielles du second ordre et démontrer en même temps la viabilité de ces dispositifs dans le champ des sciences et de l'ingénierie, ne disposait que d'une seule unité intégratrice⁴⁹⁰. Il s'agissait d'un compteur électrique – en fait une version modifiée de celui qu'Elihu Thomson avait inventé en 1883 – possédant deux entrées différentes données sous forme de courants électriques et une sortie unique constituée cette fois par une rotation mécanique. V. Bush et H. L. Hazen étaient au courant des recherches antérieurement effectuées par James Thomson et Lord Kelvin. Ils connaissaient donc l'analyseur différentiel à double intégrateur dont le prestigieux physicien britannique avait un temps envisagé la construction avant d'achopper définitivement sur la réalisation du système de connexion autorisant la liaison de ces deux modules d'intégration. Ils reprirent par conséquent cette idée dans la perspective d'améliorer les capacités de leur propre machine. Cependant, il était à cette époque extrêmement difficile de parvenir à effectuer la conversion d'un mouvement rotatif en un courant électrique, quasi impossibilité technique qui d'emblée devait leur interdire l'usage d'un second compteur en guise d'intégrateur (les lignes d'entrée de ces derniers instruments, rappelons-le, étant justement des courants électriques). Etant donné que son entrée était de nature mécanique – on pouvait donc le relier à la sortie d'un compteur électrique sans rencontrer de difficulté technique majeure – Bush et Hazen trouvèrent finalement dans l'intégrateur conçu par James Thomson une solution adéquate à leur problème. Ils purent ainsi construire leur nouveau calculateur analogique en couplant la sortie mécanique du premier module d'intégration – le compteur électrique – à l'entrée de cet intégrateur mécanique. Bien que la machine fonctionnât effectivement, cette espèce de mixité technologique – en plus d'être assez inélégante sur le seul plan de l'ingénierie – avait pour conséquence somme toute fort contrariante d'en limiter sensiblement la portée ainsi que les performances. Insatisfait, tout de même que très désireux de découvrir un moyen technique qui permettrait de corriger ces défauts, Bush reprit donc ses travaux de recherches et c'est en 1930 qu'il parvint enfin à définir une solution technique véritablement idoine. Le dispositif original employé pour cela par V. Bush reposait en fait

⁴⁸⁹ Le *continuous intergraph*, aussi appelé *product intergraph*, était un dispositif conçu pour résoudre des équations différentielles du premier ordre. Sur le plan technologique, il ne représentait donc pas véritablement un progrès par rapport aux réalisations des frères Thomson. C'est sur la suggestion d'Harold L. Hazen que V. Bush décida de lui adjoindre un second niveau d'intégration.

⁴⁹⁰ Par la suite, et sur la suggestion du mathématicien Norbert Wiener, V. Bush devait utiliser à cette fin des dispositifs cinématographiques et photoélectriques.

sur le principe du cabestan, c'est-à-dire celui du treuil à axe vertical que l'on utilisait par exemple couramment sur les docks des ports afin de faciliter le levage de charges extrêmement pesantes. Ce *torque amplifier*, ou « amplificateur de moment de torsion », avait été inventé par C. W. Niemann, un ingénieur de la firme américaine *Bethlehem Steel Corporation*.

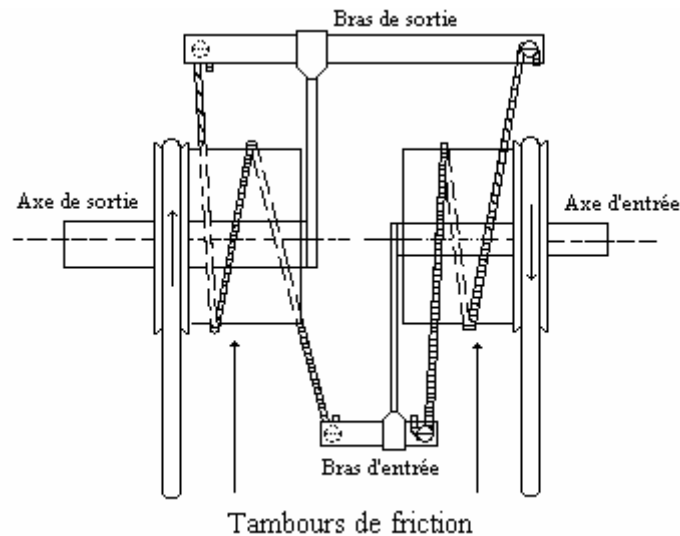


Fig. 14 : le *torque amplifier* utilisé par V. Bush pour relier les deux intégrateurs mécaniques sur son premier analyseur différentiel⁴⁹¹.

Cette unité amplificatrice, en la couplant par exemple à un servomoteur tournant à vitesse constante, permettait de transmettre entièrement le mouvement de rotation de l'axe de sortie d'un intégrateur à l'axe d'entrée du module d'intégration suivant en accroissant le moment de torsion de ces arbres à peu près dix mille fois. De cette façon, le phénomène de « *slipping* » ou de déperdition mécanique qui touchait autrefois les pièces solidaires de l'ensemble pouvait être parfaitement prévenu et l'intégrité des résultats du calcul efficacement préservée. En 1931, V. Bush publia un article intitulé « *The Differential Analyser, A new Machine for Solving Differential Equations* », dans lequel il procédait à la description sa nouvelle machine : un analyseur différentiel. Ce calculateur analogique, le premier du genre à avoir donc été complété, constituait une sorte de généralisation des machines précédemment fabriquées par le chercheur du M.I.T. Tandis que ces dernières ne pouvaient prendre en charge qu'un seul type de problèmes scientifiques ou d'ingénierie (il s'agissait donc, pour parler comme nos homologues anglo-saxons, de *one kind analog computers*), l'analyseur différentiel pouvait au contraire traiter une classe entière de problèmes mathématiques, à

⁴⁹¹ D'après un dessin original de Vannevar Bush publié dans son article « *The Differential Analyser, A new Machine for Solving Differential Equations* », in *Journal of the Franklin Institute*, vol. 212, 1931.

savoir ceux susceptibles d'être spécifiés sous la forme d'équations différentielles ordinaires. Cette caractéristique n'en faisait pas pour autant un calculateur universel – tout du moins au sens moderne du terme – mais sa généricité contribua incontestablement à en faire l'une des machines à calculer les plus puissantes de la période d'entre-deux guerres. L'analyseur différentiel de V. Bush comprenait plusieurs types d'unités élémentaires: six modules d'intégration (les compteurs électriques ayant été ici totalement abandonnés au profit des intégrateurs de type Thomson), des mécanismes spécifiquement dédiés à l'effectuation de la multiplication⁴⁹², des engrenages différentiels pour réaliser les opérations d'addition et de soustraction, trois « tables » grâce auxquelles les opérateurs pouvaient entrer des fonctions mathématiques en fonction des besoins courants ainsi qu'une « table » de sortie permettant l'affichage graphique des résultats du calcul. Tous ces éléments mécaniques étaient actionnés et articulés les uns aux autres par des pièces - arbres ou engrenages - animées d'un mouvement rotatif. Quant aux différentes quantités essentielles aux calculs et aux valeurs résultantes, elles étaient représentées sur le mode analogique par la rotation angulaire d'arbres spéciaux. Comme on l'imagine sûrement, paramétrer l'analyseur différentiel – au demeurant une machine de dimension extrêmement respectable - pour effectuer un calcul particulier n'était guère chose aisée⁴⁹³. C'était une opération de préparation qui réclamait un temps assez considérable (de l'ordre d'une à deux journées), tout de même qu'une attention permanente de la part des opérateurs chargés de cette tâche à la fois délicate et cruciale (toute erreur commise durant cette longue mise en œuvre se traduisait nécessairement par l'introduction d'un délai d'attente supplémentaire afin de détecter et de corriger celle-ci). Fort heureusement – sinon le temps requis pour préparer la machine aurait été tel qu'il aurait peut-être mieux valu tout bonnement s'en passer et effectuer les calculs d'une autre manière – la fréquence de cette procédure était relativement peu élevée. La plupart des problèmes traités par les analyseurs différentiels, comme ceux relevant par exemple du domaine de la balistique, n'impliquaient en général la réalisation que d'une seule équation différentielle. De ce fait, les modifications qu'il était nécessaire d'apporter à la configuration globale du dispositif pour résoudre de nouveaux problèmes se résumaient la plupart du temps à quelques ajustements mineurs. Le temps de configuration de la machine, laquelle était par ailleurs extrêmement rapide pour effectuer les calculs, ne représentait plus à partir de là un facteur susceptible à la longue de se révéler rédhibitoire.

⁴⁹² La multiplication n'est pas une opération élémentaire pour un analyseur différentiel. Elle peut néanmoins être composée au moyen de l'expression suivante : $uv = \int u dv + \int v du$.

⁴⁹³ Et pour cause ! La « programmation » de la machine devait en fait être effectuée à la clef et au marteau !

Entre 1930 et 1950, date approximative à laquelle le glas commença de sonner qui annonçait l'extinction prochaine et irrémédiable de la lignée des machines à calculer analogiques, de nombreux analyseurs différentiels furent construits de part et d'autre de la planète. En Grande-Bretagne, Douglas Hartree, alors professeur de physique à l'université de Manchester, fabriqua une telle machine uniquement à partir d'éléments tirés du célèbre jeu de construction Meccano. Peu de temps après que D. Hartree et son assistant, A. Porter, eurent réussi à mener à son terme cette entreprise pour le moins étonnante, le physicien parvint à convaincre l'homme d'affaires britannique Sir Robert McDougall de participer largement au financement d'un analyseur différentiel destiné à sa propre université. La machine fut réalisée par la firme anglaise *Metropolitan-Vickers Electrical Co. Ltd.* et Vannevar Bush convié à participer au projet en tant que consultant technique. Un analyseur différentiel reprenant largement les traits architecturaux de la machine de Bush fut également fabriqué à l'université de Cambridge sous la direction du professeur de chimie fondamentale Sir John E. Lennard-Jones. Une fois achevée sa construction, il fut installé au laboratoire de mathématique de cette institution. Aux Etats-Unis aussi l'instrument de calcul mis au point par V. Bush ne manqua pas de susciter rapidement un très vif intérêt auprès des centres de recherche et des universités les plus renommées. Parmi ceux-ci, on ne saurait bien sûr omettre de mentionner le *Ballistic Research Laboratory* et la *Moore School of Electrical Engineering* de l'université de Pennsylvanie, deux instituts dont on connaît l'importance du rôle qu'ils furent appelés à jouer dans la mise au point et la montée en puissance de l'ordinateur au cours des années quarante. Les représentants du B.R.L. et de la *Moore School* qui assistèrent en 1930 à la cérémonie d'inauguration du calculateur de Bush (ou ceux qui prirent par la suite connaissance de son article fondateur de 1931), furent prompts à percevoir tout le bénéfice qu'ils pourraient effectivement tirer de l'usage d'un analyseur différentiel pour résoudre les équations différentielles liées aux questions de balistique, qui les équations différentielles relevant du champ de l'ingénierie électrique. De manière indépendante, les deux groupes ne tardèrent donc pas à approcher V. Bush afin de convenir des termes d'un accord de partenariat visant à démarrer la construction d'une copie de la machine du M.I.T. Un programme de recherche fut finalement défini en 1933 qui impliquait conjointement la participation de Vannevar Bush, de la *Moore School of Electrical Engineering* et de l'*Ordnance Department of the U.S. Army* (autre acteur majeur de l'histoire des ordinateurs). A la suite de cela, et sur la base de ce programme commun, un accord fut également signé entre le B.R.L. et la *Moore School*. Ces machines, le calculateur « militaire » d'Aberdeen et le calculateur « scientifique » de la *Moore School*, bénéficièrent toutes deux de la supervision de V. Bush et devaient être

opérationnelles dans le courant de l'année 1934. Dans son *History of Computing Technology*⁴⁹⁴, Michael R. Williams signale qu'à peu près à la même époque, des analyseurs différentiels furent construits en Allemagne, en Norvège⁴⁹⁵ et en U.R.S.S.

Entre 1930 et la fin de la deuxième guerre mondiale, les calculateurs analogiques firent l'objet de constantes améliorations. Ainsi, peu de temps avant que la deuxième guerre mondiale ne débute, V. Bush mis au point un nouvel analyseur différentiel, le *Rockefeller Differential Analyser*, au sein duquel la plupart des connexions mécaniques avaient été remplacées par des composants électriques remplissant exactement la même fonction de transmission (les intégrateurs demeuraient cependant des unités mécaniques). Cette mutation radicale permit d'une part de réduire plus encore le risque de voir survenir le phénomène critique de « *slipping* » et d'autre part d'augmenter grandement la vitesse de fonctionnement moyenne du dispositif. En 1942, Bush et Samuel H. Caldwell construisirent encore une machine de ce type sur laquelle la configuration des connexions internes correspondant aux équations à résoudre pouvaient être paramétrée automatiquement et très rapidement⁴⁹⁶ grâce à une séquence de contrôle perforée sur une bande de carton. De façon certes un peu ironique, on ne manquera pas de remarquer que là où Lord Kelvin et James C. Maxwell avaient choisi de privilégier le calcul analogique au détriment de l'approche digitale – tournant par là même le « dos » à Charles Babbage – Bush et Caldwell lui empruntaient maintenant le principe du contrôle par cartons perforés de l'*Analytical Engine*, une machine numérique donc, pour accélérer le processus de la configuration de leur calculateur analogique...

Tout au long de la période que nous avons évoquée, les analyseurs différentiels se révélèrent être des instruments de calcul rapides et suffisamment génériques pour répondre adéquatement aux besoins des centres de recherche les plus renommés ainsi qu'à ceux des forces armées. Pourquoi, alors, disparurent-ils à l'orée des années cinquante ? Qu'est-ce donc qui provoqua ainsi leur « perte » ? Pour répondre correctement à cette question, il ne suffit pas seulement pas d'invoquer les noms de Von Neumann, d'Eckert et de Mauchly et d'affirmer

⁴⁹⁴ In [Williams, 1997], p. 206.

⁴⁹⁵ Concernant l'analyseur différentiel de l'Institut de Physique de l'université d'Oslo, M. R. Williams rapporte d'ailleurs une anecdote assez intéressante : en 1940, c'est-à-dire peu après l'invasion de la Norvège par les Nazis, une délégation de militaires allemands se présenta pour inspecter ce calculateur. D'après les témoignages de l'époque, il semble que leur intention véritable était de ramener la machine en Allemagne afin qu'elle puisse servir à l'avancement de leurs propres travaux militaires (peut-être des recherches en balistique liées à la mise au point des fusées V1). Un des hauts responsables du Département de Physique, conscient des enjeux que cela pouvait représenter, s'enfuit en Suède en ne manquant pas d'emporter avec lui quelques-unes des pièces vitales de l'analyseur parmi lesquelles figuraient bien sûr en bonne place le *torque amplifier*. Il s'agit donc là très sûrement d'un des premiers cas répertoriés de sabotage « informatique » (on nous pardonnera sans doute l'emploi de ce dernier terme qui dans le contexte historique, cela va de soi, est parfaitement abusif).

⁴⁹⁶ En moyenne un délai de 3 à 5 minutes était requis pour les problèmes les plus complexes.

qu'en 1945, l'invention de l'ordinateur électronique eut pour effet incontinent de mettre irrémédiablement ces calculateurs au ban des mondes de la recherche militaire et scientifique. Bien entendu, il est parfaitement exact que le développement consécutif des calculateurs numériques et des ordinateurs porta un coup extrêmement rude à la perpétuation de la lignée des calculateurs analogiques au point même d'y mettre un terme définitif. Mais c'est bien vite oublier que tout juste avant la guerre – au cours de laquelle toutes les machines analogiques disponibles furent réquisitionnées par les belligérants pour calculer des tables de tir balistique - les analyseurs différentiels électromécaniques étaient bien plus rapides et bien plus faciles à configurer⁴⁹⁷ que la plupart des machines digitales existantes. Le moins que l'on puisse dire est donc qu'ils avaient fait plus que largement la preuve de leur efficacité. Comment, dans ces conditions particulières, pouvons-nous alors rendre compte de leur progressive disparition ?

Les physiciens de la fin du 19^{ème} siècle, avons-nous noté plus haut, disposaient d'outils mathématiques suffisamment élaborés pour les autoriser à construire des descriptions formelles de mécanismes compliqués. Inversement, c'est-à-dire en prenant maintenant comme point de départ certaines formules mathématiques, ils se trouvaient généralement en mesure de concevoir des machines spéciales capables – au moins en théorie - de résoudre ces expressions particulières. Par essence, un calculateur analogique n'est rien d'autre que cela. C'est un instrument mécanique ou électromécanique dont toute l'économie interne sert à simuler – pour reprendre ici le terme de J.-C. Beaune – une expression, ou, s'il est de nature plus générale, un certain type d'expressions mathématiques correspondant à un phénomène physique, en vue de leur résolution. C'est bien dans cette idée, finalement, que réside toute la puissance de ces machines. Mais c'est aussi ce qui constitue l'origine profonde de la faiblesse qui leur fut pour ainsi dire « fatale »... Pour identifier et comprendre proprement les limites théoriques mathématiques et techniques infranchissables auxquelles sont nécessairement soumis les analyseurs différentiels - mais ce que nous dirons par la suite pourra être étendu à toute machine à calculer analogique en général - il convient d'invoquer trois facteurs essentiels qui sont : 1) la généralité ; 2) la précision ; 3) la vitesse d'opération. Commençons donc par examiner le premier de ces trois points : en droit, il semble toujours possible de concevoir un dispositif analogique capable d'exécuter un calcul donné. Mais pouvoir concevoir, ici peut-être plus qu'ailleurs, ne signifie pas nécessairement se trouver ensuite en mesure de fabriquer. Lord Kelvin, quelque cinquante années avant les travaux décisifs de Vannevar Bush, avait effectivement eu l'idée de l'analyseur différentiel. Pourtant l'illustre

⁴⁹⁷ Surtout si l'on songe à l'E.N.I.A.C.

physicien anglais se trouva de fait dans l'impossibilité technique de le construire et la machine dû attendre 1930 et avec cela la « redécouverte » et l'appropriation par Bush du *torque amplifier* de Niemann, pour enfin prendre corps. Nous n'affirmons nullement qu'il faille ériger ici ce cas de figure particulier, par ailleurs assurément remarquable sur les plans historique et épistémologique, en généralité. En réalité, il constituerait plutôt une exception. Ainsi, force est de constater que de très nombreuses machines analogiques ont été régulièrement construites entre la moitié du 19^{ème} siècle et celle du 20^{ème}. En outre il convient également de remarquer qu'une fois le problème de la connexion entre les modules d'intégration résolu, les analyseurs différentiels ont eux aussi connu un développement très important. C'est justement là, pour ainsi dire dans la « prolifération » ou la « succession » des dispositifs, que nous croyons que le problème doit être véritablement repéré. Ainsi James C. Maxwell, James Thomson, Lord Kelvin, Vannevar Bush, Truman S. Gray⁴⁹⁸, mais aussi Albert A. Michelson, John E. Lennard-Jones et Douglas R. Hartree, tous pionniers vénérables, à une époque ou une autre, de l'approche analogique, conçurent et très souvent fabriquèrent un nombre réellement conséquent de machines. De façon à qualifier l'approche analogique (d'une manière un peu rapide et réductrice c'est vrai), nous pourrions peut-être alors écrire la chose suivante : « à chaque problème ou classe de problèmes une machine, à chaque machine un problème ou une classe de problèmes ». Qu'entendons-nous donc signifier par là ? Les dispositifs analogiques, de par leur nature même, correspondaient nous l'avons déjà dit à un problème ou un type de problèmes mathématiques très spécifiques. Pour la plupart, il s'agissait par conséquent de machines extrêmement spécialisées et quant elles se trouvaient quelquefois dotées d'une plus grande genericité (comme par exemple les analyseurs différentiels de type Bush), leur portée se limitait toujours à la résolution d'une classe particulière de problèmes mathématiques. De ceci, on peut d'une part conclure de l'indéniable efficacité de l'approche analogique dans un certain nombre de domaines restreints (ceux pour lesquels elles avaient bien entendu été élaborées), et, d'autre part, de son très grand manque de flexibilité et de genericité. Ainsi dans la pratique les utilisateurs scientifiques des analyseurs différentiels étaient très fréquemment contraints, lorsque cette dernière opération s'avérait effectivement réalisable, de transformer la forme originale de leur problème pour pouvoir le traiter étant bien entendu que la machine, elle, ne pouvait aucunement être adaptée

⁴⁹⁸ Sur une idée originale de Norbert Wiener, T. S. Gray conçut au M.I.T. le *Cinema Intergraph*, une machine qui pouvait calculer l'intégrale suivante : $F(x) = \int_a^b f(x \pm y)g(y)dy$.

à celui-ci. De ceci il ressort très nettement que l'approche analogique était en fait très mal adaptée à la résolution d'une large gamme de problèmes scientifiques.

Examinons à présent les questions de la précision de travail et de la vitesse de fonctionnement des machines analogiques, lesquelles, nous allons le voir incessamment, représentent en réalité des facteurs limitatifs très étroitement dépendants l'un de l'autre. En principe, avons-nous assuré, il est toujours possible de définir formellement un dispositif analogique permettant de solutionner un problème ou un type de problèmes mathématiques particuliers. Mais, pour le dire à la manière de Bergson, une chose est d'imaginer, une autre est de parvenir à réaliser concrètement ce que l'on a imaginé. Pour bien saisir ce que nous allons dire par la suite, mais il ne s'agit que d'un exemple parmi bien d'autres, peut-être convient-il ici de rappeler que le deuxième analyseur différentiel construit par V. Bush (le *Rockefeller Differential Analyser* électromécanique), comprenait des milliers de pièces individuelles différentes (des arbres, des roues dentées, des engrenages, des tubes à vide, plus de deux cents kilomètres de câbles électriques, des milliers de relais, 150 moteurs électriques), qu'il pesait plus d'une centaine de tonnes et occupait au M.I.T. une surface au sol de plusieurs dizaines de mètres carrés. Une moindre chose est donc de reconnaître qu'il s'agissait en l'occurrence d'une machine absolument gigantesque. Or il s'avère qu'en général les capacités computationnelles et la précision des dispositifs analogiques augmentaient en proportion de leur taille et de leur complexité et donc que ce dernier facteur, lorsque l'on s'efforçait de développer des machines de ce type qui soient à la fois performantes et génériques, tendait très rapidement à devenir prohibitif en plusieurs manières. Pour commencer, et puisque les éléments moteurs des analyseurs différentiels étaient des dispositifs électriques, la chaleur qu'ils génèrent forcément lorsqu'ils se trouvaient mis en fonction posait toujours d'énormes problèmes de dissipation thermique. Ceci, à la limite, ne nuisait pas réellement à l'opération de la machine (bien qu'à la longue ses pièces métalliques aient été susceptibles de subir une certaine déformation à cause de la chaleur ambiante par trop élevée), mais les conditions habituelles dans lesquelles devaient néanmoins travailler ses opérateurs, on l'imagine, étaient très loin d'être confortables. Ensuite, il est évident que plus la machine était puissante, c'est-à-dire générique, précise et rapide, plus elle comportait un nombre important de parties mobiles placées ici ou là en contact direct les unes avec les autres, ce qui avait pour résultat inévitable d'accroître considérablement le risque de voir survenir à un moment donné ou un autre une défaillance mécanique. Ceci bien sûr dans le pire des cas envisageables. Cependant plus une pièce mécanique se trouvait sollicitée, plus elle tendait à se détériorer physiquement, ce qui, avec le temps, entraînait au mieux une dégradation des performances de l'ensemble auquel

elle était intégrée ou, pour aller directement au pire, un bris pur et simple de cet élément et des pièces auxquelles il était couplé et par conséquent l'immobilisation forcée du système. Sur un plan plus fondamental maintenant, il faut bien voir que ces nombreux composants, de par leur nature mécanique, possédaient certains seuils de tolérance physique indépassables sous peine de détérioration prématurée ou de rupture. Au delà d'une certaine vitesse, ou, si l'on préfère, d'un certain nombre de tours par minute, ils tendaient donc irrésistiblement à s'user plus vite que la normale ce qui, encore une fois, conduisait ou bien à une diminution de la précision de la réponse de la machine ou bien alors à une casse mécanique. Or, et puisque sur les machines analogiques les quantités liées à un problème étaient représentées matériellement par la position angulaire d'un arbre, la rotation d'un roue ou la longueur d'une pièce, c'est bien le niveau d'intégrité physique de ces composants, tout de même que celui des modules mécaniques servant à réaliser les opérations mathématiques, qui déterminait la précision qu'elles étaient susceptibles d'atteindre. Comprenons par là même que cette précision – bien entendu absolument cruciale dans les domaines de la mathématique et de la physique - était fonction de la vitesse d'opération du dispositif et de la tolérance mécanique, de la masse et de l'inertie de ses constituants. Dans tous les cas alors, et en plus de se trouver obligés de disposer en permanence d'un dispositif de maintenance lourd et coûteux, les utilisateurs de ces machines se trouvaient de fait confrontés à un dilemme lourd de conséquences : soit opter pour une « fréquence » de fonctionnement normale et garantir par là même l'obtention de résultats précis dans les limites matérielles permises par la structure de la machine, soit alors forcer son rythme d'opération et prendre évidemment le risque de voir les réponses totalement faussées. Comme aujourd'hui avec les ordinateurs, les avantages réels qu'il y avait autrefois pour un centre de recherche civil ou militaire à posséder un calculateur analogique résidaient dans le fait même que celui-ci autorisait ses utilisateurs scientifiques à effectuer des calculs extrêmement complexes avec une précision et une rapidité inatteignables par d'autres moyens plus ordinaires. Maintenant, si l'on est systématiquement obligé de choisir entre rapidité et précision, ce gain n'est plus aussi net que ce qu'il aurait pu être dans d'autres conditions. En temps de paix, il semble toujours envisageable de pouvoir s'accommoder de pareilles contraintes. Dans un pareil contexte en effet, privilégier la précision au détriment de la vitesse de calcul (ou l'inverse), risquait au pire de se traduire par un retard dans la réalisation d'un programme de recherche, délai éventuellement assorti d'une perte financière plus ou moins importante. Ici, les suites d'un choix erroné pouvaient certes se révéler sérieuses mais rarement dramatiques. En temps de guerre en revanche, c'est-à-dire lorsqu'au moyen de ces instruments on calculait des tables de tir balistique pour l'artillerie, que l'on mettait au point

des fusées volantes ou que l'on cherchait à calculer la trajectoire de ces mêmes projectiles afin de les détruire en vol et/ou de repérer leur point d'envol⁴⁹⁹, les choses prenaient évidemment une toute autre tournure puisque les limitations des machines pouvaient alors entraîner des conséquences véritablement désastreuses sur les théâtres d'opération. Sachant qu'en 1941-42, les tables de tir balistique devant être calculées par les Alliés s'amoncelaient de manière plus que préoccupante dans les centres de calcul américains et que ceux-ci accusaient déjà en cette matière un retard cumulé plus qu'acceptable, le temps de calcul était devenu un paramètre de tout premier ordre. On ne s'étonnera donc pas d'apprendre que ce sont en réalité les insuffisances structurelles désormais intolérables des calculateurs analogiques et la nécessité conjuguée de disposer au plus vite d'instruments de calcul qui soient à la fois *rapides et précis* qui, le 9 avril 1943, conduisirent finalement le Colonel Leslie E. Simon et le physicien Oswald Veblen⁵⁰⁰ à entériner et à financer le formidable projet de calculateur digital électronique que leur avaient soumis P. J. Eckert, J. W. Mauchly et H. H. Goldstine : l'*Electronic Numerical Integrator and Computer*. Le pari que consentirent alors à faire conjointement ces hauts responsables de l'U.S. Army Ordnance Department et du Ballistic Research Laboratory - lorsque l'on songe un instant au contexte historique et aux colossaux investissements en terme de moyens financiers et humains que tout cela pouvait représenter - était incroyablement audacieux. Une audace qui, en même temps, ne pouvait que trahir l'accablement qui était celui des forces alliées en général et des militaires américains en particulier. En plein conflit, il fallait pour ainsi dire repartir à zéro et construire de toutes

⁴⁹⁹ En 1941, les nazis construisirent un analyseur différentiel (c'était apparemment une machine assez semblable au R.D.A.), qu'ils devaient utiliser pour mettre au point les fusées V2 (le mécanisme de guidage de ces bombes volantes reposait sur des intégrateurs mécaniques). Concernant encore ces projectiles de sinistre réputation, M. R. Williams (*in* [Williams, 1997], p. 206), rapporte une anecdote historique fort intéressante: dans les toutes dernières années du conflit, le directeur du *Massachusetts Institute of Technology* reçut une demande officielle émanant du haut commandement britannique. Il s'agissait, sans plus de précisions, de calculer de toute urgence un ensemble de tables de tir balistique. Les scientifiques qui effectuèrent ces calculs, comme du reste le directeur du centre de recherche, n'avaient à l'époque aucune idée sur ce que représentaient les équations différentielles sur lesquelles ils devaient travailler. Quelques semaines après que les résultats des calculs aient été rendus aux militaires anglais, les américains furent informés que ces derniers étaient inexacts (il semble que les opérateurs de l'analyseur différentiel du M.I.T. aient oublié de prendre en compte la courbure de la terre dans le calcul d'une trajectoire qui était inhabituellement longue). Les tables furent recalculées en intégrant ce nouveau paramètre et les gens du M.I.T., à partir de là, n'entendirent plus jamais parler de ces dernières. Bien que le secret militaire n'ait pas encore été levé sur ce point, ces tables, en fait, correspondaient très vraisemblablement aux trajectoires des fusées V2, ce qui implique au moins deux choses : soit les britanniques disposaient de systèmes R.A.D.A.R. d'une plus longue portée que ce qu'ils étaient généralement enclins à admettre, soit alors ils cherchaient à trouver un moyen pour remonter la trajectoire des V2 en vue de localiser puis de neutraliser leurs plateformes de lancement...

⁵⁰⁰ H. H. Goldstine raconte qu'à l'issue de cette réunion historique au cours de laquelle il présenta un exposé détaillé du projet E.N.I.A.C., Oswald Veblen, qui n'avait jusque là cessé de se balancer sur les pieds arrières de se chaise, retrouva « brutalement » le sol puis, après s'être levé (et sans plus de formalités), prononça simplement la phrase suivante : « *Simon, give Goldstine the money* ». Le sort, à partir de là, en était définitivement jeté.

pièces - parmi lesquelles les tubes électroniques qui n'avaient quasiment jamais été testés en tant que relais - une machine à calculer électronique numérique ne possédant strictement aucun équivalent dans le monde (bien que finalement l'E.N.I.A.C. se révélât très proche de l'A.S.C.C. ou du S.S.E.C. sur le plan architectural). Le calculateur digital électronique de la *Moore School of Electrical Engineering*, comme on le sait, connut une carrière extrêmement brève et n'eut pas de descendance directe. Mais le travail extraordinaire de l'équipe de la *Moore School*, que John Von Neumann avait rejoint à l'été 1944, permit de renouveler et de développer l'approche numérique du calcul automatique d'une manière inouïe, engendrant par là une machine d'un genre absolument nouveau dont nous n'aurons pas l'irrespect de rappeler ici l'impact à la fois prodigieux et durable qu'elle devait bientôt avoir sur le monde entier.

La construction de l'E.N.I.A.C. puis l'invention et l'irrésistible montée en puissance des ordinateurs de type E.D.V.A.C. devaient mettre un terme irrévocable au développement des calculateurs analogiques comme du reste à celui des grands calculateurs électromécaniques et électroniques digitaux (bien que certaines machines mixtes, à la fois digitales et analogiques, aient été encore construites jusque dans les années soixante). La disparition graduelle des analyseurs différentiels et des autres dispositifs du même genre qui s'est amorcée à partir de 1945-46 ne doit cependant pas nous amener à négliger ni non plus à sous-estimer l'importance réelle du rôle que ces instruments jouèrent dans l'histoire du calcul artificiel et, indirectement, dans celle de l'informatique. Car après tout le principe des machines digitales est nettement plus ancien que celui des dispositifs analogiques et, de ce fait, on bien est en droit de se demander pourquoi, dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle, les instruments construits par J. C. Maxwell et les frères Thomson, puis ceux conçus ensuite par V. Bush et D. R. Hartree, supplantèrent très largement les machines digitales dans le domaine du calcul scientifique avant de se voir « jetés aux oubliettes » à la fin de la deuxième guerre mondiale du fait de la mise au point des nouveaux calculateurs numériques électroniques. Une première réponse à cette question tient en quelques mots à peine: vitesse d'opération. En effet, et à niveau de précision moindre ou égal, tant que les instruments de calcul digitaux reposèrent pour leur fabrication sur les technologies mécanique ou électromécanique, ils ne purent prétendre à rivaliser sérieusement avec les calculateurs analogiques. Par exemple la version suédoise du *Difference Engine* de Charles Babbage (le *Scheutz Engine*), était à peine plus rapide qu'un calculateur humain tandis que la vitesse moyenne de fonctionnement des premiers analyseurs différentiels mécaniques était au minimum cinquante fois plus élevée que cela. La période de la seconde guerre mondiale, et avec celle-ci l'apparition aux Etats-Unis des grands monstres digitaux électromécaniques tels l'A.S.C.C., le S.S.E.C. ou le *Bell Labs*

Model I, vit un rééquilibrage sensible des performances des deux types de calculateurs. La computation d'une seule table de tir balistique - lesquelles comprenaient généralement entre 2000 et 4000 trajectoires différentes - nécessitait ainsi à peu près 750 heures de calcul sur un analyseur différentiel électromécanique (il fallait en fait compter entre 10 et 20 minutes pour déterminer une trajectoire avec un tel appareil). A titre de comparaison, le calcul d'une trajectoire individuelle identique prenait en moyenne 2 heures avec l'A.S.C.C., 40 minutes avec le *Bell Labs Model I* et un quart d'heure avec le Harvard Mark II (un calculateur électromécanique dont Howard Aiken commença le développement en 1945 et qui fut opérationnel en juillet 1947). En dépit des progrès indéniables qu'avait permis de réaliser avant le conflit l'introduction des relais électromécaniques dans le domaine de la construction des instruments de calcul digitaux, les machines analogiques, malgré les nombreux défauts dont elles pouvaient effectivement souffrir, tenaient encore le haut du pavé en 1940-44. Ainsi leur vitesse de fonctionnement était, sinon plus élevée, tout au moins équivalente à celle des grands monstres électromécaniques de la même période. Une chose, cependant, demeurait évidente pour la plupart des utilisateurs scientifiques de machines à calculer tout comme pour leurs concepteurs (nous aborderons ce point plus longuement dans la section suivante). N'eut été la question – bien évidemment cruciale – de l'insuffisance avérée de leur vitesse de fonctionnement, les instruments de calcul digitaux, lorsqu'employés pour réaliser des travaux de type scientifique, n'auraient souffert d'aucune des limitations théoriques et pratiques qui « accablaient » systématiquement leurs équivalents analogiques. En fait, et bien avant que Stibitz et Aiken, pour ne citer qu'eux, ne démarrent respectivement leurs travaux aux *Bell Telephone Laboratories* et à l'université d'Harvard, John Leslie Comrie⁵⁰¹, un mathématicien et astronome d'origine néo-zélandaise qui de 1930 à 1936 occupa le poste de superintendant au *Nautical Almanac Office of the Royal Naval College*, avait été le pionnier véritable du calcul digital scientifique. En 1928, il avait ainsi utilisé des tabulateurs électromécaniques Hollerith modifiés – il employa également à cette fin des machines numériques de marque Brunsviga et National - pour calculer des tables astronomiques en se basant sur les *Tables of the Moon* de l'astronome américain Ernest Williams Brown. Ce travail constitue à n'en point douter une étape assurément décisive dans l'histoire du calcul automatique. Pour la première

⁵⁰¹ Jérôme Ramunni rappelle qu'au mois de mai 1946, c'est ce même L. J. Comrie qui, revenant d'un voyage aux Etats-Unis, montra à Maurice Wilkes, alors directeur de l'*University Mathematical Laboratory* de Cambridge et futur concepteur de l'E.D.S.A.C., son exemplaire du *First Draft of a Report on the EDVAC* (lequel lui avait été remis en personne par John Von Neumann). Grâce à sa position professionnelle, mais aussi très vraisemblablement aux contacts soutenus qu'il entretenait avec Leslie J. Comrie et Douglas R. Hartree, Maurice Wilkes fut invité à participer aux conférences données cet été là à la *Moore School of Electrical Engineering*; in [Ramunni, 1989], p. 99 et [Williams, 1997], p. 329.

fois en effet, des instruments de calcul digitaux - qui au départ avaient été spécifiquement développés pour réaliser des tâches liées aux domaines du *business* et de la statistique - avaient été employés à large échelle et avec succès dans le but de réaliser des travaux de nature scientifique. La même année, c'est-à-dire en 1928, E. W. Brown visitait l'Angleterre. A cette occasion, c'est donc le plus naturellement du monde qu'il se trouva convié par L. J. Comrie au *Nautical Almanac Office* afin d'examiner l'état d'avancement des travaux qui étaient conduits au sein de cette vénérable institution. Enthousiasmé par ce qu'il vit alors en ce lieu, Brown s'empressa de faire part de sa récente expérience à son confère et ami le mathématicien et astronome Wallace J. Eckert⁵⁰² lorsqu'il revint enfin aux Etats-Unis. Celui-ci, à son tour, se montra vivement intéressé par l'idée qu'avait eu Comrie au point qu'en 1930, il parvint à persuader Thomas J. Watson Sr. du fait que les « machines à statistiques » produites par I.B.M., pourvu qu'elles soient convenablement transformées, pourraient sans peine aucune être adoptées par des utilisateurs issus du monde scientifique. Le marché colossal que ce nouveau secteur représentait potentiellement – ajouté au fait que les machines existaient déjà et que leur conversion n'impliquait pas que l'on consente encore de lourds investissements - ne pouvait longtemps laisser indifférent un capitaine d'industrie de la trempe de T. J. Watson. Celui-ci, tout autant séduit par cette idée qu'il était convaincu de l'extraordinaire opportunité économique qu'il y avait là à saisir, accéda donc assez rapidement à la requête formulée par W. J. Eckert au point qu'en 1933, le *Columbia University Statistical Bureau*, un grand laboratoire universitaire d'études statistiques établi en 1929 sous les auspices bienveillants d'I.B.M., fut débaptisé et renommé *Thomas J. Watson Astronomical Computing Bureau* non sans avoir été auparavant réorganisé et équipé des nouvelles machines à calculer scientifiques. Avec L. J. Comrie qui oeuvrait en Angleterre et W. J. Eckert de l'autre côté de l'Atlantique – sans compter bien entendu le soutien technique et financier que leur assurait la puissante firme de T. J. Watson - les instruments de calcul scientifiques digitaux connurent une diffusion et un développement relativement rapides. En 1932, l'astronome néo-zélandais présenta ainsi aux ingénieurs d'I.B.M. une demande de modification technique visant à faire en sorte que les contenus des registres mécaniques des machines puissent être transférés de l'un à l'autre sans qu'ils aient à ne subir entre-temps aucune espèce d'opération arithmétique (cette transformation fut finalement standardisée une dizaine d'années après). De la sorte, il était possible de configurer ces calculateurs via un tableau de branchement et un ensemble de câbles de manière à les faire fonctionner

⁵⁰² Précisons ici que Wallace J. Eckert n'entretenait aucune espèce de lien de parenté avec Presper J. Eckert

exactement comme la première machine de Babbage. Un siècle après qu'il ait été conçu et 77 ans après la construction de sa version suédoise, le *Difference Engine* venait donc de renaître sous une autre forme (électromécanique celle-là). Ces calculateurs numériques de dimensions somme toute assez modestes étaient très puissants puisqu'ils permettaient de calculer environ un millier de tables en à peine une heure. Pourtant, il subsistait encore trois problèmes importants. D'une part, certaines tables mathématiques ne pouvaient être aisément produites en utilisant la méthode classique des différences, limitation essentielle qui eu donc pour conséquence notable de freiner sensiblement la pénétration de ces machines dans les laboratoires de recherche. D'autre part, et avec le développement croissant des réseaux du gaz et de l'électricité, la communauté des utilisateurs commerciaux - de loin la plus importante - avait besoin d'un calculateur qui lui permettrait, à partir des relevés effectués sur les compteurs des abonnés, de multiplier ces valeurs par un certain taux afin d'établir la facturation des services fournis. Or les machines à calculer I.B.M. existantes étaient incapables de réaliser directement - c'est-à-dire rapidement - cette opération. Enfin, et ceci intéressait tout autant les utilisateurs scientifiques que les utilisateurs commerciaux, les machines étaient encore jugées beaucoup trop lentes par rapport aux besoins réels de ces deux groupes de consommateurs. Afin de répondre aux attentes de ses clients, la firme I.B.M. introduisit en 1935 l'I.B.M. 601 *Multiplying Card Punch*, une machine numérique basée sur la technologie des relais qui était capable de multiplier deux nombres en à peu près une seconde. Du fait de sa disponibilité immédiate et de sa compatibilité avec la plupart des autres équipements produits alors par I.B.M., ce nouveau calculateur connut un très vif succès puisqu'au total quelques 1500 unités furent délivrées. L'I.B.M. 601 (et ses versions dérivées, les modèles 602 et 602A), devait ainsi constituer la machine de référence - pour ne pas dire le fer de lance de l'approche numérique - dans les milieux scientifiques et commerciaux jusqu'à l'avènement de l'ordinateur. Mais en dépit de l'effort de recherche et de développement consenti ici par I.B.M., les performances des calculateurs numériques se situaient toujours en deçà de celles des machines analogiques lesquelles demeuraient, et de loin, les plus rapides mais aussi les plus coûteuses et les plus rares. En outre, et puisqu'il s'agissait en réalité de dispositifs de série destinés à couvrir les besoins disparates d'une assez vaste communauté d'utilisateurs, ces derniers n'étaient pas forcément bien adaptés pour répondre à ceux, parfois fort spécifiques, des scientifiques. Jérôme Ramunni le rappelle, « *le marché des affaires [demandait] des opérations simples sur un nombre élevé de données*⁵⁰³ »

⁵⁰³ In [Ramunni, 1989], p. 33.

alors que dans le domaine des sciences, c'était fréquemment la situation inverse qui se présentait : il était nécessaire d'effectuer des opérations complexes sur un nombre de données peu important. Dans un certain nombre d'institutions, ce fut le cas nous l'avons vu au M.I.T. tout comme à la *Moore School*, décision fut donc prise à partir de 1930 de construire des analyseurs différentiels, lesquels, en plus d'être extrêmement rapides, étaient parfaitement adaptés aux types de calculs qui devaient leur être soumis du fait même de leur nature *ad hoc*. Longtemps, et en dépit de leurs limitations intrinsèques et des lourdes contraintes logistiques qu'ils pouvaient impliquer par ailleurs, les calculateurs analogiques s'imposèrent ainsi comme le choix le plus évident pour la réalisation des travaux mathématiques les plus complexes et les plus exigeants (et peut-être aussi les plus « sensibles »). Les années 1938-39 marquèrent pourtant les débuts de la construction des grands calculateurs digitaux (on citera le Z1 en Allemagne et les *Complex Number Calculator* et Harvard Mark I aux U.S.A.). Ces différentes machines étaient incomparablement plus rapides que celles qui les avaient précédées et avec leur mise en service effective (qui eut généralement lieu entre 1940 et 1943), le différentiel de performances qui jusque-là avait séparé les calculateurs digitaux des dispositifs analogiques se réduisit de manière tout à fait considérable. Cependant, la guerre venue, la nécessité de disposer de machines à calculer encore plus efficaces – tant en termes de rapidité que de précision - se fit plus pressante que jamais. Or, nous avons déjà fait mention de ceci plus haut⁵⁰⁴, en 1941 Claude Shannon avait publié dans le vingtième numéro du *Journal of Mathematics and Physics* un article intitulé «*Mathematical Theory of the Differential Analyser*» dans lequel il s'était livré à une minutieuse analyse des limites mathématiques et physiques des analyseurs différentiels. Dans ce travail déterminant, C. Shannon avait formellement démontré qu'au delà d'un certain seuil il n'était plus possible d'accroître la vitesse de fonctionnement de ces instruments sous peine de les rendre complètement inutilisables. Quant à leur précision de travail, et pour des motifs d'ordre essentiellement technique, elle non plus ne pouvait se voir augmentée : ainsi selon H. H. Goldstine, «*passer d'une précision de 4 chiffres à une précision de 8 chiffres sur un analyseur différentiel était chose totalement impossible*⁵⁰⁵ ». Les limites matérielles des calculateurs analogiques ayant été atteintes en 1942-43, ne restait désormais plus que la voie du calcul digital pour offrir aux

⁵⁰⁴ Voir pp. 55-56.

⁵⁰⁵ In [Goldstine, 1972], p. 143. L'opération consistant à doubler la précision de travail d'un analyseur différentiel aurait tout d'abord impliqué que l'on adjoigne encore à cette machine un nombre non négligeable de pièces supplémentaires. Or les calculateurs analogiques étaient déjà des machines gigantesques et une pareille modification aurait nécessairement eu pour conséquence d'étendre leurs dimensions bien au-delà des limites du raisonnable. Ensuite les tâches de configuration et de maintenance, qui étaient déjà fort lourdes, s'en seraient trouvées considérablement compliquées. Enfin l'ajout de nombreux éléments mobiles à l'ensemble aurait encore accru le risque de voir apparaître des dysfonctionnements mécaniques (usure, *slipping*, *clipping*).

forces armées américaines, mais aussi britanniques, les machines dont elles avaient si impérieusement besoin. Le seul défaut dont souffraient les calculateurs digitaux électromécaniques, on le savait, était constituée par leur vitesse de fonctionnement encore insuffisante. Demeurait alors à définir ou à identifier (et donc à adapter), une réponse technologique idoine qui permettrait de remédier de façon probante à ce problème jusque-là sensible mais qui, au gré des événements historiques malheureux, s'était à présent transformé en un véritable enjeu stratégique : l'électronique constituerait cette solution et l'*Electronic Numerical Integrator and Computer*, avec toute la réussite que l'on sait, son formidable démonstrateur.

2.2.5.2. Spécificités des machines digitales.

Quelles différences fondamentales existe-t-il donc entre l'approche analogique et l'approche digitale qui permettent de rendre compte du tournant principal et technologique absolument décisif qui se produit dans le domaine du calcul automatique à partir des années 1942-43 ? Jusqu'à cette période, leur remarquable vitesse de fonctionnement avait effectivement assuré aux calculateurs analogiques une suprématie quasi absolue dans la sphère scientifique⁵⁰⁶. Mais durant les premières années de la deuxième guerre mondiale l'apparition des grands calculateurs digitaux à relais, lesquels étaient au moins aussi rapides que les analyseurs différentiels, allait porter un coup rude à cette situation de fait. En bouleversant l'équilibre géostratégique mondial et les appareils de production des principales nations belligérantes, en faisant surgir de nouveaux enjeux et de nouvelles synergies participant tout autant de l'ordre militaire que des sphères technique, scientifique et industrielle, en révélant aussi *in actio* les limites ultimes des instruments analogiques, la guerre moderne et la façon rationaliste, opérationnelle, dont on s'efforçait de la penser désormais tant en Angleterre qu'aux Etats-Unis allaient radicalement métamorphoser l'univers des machines à calculer. Les nouveaux calculateurs numériques, en retour, allaient se présenter comme les objets techniques idéalement adaptés pour conduire cette entreprise de systématisation logico-mathématique appliquée tout d'abord aux stratégies guerrières, puis, plus tard, au monde de l'industrie et du management. Cependant, et peut-être que le sens que nous avons donné jusqu'à présent à notre analyse l'a quelque peu laissé entendre à tort, la vitesse d'opération des machines ne permet pas de tout expliquer ici. Il s'agit certes là d'un

⁵⁰⁶ Dans le monde des affaires, c'était au contraire les calculateurs digitaux qui régnaient en maîtres.

facteur de toute première importance mais à lui seul, il ne saurait réellement autoriser une saisie complète et satisfaisante du stupéfiant renversement de situation dont nous venons de parler. En conséquence nous nous proposons à présent d'examiner en détail ce qui fait la spécificité, pour ne pas dire l'essence, des machines à calculer digitales. John Von Neumann définit ainsi ce qu'il nomme « procédure digitale » : « *Dans une machine digitale décimale, chaque nombre est représenté de la même façon que dans l'écriture ou l'imprimerie conventionnelles, c'est-à-dire comme une suite de chiffres décimaux*⁵⁰⁷ ».

D'emblée, on comprend donc que l'on a affaire ici à une représentation des quantités à traiter qui n'est plus continuïste – comme c'était effectivement le cas avec les calculateurs analogiques – mais discrète et sérielle. En d'autres termes, ce qui se trouve représenté et calculé en machine ne l'est plus sous forme de longueurs d'axes ou de positions angulaires de roues, c'est-à-dire sous forme de quantités physiques mesurées, mais grâce à des dispositifs individuels dont le comportement dynamique restreint à n états exclusifs possibles correspond très exactement aux *nombres* qu'ils servent à exprimer symboliquement. D'où, alors, l'appellation de procédure *numérique* pour qualifier un *modus operandi* qui repose fondamentalement sur la manipulation combinatoire de quantités discrètes et entières représentées par l'entremise d'entités symboliques distinctes. Peut-être s'étonnera-t-on du fait que Von Neumann, lorsqu'il cherche à définir l'approche numérique, la compare directement à l'écriture et à l'imprimerie. Cette disposition discursive, en plus de marquer explicitement le caractère discontinu ou interrompu de cette modalité computationnelle particulière, contribue en fait à souligner son caractère extrêmement « naturel ». Pourquoi, justement, « naturel » ? Pour comprendre ceci, entendons donc précisément le sens tout de même que l'étymologie des termes « numérique » et « digital ». Le vocable « numérique », ou *numerical* en anglais, procède du latin *nūmērō* qui signifie compter, nombrer (le pluriel *numeri* désigne les mathématiques, la science des nombres). Etant donné qu'au niveau matériel le plus fondamental les calculateurs numériques et les ordinateurs opèrent exclusivement sur des objets représentant des nombres, il n'est là rien qui soit susceptible de se trouver qualifié de véritablement surprenant. Il s'avère en réalité que l'examen de l'adjectif « digital », ou plutôt celui de son origine étymologique, est nettement plus pertinent pour la suite de notre propos. Pour des raisons d'ordre technique - il est très fréquemment employé dans les domaines de l'informatique et des télécommunications où la langue anglaise, on ne le sait que trop, règne quasiment sans partage - ce terme de provenance anglo-saxonne s'est vu progressivement

⁵⁰⁷ [Von Neumann, 1958]; in trad. Fr., 1996, p.18.

introduit en français où sa signification informaticienne équivaut strictement⁵⁰⁸ à celle du terme « numérique ». Cet anglicisme, puisque c'est bien de cela dont il s'agit, provient du mot latin *dīgītus*, lequel désigne le doigt - *digit* en anglais - de la main (une acception que l'on retrouve par ailleurs exprimée dans le terme français « digital » lorsque ce dernier se trouve employé dans une expression telle que « empreinte digitale »). Or les doigts des mains, et parfois même des pieds⁵⁰⁹, constituent bien sûr cet ancestral instrument de comptage organique, naturel, qui, bien avant que ne soient introduits des dispositifs numériques d'aide au calcul aussi anciens que peuvent l'être effectivement la corde à noeuds (quipus) et l'abaque, ont permis à l'homme de dénombrer, de calculer, d'inventorier et de commercer avec ses semblables en permettant de surmonter systématiquement les éventuelles barrières linguistiques. Nul ne sait ni où, ni quand, exactement, un procédé unifié de comptage digital s'est formé en tant que tel. Ce que l'on sait en revanche avec certitude, c'est qu'un tel système a commencé de se répandre fort tôt dans le nord de l'Afrique, l'Europe de l'est, l'Europe occidentale, l'Inde et le l'Orient et qu'à partir du cinquième siècle avant Jésus-Christ, ainsi qu'en témoignent les écrits d'Hérodote, puis, plus tardivement, ceux de Cicéron⁵¹⁰ et de Quintillius, il était d'un usage extrêmement commun tant chez les grecs que chez les romains. Les premiers traités présentant une description complète de cette méthode de calcul sont cependant beaucoup plus récents. Au huitième siècle après Jésus-Christ, on trouve par exemple les écrits de Nicolaus Rhabda de Smyrne et ceux du moine anglais Bede. En 725, ce dernier a ainsi consacré le premier chapitre de son *De Temporum Ratione* – un traité sur le calendrier et les procédés permettant de calculer les dates des jours de fête les plus importants de la chrétienté – à une étude des méthodes de calcul « avec les doigts » les plus répandues à son époque. Dans ce chapitre introductif qui en réalité possédait tout d'une propédeutique – il s'agissait de faire en sorte que le lecteur possède parfaitement ces techniques de notation et de comptage digitaux avant de considérer plus spécifiquement leurs possibles applications aux questions liées à l'établissement du calendrier – le Vénérable Bede décrivait comment, au moyen de la main gauche, il était en fait possible de représenter les nombres de 1 à 99. Les doigts de la main droite étaient quant à eux exclusivement réservés à la représentation des nombres allant de 100 à 9900. En 1494, Pacioli de Venise a produit une étude illustrée de ce système. Dans sa *Suma de Arithmetica Geometrica* figurent ainsi des tables illustratives qui

⁵⁰⁸ Précisons tout de même que dans le cadre de l'usage courant, il est très vivement conseillé de lui préférer le terme « numérique ».

⁵⁰⁹ Les Inuits (Esquimaux du Groenland, du nord et de l'est du Canada), emploient par exemple l'expression « un homme » pour représenter le nombre 20, « deux hommes » pour le nombre 40, etc.

⁵¹⁰ Dans les *Lettres à Atticus* par exemple, Cicéron écrit « *si tuos digitos novi* », proposition que l'on traduira par « je connais ton habileté à calculer sur les doigts ».

démontrent, schémas à l'appui, comment il est possible de compter de 1 à 9999 en combinant simplement les positions (pliures, rigidité), que sont susceptibles de prendre simultanément les dix doigts des deux mains. Ailleurs, d'autres méthodes de comptage fort similaires à celles que nous venons d'évoquer furent également conçues. Dans une petite brochure datant de 1757, le moine mexicain Buenaventura Francisco de Ossorio a par exemple décrit de façon détaillée le système de calcul manuel qu'il employait afin de calculer les dates mobiles du calendrier chrétien. Plus intéressante peut-être, car nettement plus raffinée, était la méthode de comptage et de calcul employée alors en Chine et dans les régions situées au sud de l'Inde méridionale. Dans ce cas précis, et à l'exception du pouce, les unités individuelles de calcul – les objets physiques servant à la représentation des nombres - étaient constituées par les faces interne, médiane et externe de chacune des trois phalanges des doigts de la main gauche. Avec seulement un doigt (symbolisant par sa localisation topographique unique dans la main les unités, les dizaines, les centaines ou les milliers), il était donc déjà possible de représenter les chiffres de 1 à 9. En combinant ces multiples positions de différentes manières puis en utilisant ensuite les ongles de la main droite pour toucher ou non les emplacements « activés » de la main gauche, on pouvait ensuite symboliser n'importe quel nombre allant de 1 à 10000 (l'absence de contact d'un des ongles de la main droite avec les zones numériques de la main gauche servait alors à marquer la position d'un zéro). Dans tous les cas de figure dont nous avons fait précédemment mention, et pour significatives qu'aient pu être quelquefois les différences de complexité qui pouvaient effectivement les distinguer les uns des autres, il convient de remarquer que ces systèmes de comptage et/ou de calcul reposaient sur un principe fondamental universellement partagé. Les doigts, leurs constituants (phalanges) et quelquefois les « éléments » de ces constituants (les différentes surfaces des phalanges), servaient par leur situation unique, leur figure individuelle et leur arrangement combinatoire à représenter exactement, de manière positionnelle et symbolique, les nombres entiers impliqués dans telle ou telle procédure de comptage ou de computation (qu'elle ait été de nature purement arithmétique ou, plus prosaïquement, commerciale). Les premiers dispositifs de calcul artificiels – mais cette situation particulière se prolongera en vérité jusqu'à la seconde moitié du 19^{ème} siècle - seront donc des machines digitales fort simples. Dans leur structure matérielle singulière et surtout l'identité de leur mode opératoire à la fois positionnel, symbolique et unitaire, toutes traduiront directement leur héritage naturel, leur provenance *manuelle*, donc leur essence *digitale*: les nœuds et les jetons, qui constituent autant d'entités discrètes représentatives des nombres entiers devant être manipulés dans

l'acte de computation seront ainsi au quipus et à l'abaque ce que les doigts, les phalanges et les ongles avaient été antérieurement à la main humaine pensée comme instrument de calcul.

S'il demeure relativement aisé de mettre en lumière le lien absolument essentiel qui existe effectivement entre la main et les premiers artefacts de calcul utilisés par l'homme – la proximité, voire la quasi simultanée chronologique de leur mise au point et de leur emploi aident grandement en cela - les choses se présentent sous un tout autre jour dès lors qu'il est question des machines à calculer modernes et contemporaines. Que l'on songe alors au *Difference Engine*, à l'E.N.I.A.C. ou aux ordinateurs, le rapport conceptuel fondamental qu'entretiennent ces différents dispositifs avec des méthodes de calcul manuelles dont certaines sont vieilles d'au moins deux millénaires ne se donne pas à nous de façon aussi distincte que précédemment. A y regarder de plus près cependant, il semble en fait que ce sont la complexité matérielle de ces instruments, mais aussi leurs dimensions et leurs performances réellement singulières – toutes sortes de propriétés assurément remarquables mais qui demeurent néanmoins contingentes au regard de notre présent propos - qui constituent ici l'obstacle principal à notre entreprise de compréhension. Car tous ces calculateurs, quels qu'aient pu être par ailleurs leur degré de sophistication et les matériaux utilisés pour les fabriquer, étaient des instruments de calcul numériques au même titre que la main, les cordes à nœuds ou encore l'abaque. L'essence de l'approche numérique ne réside donc aucunement dans les technologies pouvant être diversement employées pour l'implémenter et l'accélérer (de même qu'en principe l'électronique n'est pas seule technologie permettant de fabriquer cette machine à calculer digitale à l'architecture si particulière qu'est l'ordinateur). Ce qui importe ici en tout premier lieu c'est ce qui se trouve représenté, c'est-à-dire des nombres entiers (et non plus des valeurs exprimées sous la forme de quantités physiques continues). Dans le cadre du calcul numérique les nombres sont ainsi figurés en usant de symboles individualisés, séparés (*e.g.* des nombres entiers inscrits sur un support tel que la tranche d'un disque métallique), ou de signaux à valeurs discrètes (des courants électriques de type « tout ou rien »). Que l'on ait alors affaire à des doigts, à des roues mécaniques pouvant adopter n positions différentes ou encore à des composants élémentaires bi-positionnels électromécaniques ou électroniques est, toutes considérations de vitesse d'opération mises à part, parfaitement secondaire. Au gré des opérations successivement réalisées selon les étapes individuelles spécifiées par la structure rigoureusement ordonnée d'un schème abstrait – un algorithme - le calcul s'effectue toujours en passant de quantité entière en quantité entière, d'unité symbolique distincte en unité symbolique distincte. En d'autres termes, dans un calculateur numérique il n'existe aucune position intermédiaire des éléments actifs de la

machine qui puisse être qualifiée de significative du point de vue du calcul effectué. Le niveau de précision dont est alors capable une machine à calculer numérique - qui est toujours fini à moins bien entendu qu'il ne s'agisse d'un automate intellectuel ou qu'idéalement on choisisse de la considérer dans une perspective purement théorique - est donc nécessairement déterminé et limité par la capacité représentationnelle autorisée par le nombre des composants dédiés à cette fonction. Sauf disposition spéciale ou modification ultérieure, une machine digitale ayant été initialement conçue pour travailler sur un intervalle numérique spécifique, disons par exemple $[-10000 ; \dots ; 10000]$, ne pourra donc en aucun cas opérer sur des nombres inférieurs ou supérieurs à ces valeurs limites.

Dans le but de saisir maintenant tout ce qui vient d'être dit de manière plus formelle, il nous faut revenir un instant à la science des nombres et à la façon dont les problèmes qui ressortissent à ce domaine – et comme on le sait ils sont fort nombreux et variés- se trouvent à l'origine formulés dans le langage des mathématiques. Après tout - mais est-il seulement nécessaire de le préciser ? - il n'existe pas deux sortes de mathématiques dont l'une serait tout particulièrement adaptée au traitement par les machines analogiques au point de pouvoir en fonder l'économie générale tandis que l'autre, différente de la première pour quelque raison essentielle, se prêterait plus naturellement à l'approche numérique. La formulation d'expressions mathématiques correspondant à un problème donné (issu du champ de la physique ou de l'ingénierie par exemple), implique très fréquemment que l'on fasse usage d'un certain nombre d'opérations différentes tout de même que de définitions implicites. Parmi celles-ci, et au tout premier chef, on trouve bien évidemment les opérations élémentaires de l'arithmétique, c'est-à-dire l'addition, la soustraction, la division et la multiplication. A côté de cela, il existe également d'autres opérations ou fonctions primitives dont la nature se révèle être beaucoup plus complexe que les premières : la racine carrée, l'exponentielle, le logarithme, les opérations de différentiation et d'intégration constituent autant d'exemples participant de ce type. Quelques-unes de ces fonctions, telles l'exponentielle et le logarithme, sont dites « transcendantes » (on dit aussi qu'elles ne sont pas algébriques). Ce qualificatif signifie que de telles opérations ne peuvent être intégralement déterminées au moyen d'un nombre fini de sommes, de produits, de quotients, de différences ou de racines de fonctions polynomiales. L'expression formelle de problèmes mathématiques nécessite encore que l'on recoure à des définitions implicites. C'est ce que l'on fait ordinairement dans le cadre de l'algèbre où l'on se sert systématiquement de variables littérales de portée générique en lieu et place des nombres réels qui permettent normalement de spécifier un problème particulier. Ecrire l'équation algébrique « $4x + 5 = 0$ » par exemple

constitue ainsi un procédé mathématique permettant de définir implicitement une certaine quantité x (en l'occurrence $-\frac{5}{4}$), pour laquelle cette égalité se trouvera effectivement vérifiée.

Il en ira bien entendu de même avec des expressions plus compliquées impliquant cette fois des formules polynomiales, des racines, des fractions, etc. Il ressort de ces quelques remarques d'ordre fort général que la formalisation mathématique de problèmes peut fréquemment conduire à la détermination de formules complexes comprenant concurremment des opérations arithmétiques primitives, des opérations ou des fonctions transcendantes, des définitions implicites, mais également des séries infinies qui convergent de façon plus ou moins rapide⁵¹¹. Or si pour leur fonctionnement toutes les machines à calculer, quel que soit leur genre, quelle que soit leur technologie particulière, reposent foncièrement sur les principes fondamentaux de la mathématique, les formules pouvant être exprimées au moyen de ses méthodes, de sa syntaxe et de son vocabulaire sont en fait absolument indifférentes aux divers équipements de calcul susceptibles d'être employés pour leur découvrir des solutions. *A priori* donc, un même problème pourra être indistinctement résolu en utilisant un instrument digital ou bien un calculateur analogique (dans ce dernier cas, et puisque ici on ne calcule pas mais que l'on mesure, il sera bien entendu nécessaire de fabriquer un dispositif *ad hoc* dont la structure matérielle et le comportement dynamique reflèteront très exactement la forme de l'expression ou celle de la classe d'expressions devant être traitées). Que l'on décide alors d'opter pour la méthode analogique ou la modalité digitale afin de solutionner une expression mathématique particulière, une chose demeure assurément acquise: à l'exception des cas de figure extrêmement simples, il sera absolument indispensable de toujours procéder à la redéfinition de la formule mathématique originale de façon à ce que la machine puisse la prendre en charge. La nécessité dans laquelle on se trouve ainsi de réaliser quasi systématiquement ce procès de transformation avant tout traitement machinal s'explique par le fait que les calculateurs ne disposent en réalité que d'un répertoire limité d'opérations élémentaires construites « en dur » (on dira aussi de celles-ci qu'elles sont « câblées » ou « *built in* »). En conséquence, une machine ne pourra par exemple jamais calculer directement des opérations non algébriques. S'il s'avère qu'une expression mathématique contient effectivement une ou plusieurs fonctions transcendantes, il faudra auparavant remplacer ces dernières par des séquences finies d'opérations élémentaires – soit des *approximations*

⁵¹¹ C'est le cas notamment des définitions mathématiques utilisées pour calculer les décimales de π , qu'elles se trouvent liées à la géométrie dans l'espace euclidien (méthode d'Archimède ou méthode des isopérimètres de Descartes par exemple), ou qu'elles soient de nature purement analytique (séries infinies de Wallis, de Leibniz, de Newton, de Machin, d'Euler, etc.).

arithmétiques de ces fonctions transcendantes - qui toutes devront impérativement appartenir au répertoire d'opérations primitives de la machine spécifiquement considérée. Il en ira de même avec les définitions implicites et les processus aux limites. Aux premières devront être substituées des définitions explicites impliquant des procédures constructives finies quant aux seconds, ils devront être tronqués puis remplacés par des séquences déterminées uniquement constituées d'opérations élémentaires. Hermann H. Goldstine propose deux exemples concrets afin d'illustrer cela⁵¹². Les analyseurs différentiels, on s'en souvient, avaient été spécifiquement construits pour traiter des expressions impliquant la résolution d'équations différentielles. Or pour ces calculateurs analogiques, il se trouve que l'opération de multiplication n'était pas élémentaire (leur répertoire de base comprenait les opérations d'intégration et de différentiation mais pas celle de multiplication). En ce sens, c'est-à-dire pour ces machines et ces machines seulement, elle pouvait donc être considérée comme une opération « transcendante ». Pour effectuer une multiplication avec un analyseur différentiel, il était nécessaire d'exprimer cette opération particulière dans les termes des quelques opérations de base dont il disposait exclusivement (ce qui en pratique était parfaitement réalisable en recourant par exemple à l'intégrale de Stieltjes). *Idem* avec la très grande majorité des calculateurs numériques mécaniques de bureau (*desktop numerical calculator*), pour lesquels la racine carrée ne constituait pas une opération fondamentale⁵¹³. Cette forme de contrainte – qui consiste donc à devoir presque invariablement opérer une réduction des formules mathématiques premières dans les seuls termes élémentaires effectivement reconnus par telle ou telle machine – affecte donc tout autant les calculateurs analogiques que les calculateurs numériques. Dans l'un et l'autre cas, il est de toute façon primordial d'observer que l'on n'a plus jamais affaire ici aux expressions telles qu'originellement exprimées par le mathématicien mais bien à des formules reconstruites qui présentent la propriété remarquable d'être cette fois directement interprétables par les machines. Toutefois, et puisqu'un processus de « traduction » intervient quasi obligatoirement ici, l'inconvénient majeur de ce mode opératoire est que ces expressions recomposées ne constituent en fait que des approximations des énoncés originaux. En d'autres termes, lorsque l'on procèdera à leur évaluation par machine, le résultat terminal que l'on se trouvera

⁵¹² In [Goldstine, 1972], p. 142.

⁵¹³ Notons qu'habituellement, la racine carrée n'était pas non plus une opération de base pour les calculateurs analogiques. On sait par exemple qu'Helmut Hoelzer avait utilisé une équation différentielle spéciale, $\frac{1}{V} \frac{dy}{dt} + y^2 = b$, pour réaliser ce processus avec le calculateur analogique qu'il construisit en 1941 à Peenemünde.

effectivement en mesure d'obtenir ne pourra jamais être strictement identique à celui que l'on aurait pu obtenir en calculant directement les formules de départ (si tant est bien sûr que le temps requis pour accomplir une pareille computation ne s'avère pas rédhibitoire). Dans les faits, mais c'est loin d'être systématique, cette divergence peut quelquefois se révéler minimale, voire infinitésimale et si l'on dispose d'un calculateur extrêmement puissant (c'est-à-dire d'un instrument doté d'une grande vitesse d'opération et d'une capacité mémoire très importante), il est encore possible de la réduire itérativement, par affinages successifs. Mais pour précis que puisse être ce résultat, répétons-le à nouveau, il ne pourra jamais être considéré comme étant rigoureusement exact. Il subsistera ainsi constamment une erreur due au type et à la structure de la machine, au caractère et au nombre fini de ses composants, à la limitation de son répertoire d'opérations élémentaires et à l'élection de la méthode mathématique particulière retenue pour effectuer le calcul. Nous aurons l'occasion de revenir beaucoup plus longuement sur ces questions assurément cruciales que représentent le problème de la précision qu'est capable d'atteindre une machine et celui de la stabilité numérique d'une solution. Qu'il suffise pour l'instant de dire, en reprenant presque exactement l'observation de J. Ramunni, qu'en matière de calcul automatique toute prétention à la précision absolue se révèle en réalité parfaitement illusoire. Cette dernière remarque, ne l'oublions pas, s'applique tout autant aux calculateurs analogiques qu'aux calculateurs digitaux, et ce quel que puisse être leur degré de sophistication.

Ceci ayant été précisé, revenons à présent à notre interrogation initiale : qu'est-ce donc qui fait la spécificité des machines digitales ? Qu'est-ce qui leur confère un si grand pouvoir ? Depuis plus d'un demi-siècle maintenant, et non sans avoir entre-temps déclassé les calculateurs analogiques, celles-ci règnent en effet sans partage sur les secteurs militaires, scientifiques et industriels. Il y a à peu près vingt-cinq ans de cela, c'est-à-dire une fois qu'elles ont pu faire techniquement l'objet d'un processus de miniaturisation et bénéficier de logiciels d'exploitation « ergonomiques », de dispositifs et de protocoles d'intercommunication aboutis, elles ont commencé à pénétrer – puis ont fini par littéralement submerger – non seulement l'univers de l'entreprise mais aussi celui du domestique au point que nous en sommes aujourd'hui réduits à penser le plus communément du monde nos propres sociétés selon la triple modalité paradigmatique de l'informatique, du numérique et du réticulaire⁵¹⁴. Comment, alors, rendre compte de leur immense puissance ? Parvenus à ce point, le mieux, pour nous, consiste peut-être à nous en remettre une fois encore à l'autorité

⁵¹⁴ Notons que les nations sous-équipées sur le plan informatique n'échappent pas à cette règle puisque la catégorie d'« infopauvres » a été spécialement forgée pour les désigner.

d'Herman H. Goldstine. De façon très générique, le mathématicien américain définit ainsi l'approche digitale: « *It is the realization that a machine can be built to imitate the human method of calculation*⁵¹⁵ ». C'est précisément en ce sens que nous affirmions plus haut de la modalité numérique de calcul qu'elle était « naturelle » ou, si l'on préfère, profondément coextensive à l'homme. Car les calculateurs de ce type ou les ordinateurs, fondamentalement, ne calculent pas autrement que nous ne le faisons. Certes, il existe de nombreuses différences factuelles entre ces machines et l'homme engagé dans l'acte de calcul. Les bases numériques utilisées de part et d'autre, par exemple, diffèrent singulièrement (bien qu'il faille prendre acte du fait qu'avant que l'emploi du binaire ne commence à s'imposer avec le recours de plus en plus massif aux composants électromécaniques puis électroniques, nombre de machines digitales travaillaient en base dix). En outre leur vitesse d'opération, tout de même que la précision et la fiabilité dont elles sont généralement capables, nous le savons, surpassent incommensurablement celles du calculateur humain (c'est là un des privilèges de la mécanicité et c'est bien entendu ce qui nous les rend si précieuses) Mais il n'en demeure pas moins qu'au delà des différentes solutions technologiques et architecturales susceptibles d'être retenues pour les fabriquer, la méthode selon laquelle ces instruments opèrent est strictement la même que celle que nous utilisons lorsque nous calculons. Sur ce plan assurément principal, il n'existe pas de dissemblances notables entre le *computer* humain, pour reprendre une dénomination aujourd'hui presque totalement oubliée, et les artefacts de ce genre. Les machines numériques, à l'opposé des calculateurs analogiques qui mesurent, calculent exactement comme nous le faisons, c'est-à-dire en comptant étape par étape, nombre par nombre. Chaque phase élémentaire de la computation revêt alors strictement la même importance que celle qui l'a précédée et celle qui, le cas échéant, lui succèdera. Méthode progressive, uniforme et cohérente du cheminement « pas à pas », de la division cartésienne du complexe vers le simple, qui s'installe et se déploie pleinement dans une successivité constante rythmée par l'élémentarité des opérations individuelles et intermédiaires réalisées jusqu'à obtention du résultat terminal. C'est bien là ce que signifie Jean-Claude Beaune lorsqu'il écrit : « [La modalité numérique consiste à] *ramener toutes les opérations mécaniques à une suite d'opérations élémentaires, suite évidemment très longue et qui doit être longuement parcourue, en de nombreux calculs intermédiaires*⁵¹⁶ ». Soit, c'est là au moins une propriété absolument essentielle que nous partageons avec nos modernes instruments de calcul. Mais *quid* alors de leur puissance ? *Quid* de leur généricité ? Presque

⁵¹⁵ In [Goldstine, 1972], p. 142.

⁵¹⁶ In [Beaune, 1980], p. 214.

immédiatement après avoir affirmé que l'approche digitale consistait finalement en cette géniale et très ancienne intuition qu'une machine pouvait être fabriquée en vue d'imiter la manière dont l'homme calcule, Goldstine cite Léopold Kronecker à deux reprises. Le grand algébriste allemand du 19^{ème} siècle a ainsi pu consigner les deux réflexions suivantes: « *Dieu a créé les entiers, tout le reste résulte du travail de l'homme* » et « *Tous les résultats qui peuvent être obtenus dans le cadre de l'investigation mathématique la plus profonde doivent finalement pouvoir être exprimés sous la forme simple des propriétés des entiers* ».

Ceci pour intensifier encore le caractère absolument principiel - voire divin si l'on consent à suivre les idées avancées ici par L. Kronecker - des entiers naturels et de leurs propriétés auxquels tout, si l'on excepte les fonctions qui ne sont pas calculables, peut en principe être ramené. Bien qu'il s'agisse sans conteste possible d'un problème tout à la fois passionnant et primordial – il y a là en effet matière à penser au moins depuis Platon et Aristote... - notre présent propos ne consiste pas à nous interroger sur le statut ontologique ou le « degré de réalité », pour faire nôtre l'expression du mathématicien Pierre Cartier, qu'il faut ou non accorder aux objets mathématiques. Ce qui importe ici plus que toute autre chose, et c'est précisément le sens de la seconde déclaration de Kronecker, c'est qu'en général les expressions mathématiques, y compris les formules analytiques impliquant des fonctions ou des opérations transcendantes, peuvent effectivement faire l'objet d'une reformulation satisfaisante dans les termes élémentaires de l'arithmétique. Cette procédure de transformation, comme de bien entendu, entraîne un coût qui n'est pas forcément négligeable: ainsi que nous l'avons déjà précisé, la résolution numérique de tels problèmes, pour qu'elle soit possible, nécessite que l'on remplace la formule telle qu'initialement définie par une approximation arithmétique pouvant être directement traitée par la machine. Dans tous les cas donc, on perd nécessairement en exactitude puisque l'expression numérique correspondant à la formule de départ, qui peut être extrêmement voisine de celle-ci, ne lui est pourtant pas rigoureusement équivalente. En contrepartie cependant, on gagne considérablement en facilité de résolution : en recourant à cette méthode, tout calcul, quel que soit son type et son degré de complexité, se révèle ainsi potentiellement mécanisable étant donné qu'il peut être transposé dans les termes opérationnels basiques des machines numériques. C'est justement là ce qui fait toute la force de l'approche numérique, ce qui lui confère son immense généralité, sa très grande puissance, bref son universalité. Les analyseurs différentiels, pourtant les calculateurs les plus aboutis et surtout les plus rapides de la période 1930-1943 étaient quant à eux incapables d'une pareille généralité (rappelons en outre que les formules mathématiques qui devaient être traitées au moyen de machines analogiques devaient elles aussi subir une

« préparation » de façon à être conformes aux exigences structurelles particulières de ces dernières). En plus de leur caractère extrêmement spécialisé – ce qui d'emblée bornait leur portée - les machines de ce genre souffraient d'importantes limitations intrinsèques à la fois théoriques et techniques qui avaient pour conséquence évidemment non négligeable de limiter très singulièrement leurs capacités. En principe, il était par exemple impossible de passer d'une précision de travail de 4 à 8 chiffres avec un analyseur différentiel tandis qu'avec une machine numérique, on pouvait augmenter celle-ci sans grande difficulté technique et surtout sans prendre le risque de voir apparaître de façon quasi assurée des dysfonctionnements mécaniques occasionnés par la trop grande complexité du calculateur. A la limite, seul le coût financier lié à la production des composants d'une machine numérique pouvait effectivement constituer une forme de barrière à cette extension de capacité.

Dans ce qui précède, nous nous sommes efforcés de démontrer en quoi résidaient les spécificités des calculateurs digitaux. Ce faisant, nous avons également tenté de souligner les différences fondamentales qui les séparaient des machines analogiques. L'approche numérique du calcul, du fait même de son caractère universel, est en réalité incomparablement plus puissante que l'approche analogique. En droit, un dispositif numérique peut en effet calculer tout ce qui est calculable alors que ceci ne saurait être légitimement affirmé des calculateurs analogiques : ces derniers calculaient, ou plutôt mesuraient, ce pour quoi ils avaient été précisément conçus et, sans vouloir non plus minimiser leurs performances ni leur valeur historique qui est bien réelle, force est de reconnaître que c'est là tout ce dont ils étaient capables. Ainsi que l'a mathématiquement établi Claude Shannon en 1941, les analyseurs différentiels – *i.e.* la classe la plus « représentative » des calculateurs analogiques – possédaient des limites infranchissables (sous peine de voir apparaître de graves incidents de fonctionnement). Passés certains seuils critiques – essentiellement liés à la complexité matérielle de l'appareil et à sa vitesse d'opération – le comportement mécanique de ces instruments tendait nécessairement à devenir instable voire catastrophique. De ce fait, les résultats peu fiables qu'ils produisaient alors ne pouvaient faire l'objet d'une quelconque exploitation. A l'inverse, les calculateurs digitaux ne souffraient d'aucune de ces limitations essentielles, ce qui en faisait potentiellement des machines parfaites. Leur seule imperfection notoire consistait finalement en leur rapidité jugée par trop médiocre pour que l'on puisse raisonnablement envisager de les utiliser pour mener à bien des travaux scientifiques (elle était néanmoins suffisante pour effectuer des tâches de nature commerciale ou administrative). Jusqu'à l'avènement du calculateur numérique électronique, puis de celui des ordinateurs – lesquels, grâce à leur architecture originale, exploiteront pleinement la dimension universelle

de l'approche numérique - les instruments de calcul analogiques ont ainsi presque totalement dominé le monde des sciences et de l'ingénierie en Europe tout comme aux Etats-Unis. Mais bientôt la fin de la seconde guerre mondiale, l'explosion de la première bombe atomique soviétique (le 29 août 1949), et le conflit en Corée (juin 1950 – juillet 1953), devaient définitivement refermer la parenthèse sur ce règne presque hégémonique en conduisant à un renversement de situation tout aussi radical que rapide. En 1950, l'armée américaine définit ainsi un certain nombre d'objectifs d'intérêt national – autrement dit militaire - qu'elle présenta la même année aux représentants des principaux pôles industriels et centres de recherche scientifique de ce pays. Ce projet de très vaste envergure, connu sous l'appellation de *Federal Computing Machine Program*⁵¹⁷, visait prioritairement à faire en sorte que les Etats-Unis disposent en permanence d'une avance technologique de deux années en matière de calcul automatique, l'accent étant exclusivement mis ici sur l'approche numérique. Cette volonté d'anticipation traduisait trois choses au moins : 1) les américains, forts de leur récente expérience, avaient parfaitement saisi toute l'importance du rôle que seraient appelées à jouer dans le futur les machines à calculer numériques dans le domaine militaro-scientifique ; 2) ils étaient bien évidemment conscients de la formidable menace militaire que représentait désormais pour eux l'Union Soviétique et ses nombreux alliés communistes ; 3) face à la surprenante réactivité scientifique de l'U.R.S.S. – il est vrai très efficacement secondée par les « trésors de guerre » nazis récupérés par l'Armée Rouge en 1945 ainsi que par les réseaux d'espionnage⁵¹⁸ implantés aux U.S.A. – il était à présent devenu vital de ne pas réitérer les erreurs commises pendant la seconde guerre mondiale, *i.e.* de ne pas avoir à se trouver en situation de réagir en catastrophe en fonction des événements internationaux qui étaient susceptibles de se produire. Pour le dire autrement, il était maintenant indispensable de disposer d'instruments de calcul performants avant que la menace ne commence à ne se faire jour et non pas attendre que celle-ci se précise pour commencer à travailler sur leur conception (comme cela avait été justement le cas avec l'E.N.I.A.C.). Parmi les spécifications techniques primordiales détaillées dans le F.C.M.P. avaient été notamment prévus la simplification des circuits des calculateurs, le remplacement des tubes à vide par des composants semi-conducteurs (plus petits et plus rapides que les *vacuum tubes*), tout de même que la mise au point de mémoires à haute fréquence et la définition de protocoles de codage simplifiés (cette dernière tâche étant laissée à la discrétion des constructeurs). L'objectif majeur poursuivi ici consistait donc en la fabrication de machines numériques dotées d'une

⁵¹⁷ M. Rees, « *The Federal Computing Machine Program* », in *Science*, n°112, 1950, pp. 731-736.

⁵¹⁸ En témoigne l'affaire Rosenberg, jugée en 1951.

très grande vitesse d'opération, qui seraient plus simples à utiliser que ne l'avaient été celles construites précédemment, et qui devaient en outre être capables d'imprimer leurs résultats. Le versant humain du « problème » n'avait pas non plus été négligé puisque l'accent avait été mis sur la nécessité de disposer d'un personnel très qualifié principalement composé de mathématiciens familiers de l'analyse numérique. Il apparaît donc très nettement qu'au tournant des années 40, l'Amérique de Harry S. Truman, pour des mobiles exclusivement militaires et stratégiques, avait décidé d'opter pour le calcul numérique servi par la vitesse extraordinaire de l'électronique (tout ceci s'effectuant bien sûr au détriment de l'approche analogique). Dans un climat de prospérité économique particulièrement favorable, ne restait plus alors aux acteurs scientifiques et industriels de l'époque qu'à s'aligner sur cette prise de position institutionnelle cruciale. Ce qu'ils firent évidemment sans tarder...

Des impérieuses nécessités tactiques et stratégiques occasionnées dans l'urgence par la deuxième guerre mondiale étaient donc nés non seulement l'E.N.I.A.C., le seul grand calculateur numérique électronique jamais construit sur cette planète, mais surtout l'E.D.V.A.C., le premier ordinateur dont l'architecture logique est encore à ce jour celle de la très grande majorité de nos machines (les calculateurs parallèles, qui restent toutefois relativement rares, n'obéissent pas à ce schème organisationnel). Mais c'est la guerre froide naissante, et avec elle le spectre de l'anéantissement nucléaire de l'espèce, qui devait donner leurs véritables lettres de noblesse aux machines à calculer numérique. L'histoire de ces instruments et de ceux qui leur ont succédé, l'étude de la façon dont en à peine une soixantaine d'années ils ont littéralement bouleversé et façonné nos sociétés et nos modes de vie, nous faisant ainsi passer d'une vision continuiste du monde à une compréhension numérique de celui-ci, constituent les objets de la prochaine partie.

2.2.5.3. L'Electronic Numerical Integrator and Computer de la Moore School of Electrical Engineering.

Originellement, et par définition, l'informatique est technique du traitement automatique de l'information. C'est tout d'abord une information de nature quantitative qui ressort exclusivement au domaine de la science appliquée, la plupart du temps directement militarisée, qui constitue son principal objet. Au départ, c'était même là leur raison d'être première, il s'agissait fondamentalement de confier à des dispositifs numériques électroniques automatisés la réalisation des calculs complexes, fastidieux et hautement stratégiques - nous songeons en tout premier lieu au calcul des tables de tir balistique

nécessaires à l'artillerie⁵¹⁹ - que les équipes de calculateurs humains de la *Penn's Moore School* par exemple, même secondés par le puissant analyseur différentiel que possédait depuis 1935 cette institution, étaient matériellement impuissants à mener à leur terme dans les délais de plus en plus brefs que leur imposait l'évolution extrêmement rapide de la situation conflictuelle mondiale⁵²⁰. Fondièrement, en tout cas selon une perspective strictement pragmatique, c'est du constat de cette incapacité de fait à produire massivement et de plus en plus rapidement ces résultats mathématiques indispensables aux armées par les moyens humains, mécaniques ou électromécaniques disponibles alors, et par conséquent de l'impérieuse nécessité dans laquelle se trouvaient les forces militaires américaines de définir une solution technique permettant de remédier pressément à cette situation, que naquit et se concrétisa véritablement l'idée du grand calculateur digital électronique puis celle de

⁵¹⁹ La fonction d'une table de tir balistique consiste à permettre à un servant de pièce d'artillerie (mais ceci vaut aussi pour les fantassins et les snipers par exemple), de régler l'angle de tir de celle-ci en fonction de paramètres multiples tels que la distance et l'altitude de la cible, l'influence de la gravité sur le comportement dynamique du projectile, le coefficient balistique de celui-ci, la vitesse du vent (qui peut le cas échéant être frontal ou latéral) ou encore la température et l'humidité de l'air (ces données sont extraites du *Field Manual* No 23-10, *Headquarters, Department of the Army*, Washington D.C., 17 août 1994, pp. 3-26, 3-27, 3-28). Nous aurions tout aussi bien pu évoquer ici les machines (Bombes, Colossus Mark I et II) qui furent conçues au Royaume-Uni pendant la même période - pour certaines d'entre elles sous la direction d'Alan M. Turing - et qui étaient quant à elles destinées à accélérer le traitement (déchiffrement) des données militaires allemandes cryptées (grâce à Enigma), interceptées par radio.

⁵²⁰ Scott McCartney nous semble assez bien résumer cette situation pour le moins préoccupante lorsqu'il écrit: « *Aberdeen [i.e. le B.R.L.] was falling far behind in its firing table responsibility, and guns were being delivered to Europe and Africa that were essentially useless because they could not be aimed. Different terrain, too, was becoming a huge problem for the army, especially in Africa. Tables made for Europe, the army found, did not work in Africa, where troops landed in the fall of 1942, because the ground was softer and guns behaved differently. The army had contracted with Penn's Moore School for help with all the calculating because the school had a Differential Analyser. The army also assembled a team of civil-service human computers at Penn to add more number-crushing might. It was still not enough. Dr. Goldstine, a meticulous mathematician had been put in charge of the operation at Penn and ordered to get the tables completed faster. That seemed simple enough, until Goldstine began calculating the impossibility of the task.* », in [McCartney, 1999], pp. 54-55. Rappelons qu'une table de tir - calculée pour un type de pièce d'artillerie spécifique - comprenait entre 2000 et 4000 trajectoires possibles. Il fallait quelques trente journées de calcul à un analyseur différentiel pour compléter une table (cela peut sembler énorme mais il faut se souvenir que les dispositifs les plus performants pour accomplir ce type de tâche étaient déjà en moyenne cinquante fois plus rapide qu'un calculateur humain pourvu d'un calculateur de bureau !). Pour chaque arme lourde d'un certain genre, il donc fallait calculer une telle table, sans quoi elle était littéralement inutilisable. En plus du fait que de nouveaux matériels (armes et projectiles) furent continûment introduits durant la guerre (pour lesquels il fallait systématiquement calculer de nouvelles tables), les artilleurs se rendirent assez rapidement compte que les tables antérieurement calculées pour leurs pièces tractées ou automotrices n'étaient forcément pas valables pour la totalité des terrains où ils étaient appelés à les déployer. Ainsi, en Afrique, les canons, du fait du mouvement de recul imposé par le tir du projectile et de leur masse même - un Howitzer M2A1 de 105mm pesait 2030 kg tandis qu'un Gun M2 de 155 mm en pesait 13880 ! - avaient fâcheusement tendance à s'enfoncer peu à peu dans le sol. C'était là un phénomène qui ne se produisait généralement pas sur les autres théâtres d'opération. Il était donc nécessaire de calculer à nouveau des tables de tir pour ces équipements puisqu'ils devaient être utilisés sur des sols dont la nature meuble avait pour conséquence plus qu'inopportune de rendre totalement inefficaces les tables qui étaient ordinairement employées pour pointer les objectifs devant être traités. On comprend alors qu'une telle tâche de calcul, déjà monstrueuse, ait été rendue proprement irréalisable au fur et à mesure que de nouvelles armes étaient introduites dans les armées et que se faisait jour en même temps la nécessité d'en calculer de nouvelles pour des armes déjà en dotation.

l'ordinateur digital : les plans de l'E.D.V.A.C. étaient couchés sur le papier par John Von Neumann alors que la construction de l'E.N.I.A.C. n'était pas encore achevée. De ce point de vue donc – qui n'est en rien exclusif⁵²¹ mais possède néanmoins une dimension absolument primordiale et incontournable - l'*impētūs* « historique » qui détermina réellement, et dans l'urgence, l'apparition de l'ordinateur prend ses racines dans un champ où convergent la physique et les mathématiques appliquées ainsi que les besoins issus du domaine militaire. Initialement le calculateur électronique digital et l'ordinateur digital électronique – au même titre le croyons- nous que le canon ou la bombe atomique, mais de manière invisible, comme dérobée aux regards – sont « machines de guerre » car c'est bien la volonté de gagner la guerre qui, *in fine*, a non seulement permis mais aussi a provoqué leur apparition.

Les calculateurs digitaux électromécaniques ou électroniques de la première moitié des années quarante – mais ceci valait également pour nombre d'instruments analogiques - étaient fort peu nombreux, incroyablement compliqués et volumineux mais aussi très coûteux à produire. Les rares individus qui pouvaient avoir accès à ces derniers au sein des quelques laboratoires américains qui bénéficiaient alors des largesses financières de l'U.S. Army, toujours astreints au respect absolu du secret défense, faisaient la plupart du temps partie des équipes de personnes hautement spécialisées et triées sur le volet qui, dès le départ, avaient participé à leur conception, à leur mise en oeuvre ou encore à leur entretien (bien que, exception notable s'il en est, John Von Neumann n'ai rejoint le projet E.N.I.A.C. qu'au mois d'août de l'année 1944⁵²²). Il s'agissait en très grande majorité de mathématiciens, de physiciens, d'ingénieurs en électronique ou en électricité, de consultants ou de « décideurs » militaires – parfois des scientifiques mobilisés, comme l'était le mathématicien Herman H. Goldstine - ou bien encore de techniciens. Au cours de cette bouillonnante phase fondatrice, de cette période d'expérimentation et de mise au point intense, et par la force même des dramatiques circonstances historiques qui provoquèrent à la fois son avènement puis le stupéfiant perfectionnement de ses artéfacts, l'informatique tout juste naissante pouvait très certainement se voir identifiée à cet ensemble complexe, confidentiel et formidablement novateur de procédés scientifiques et techniques convergents destinés à permettre et à accélérer, presque uniquement à des fins guerrières, le traitement automatique de données quantitatives. Les machines de cette période (nous parlons ici des années 1940-1945), étaient dans leur très grande majorité ce que les américains et les britanniques avaient coutume de

⁵²¹ En cela que l'invention de l'ordinateur ne saurait être désolidarisée, et par là même isolée, de l'effort continu ayant pendant deux millénaires visé à mécaniser et à parfaire la mécanisation le calcul.

⁵²² A la suite d'une rencontre fortuite – et célèbre! - avec Herman H. Goldstine sur un quai de la gare d'Aberdeen durant l'été 1944 alors que ce dernier attendait le train pour se rendre à Philadelphie.

nommer des *one kind computers* - littéralement, des « calculateurs uniques en leur genre⁵²³ » - dont une des caractéristiques principales consistait dans le fait qu'ils avaient été dès l'origine spécifiquement conçus et assemblés dans le but de permettre l'effectuation de certaines tâches bien précises. D'une certaine façon donc, ce pour quoi ils avaient été réalisés se reflétait complètement ou presque dans leurs matériaux souvent disparates, dans la façon dont ils avaient été précisément pensés et organisés et, même, dans leurs défauts fondamentaux.

Les circonstances tragiques dans lesquelles tous ces hommes et femmes d'exception avaient été *de facto* plongés par les impératifs de la guerre, au Royaume Uni comme aux Etats Unis du reste, les avait donc conduits à développer des dispositifs automatiques de calcul complètement inédits⁵²⁴ dans des délais incroyablement brefs qui tous, quelles qu'aient pu être par ailleurs leurs spécificités techniques particulières et les tâches auxquelles ils avaient été immédiatement affectés - cryptanalyse avec Colossus ou calcul de tables tir balistique avec l'E.N.I.A.C. par exemple - tendaient absolument vers un seul et même objectif à la fois impérieux et vital : permettre de vaincre les forces de l'Axe et donc de mettre rapidement un terme à la seconde guerre mondiale. Bien qu'ils se soient inscrits dans une trajectoire qui était tout à la fois plurimillénaire et planétaire - nous faisons bien entendu ici allusion directe à la très longue tradition de la mécanisation du calcul – le calculateur digital électronique et

⁵²³ La machine britannique Colossus Mark I ou le calculateur électronique américain E.N.I.A.C., par exemple, pouvaient sûrement être qualifiés de la sorte. Notons cependant qu'en 1948, soit quelques trois années après la publication du *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.* de John Von Neumann, Richard Clippinger, alors à la tête du *Computing Laboratory* du *Ballistic Research Laboratory* parvint avec son équipe à convertir l'E.N.I.A.C. en calculateur à programme interne, autrement dit, en ordinateur universel. Ce renouvellement pour le moins substantiel intervint peu de temps après que Von Neumann, en 1947, ait réalisé que l'absence d'un organe de contrôle central pour cette machine ne constituait pas un défaut auquel il était définitivement impossible de remédier. Il suggéra que cette machine pourrait être programmée pour fonctionner comme un calculateur à programme interne (c'est-à-dire un ordinateur primitif). Cette tâche de développement fut dans un premier temps confiée à Adèle K. Goldstine, l'épouse d'Herman H. Goldstine, le célèbre collaborateur de John Von Neumann. Celle-ci réussit à développer un système appelé *Converter Code*, qui autorisait le programmeur de l'E.N.I.A.C. à le programmer directement par le truchement d'un jeu de 51 instructions. R. Clippinger hérita de ce travail de développement peu de temps après et enrichit ce jeu de 9 instructions. Au final, c'est-à-dire en 1949, le jeu d'instructions de l'E.N.I.A.C. avait été porté à 92 instructions. Bien évidemment, ce nouveau *modus operandi* possédait un défaut de taille : il entraînait en effet un ralentissement assez sensible de la vitesse de fonctionnement de la machine. En contrepartie, la tâche du programmeur était largement facilitée en même temps qu'elle se trouvait grandement accélérée (rappelons qu'avant que cette modification ne soit apportée, la programmation de l'E.N.I.A.C. était effectuée en câblant manuellement les unes aux autres ses diverses unités de calcul, cette procédure harassante et délicate devant être réitérée chaque fois qu'un nouveau problème devait être traité). On peut donc raisonnablement conclure de cela qu'en *puissance* au moins le « premier » E.N.I.A.C. était déjà un ordinateur électronique universel (bien que très élémentaire). Il aura seulement fallu attendre le *First Draft* et l'E.D.V.A.C. – donc pour ainsi dire la prise de conscience de John Von Neumann - pour que cette potentialité se trouve effectivement réalisée.

⁵²⁴ Comme nous l'avons vu, l'idée d'une approche numérique ou arithmétique de la mécanisation du calcul – pour ainsi dire contre l'« école » analogique - était très largement antérieure à la deuxième guerre mondiale (déjà les machines mécaniques de Blaise Pascal, celles de Gottfried Wilhelm von Leibniz, le *Difference Engine* de Charles Babbage, pour ne même pas faire ici mention du boulier, étaient des machines digitales). C'est plutôt la reprise de cette modalité de mécanisation du calcul au milieu du 20^{ème} siècle ainsi que son couplage à la « nouvelle » technologie électronique qui constituait ici le véritable facteur d'innovation.

surtout l'ordinateur rompaient spectaculairement avec celle-ci tant des points de vue conceptuel que technologique. Les moyens colossaux qui furent effectivement mis en oeuvre pour définir et élaborer ces instruments de calcul d'un nouveau genre, qu'ils aient été financiers ou humains, les concepts et les techniques qui furent développés ou adaptés mais de toute façon mis en oeuvre et, peut-être plus que toute autre chose, la conjoncture historique mondiale et les objectifs tactiques et stratégiques qui étaient alors poursuivis par les Alliés étaient, pour autant que nous le sachions, sans précédents connus. Cette totalité de facteurs concourants contribua à faire de ces machines des dispositifs complètement originaux initialement destinés à opérer sur des problèmes mathématiques dont la bonne effectuation du traitement, placée en permanence sous la double contrainte de la précision et de la rapidité, devait s'avérer absolument décisive pour l'issue (heureuse) du conflit dans lequel le monde était plongé depuis plusieurs années.

Il n'était plus du tout question ici, comme cela avait été le cas avant-guerre, de concevoir ou de perfectionner des machines de bureau numériques – tabulateurs, additionneurs, multiplicateurs, perforateurs ou totalisateurs – pour accélérer et rendre plus fiable encore qu'il ne l'était déjà le traitement des données qui ressortaient habituellement aux domaines du marché civil ou étatique. Quant aux instruments de calcul dont il avait été couramment fait usage dans la sphère scientifique avant le déclenchement de la deuxième guerre mondiale – principalement des analyseurs différentiels électromécaniques ou électroniques - ils se virent intégrés à l'effort de guerre⁵²⁵ avant d'être assez rapidement

⁵²⁵ Quoiqu'il faille ici ne pas manquer de se rappeler que dès 1930, date à laquelle l'analyseur différentiel de Vannevar Bush fut officiellement présenté, des membres du *Ballistic Research Laboratory* d'Aberdeen se mirent en contact avec lui pour construire un analyseur différentiel, lequel devait leur permettre *in fine* de résoudre des équations différentielles balistiques, donc des problèmes mathématiques directement liés à des questions de nature proprement militaire. Remarquons aussi que la même année, et indépendamment des efforts entrepris parallèlement par les gens du B.R.L., des membres de la *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie approchèrent aussi Vannevar Bush afin de définir avec lui les grandes lignes d'un partenariat en vue de la construction d'un analyseur différentiel destiné à solutionner des équations différentielles d'ingénierie électrique. Dans l'un et l'autre cas, il s'agissait donc de résoudre des problèmes mathématiques participant d'un même type fondamental, c'est-à-dire des équations différentielles totales ou ordinaires, bien que les domaines applicatifs desquels ces derniers relevaient *de facto* aient pu différer assez sensiblement (cette parenté essentielle des problèmes mathématiques à traiter permet par ailleurs de comprendre assez aisément pourquoi les instruments de ce genre purent être aisément réorientés, la guerre venue, vers la résolution de problèmes directement liés à des questions de balistique). En 1933, et à la suite de contacts répétés, un programme commun de construction fut mis en place qui impliquait conjointement l'*Ordnance Department of the U.S. Army* (le Bureau du matériel de l'armée américaine, pour le B.R.L.), l'Université de Pennsylvanie (*Moore School of Electrical Engineering*), et le *Massachusetts Institute of Technology* (dont Vannevar Bush était membre). Cette collaboration fut heureuse puisqu'un accord entre ces trois parties résulta assez rapidement qui portait sur un design commun pour les machines du B.R.L. et de la *Moore School*. Les deux analyseurs différentiels, la machine « civile » et la machine « militaire », furent finalement terminées et livrées à leurs commanditaires en 1935. Plus important peut être pour notre histoire est assurément la collaboration qui fut initiée à cette occasion entre l'*Ordnance Department* de l'armée américaine et la *Moore School* de l'Université de Pennsylvanie puisque ce sont là les deux acteurs institutionnels majeurs que nous retrouverons en 1943 à l'origine du projet secret PX, autrement dit l'E.N.I.A.C.

déclassés du fait de leur lenteur de fonctionnement rédhitoire, de leur instabilité chronique et de leur « manque » de genericité par leurs nouveaux concurrents digitaux électroniques et surtout par les descendants immédiats de ces derniers, les ordinateurs (qui les déclassèrent aussi vite et de façon tout aussi définitive⁵²⁶). Ces systèmes d'un genre totalement inédit, ces « cerveaux artificiels » comme on devait sans tarder les nommer publiquement et parfois même publicitairement, représentaient en fait, tant du point de vue principal que de celui de l'organisation matérielle, le *nexūs* où les trajectoires continûment convergentes de traditions plus ou moins anciennes – automatisme en premier lieu, mais également logique mathématique, algorithmique ainsi que « sciences du cerveau » – avaient fini par se rejoindre pour enfin cristalliser en un agencement matériel synthétisant tout à la fois leurs lois essentielles et leurs accomplissements fondamentaux. L'ordinateur à architecture Von Neumann rompait absolument avec tous les instruments de calcul numériques qui l'avaient historiquement précédé en même temps qu'il constituait, jusqu'à un certain point, le prolongement naturel et révolutionnaire de ces derniers. Il s'agissait d'une machine électronique digitale programmable *entièrement* automatique pourvue d'une unité de commande interne (C.U.) et dotée d'une mémoire altérable, laquelle était suffisamment étendue - entendre vaste - pour permettre le stockage simultané des algorithmes (représentant sous forme procédurale le problème devant être traité), ainsi que celui des données sur lesquelles ceux-ci étaient précisément appelés à opérer. Pourvu seulement qu'un schème de codage adéquat ait été préalablement déterminé puis implémenté, cet instrument capable de performances jusque-là jamais atteintes se trouvait donc en mesure d'effectuer des calculs (cela semble toutefois aller de soi), mais aussi, et plus largement, plus *universellement* devrions-nous plutôt dire, il pouvait traiter de l'information. Parce qu'automate universel à mémoire interne, parce que digital et électronique (donc reposant par essence sur une modalité de fonctionnement ne possédant que deux états exclusifs), parce que programmable, l'ordinateur n'était plus uniquement calculateur mais également – et surtout – machine à traiter de l'information (cette dernière catégorie incluant aussi les données mathématiques encodées, ce qui permet de comprendre pourquoi l'ordinateur est aussi, mais pas seulement, un calculateur). En ce sens d'ailleurs, et aussi étonnant que cela puisse peut-être paraître, il était finalement plus proche des machines de bureau du type de celles qui avaient été utilisées aux Etats-Unis dès 1890 dans le cadre du recensement décennal (les machines Hollerith ou

⁵²⁶ Ainsi les principes théoriques et les solutions techniques autour desquels l'E.N.I.A.C. avait été conçu étaient déjà « virtuellement » obsolètes au moment même où certaines de ses unités constitutives commençaient tout juste à être opérationnelles: la rédaction du *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.*, qui devait être progressivement diffusé dès le mois de juin 1945, fut entreprise à peu près à cette période.

Monroe opéraient en effet sur des données d'ordre divers – comme l'âge, le sexe, la profession, etc. – toutes encodées et enregistrées sur des cartes perforées), qu'il ne l'était finalement de la plupart des calculateurs mécaniques ou électromécaniques construits jusque-là (mais auquel il empruntait néanmoins, quand il ne s'agissait pas d'instruments analogiques, leur mode de fonctionnement digital). Reprenant certains des principes essentiels autour desquels ceux-ci avaient été bâtis ainsi que leurs opérations arithmétiques élémentaires (d'une manière toutefois renouvelée grâce à l'emploi massif de la technologie électronique), l'ordinateur devait les dépasser définitivement en tous points et, à terme, bouleverser notre monde.

La première informatique distinguée par Philippe Breton était donc essentiellement, quoique sa provenance souterraine ou ses origines profondes soient très largement antérieures à cette période, un « produit » scientifique, technologique, et surtout militaire, qui se constitua dans le cadre de l'effort de guerre principalement conduit par les américains au milieu du 20^{ème} siècle. C'est, nous l'avons assez dit – mais il demeure encore à démontrer comment - le second conflit mondial qui détermina tout à la fois l'apparition de l'ordinateur ainsi que son développement et son perfectionnement rapide. En conséquence, et dès lors que nous nous référerons à cette informatique fondatrice dans la perspective de son analyse, ou bien encore de celle de ses artefacts les plus représentatifs, nous emploierons indifféremment une des deux désignations suivantes : première informatique bien sûr, mais aussi informatique de guerre, l'une et l'autre, dans le contexte de la première moitié des années quarante, étant selon nous parfaitement équivalentes.

Le 2 mai 1945, à la suite des suicides d'Adolf Hitler et de Joseph P. Goebbels (tous deux survenus le 30 avril 1945), les armées allemandes d'Italie devaient déposer les armes. Six jours plus tard, c'était l'armée allemande dans sa totalité qui capitulait, signant ainsi la fin des hostilités entre les belligérants, tout du moins en Europe (il faudra attendre le 2 septembre pour que le Japon se rende enfin, après que les bombes nucléaires *Little Boy* et *Fat Man* aient été respectivement larguées sur les villes d'Hiroshima et de Nagasaki les 6 et 9 août 1945). La fin de la deuxième guerre mondiale ne devait pas pour autant entraîner une réduction de l'intérêt croissant (donc de l'engagement financier), qu'avaient porté durant ce conflit les gouvernements et les autorités militaires anglo-saxons aux toutes nouvelles machines digitales électroniques. Tout au contraire... Le nouvel ordre mondial dont les contours avaient été conjointement décidés en février 1945 à Yalta par le premier ministre britannique Winston Churchill, le président américain Franklin D. Roosevelt et le « petit père des peuples », le leader communiste Joseph Staline, promettait bien des tensions diplomatiques et militaires à

venir (n'oublions pas que la décision qui fut prise par Harry S. Truman de faire usage de l'arme atomique sur deux villes japonaises majeures six mois après que se fut tenue cette conférence historique l'avait été non seulement pour éviter un débarquement américain dans ce pays et accélérer la paix, mais également dans le but incident – mais stratégiquement et politiquement saillant – de faire forte impression sur les soviétiques). A peine l'affrontement planétaire terminé, à peine le creuset incandescent duquel le calculateur électronique digital avait tout juste surgi commençait-il à refroidir qu'un tournant théorique décisif annonçant l'aube d'une nouvelle ère toute aussi formidable, si ce n'est plus encore que celle qui l'avait précédée, devait pointer qui devrait concerner cette fois-ci non seulement cette machine prodigieuse et ses applications (qu'elles soient continuées, renouvelées ou totalement inédites), mais également, et plus largement, le monde entier.

A vrai dire, l'origine de l'impulsion déterminante qui devait finalement provoquer la mutation théorique radicale qui permit peu après la guerre l'avènement de l'ordinateur universel à programme interne est à rechercher, encore une fois, du côté des institutions militaires et universitaires américaines qui coopèrent durant le second conflit mondial⁵²⁷. Evoquant dans *The Computer from Pascal to Von Neumann*⁵²⁸ la correspondance personnelle soutenue qu'il entretint avec le scientifique et officier supérieur américain Leslie Earl Simon (second de Hermann H. Zornig au *Ballistic Research Laboratory*⁵²⁹, il devint par la suite directeur militaire de cet organisme jusqu'en 1949), Herman H. Goldstine (alors *Chief-Lieutenant* détaché au bureau de calcul que le B.R.L. avait installé pendant les premiers temps de la guerre à la Moore School), rapporte que vers la fin de l'année 1944 il se sentait « *assez confiant quant à notre capacité [id est la capacité des développeurs de l'E.N.I.A.C.] à faire d'ENIAC un système opérationnel complet et fiable et ce sans trop de délais*⁵³⁰ ». Au tout début du mois d'août 1945 il prévoyait également – de son aveu même de manière peut-être un peu optimiste – que l'E.N.I.A.C. serait fin prêt à fonctionner aux alentours du 1^{er} janvier 1945 (en fait l'E.N.I.A.C. fut effectivement opérationnel à la fin de 1945 puis dévoilé ensuite

⁵²⁷ A l'origine de ce rapprochement entre le gouvernement et les universités, et encore de son renforcement pendant la guerre, on retrouve Vannevar Bush, le « père » de l'analyseur différentiel. C'est lui qui, avec quelques collègues, convainquit Franklin D. Roosevelt du bénéfice certain qu'il y aurait pour une Amérique en passe d'entrer dans le conflit mondial de voir ses institutions de recherche de pointe et ses organismes militaires collaborer de façon soutenue. Avec ces mêmes collègues, il mit en place, dès 1940, le *National Defense Research Committee* (N.D.R.C.) puis, un peu plus tard, l'*Office of Scientific Research and Development* (O.S.R.D.). C'est cet organisme qui devait superviser et coordonner la plupart des gros travaux scientifiques et d'ingénierie entrepris pendant la guerre aux Etats-Unis.

⁵²⁸ [Goldstine, 1972], pp.184-185.

⁵²⁹ La *Research Division of the Proving Ground* d'Aberdeen (Maryland), fut renommée *Ballistic Research Laboratory* en 1938.

⁵³⁰ « *I began to feel quite confident of our ability to construct the entire ENIAC as a reliably operating system without too many delays* », *ibidem*, p. 184. La traduction qui figure dans le corps du texte est nôtre.

officiellement dans le courant du mois de février 1946). Cependant, et au moment même où H. H. Goldstine consignait ses prévisions pour le moins encourageantes quant à l'achèvement imminent de la construction de l'E.N.I.A.C., une procédure de réexamen général portant sur les caractéristiques opérationnelles de ce calculateur fut entreprise à la *Moore School*. Cette procédure de reconsidération fondamentale de la machine alors même que ses principaux modules constitutifs se trouvaient encore en phase d'élaboration, d'assemblage ou de test⁵³¹ eut pour conséquence tout à fait remarquable de révéler un certain nombre de problèmes sérieux parmi lesquels figuraient en bonne place le caractère particulièrement malcommode des dispositifs qui permettaient son paramétrage ainsi que le très faible nombre d'accumulateurs qu'elle comportait (ces mémoires électroniques de très faible capacité – chacune autorisait le stockage d'un nombre signé composé de 10 chiffres - étaient en effet au nombre de vingt). Se posait également le délicat problème du différentiel de vitesse de fonctionnement qui existait entre l'E.N.I.A.C. et ses unités d'entrée/sortie électromécaniques, à savoir un lecteur de cartes perforées I.B.M. permettant de lire quelques 120 cartes à la minute et un perforateur capable d'en « imprimer » une centaine dans le même intervalle de temps. En outre, pour que le contenu des cartes perforées qui lui étaient fournies puisse être exploité par l'E.N.I.A.C. et pour qu'il se trouve ensuite en mesure de retourner le résultat de ses calculs sur un support identique, donc réutilisable, il fut nécessaire de lui adjoindre un dispositif à relais, le *Constant Transmitter*, appelé à jouer le rôle d'interface de traduction entre la machine et ses unités périphériques d'I/O (les unes et les autres ne représentant pas de la même façon les données numériques à traiter et celles ayant été traitées). Cela, on le devine aisément, avait pour conséquence l'introduction d'un délai d'attente supplémentaire dans la chaîne du calcul. A partir de ce point bien entendu, et c'est bien là le constat qui ne manqua pas d'être fait à l'époque, on se trouve parfaitement en droit de s'interroger sur l'avantage véritable⁵³² qu'il pouvait y avoir à disposer d'un instrument à même de calculer à la vitesse de la lumière alors que le dispositif censé lui fournir les données sur lesquelles il devait opérer ainsi que celui lui permettant de rendre ses résultats intermédiaires ou terminaux étaient, toutes proportions gardées s'entend, extrêmement lents. Dans ces circonstances toutes particulières, il était parfaitement évident qu'en terme de temps de calcul, tout ce qui pouvait être effectivement gagné dans la partie « centrale » ou électronique du système (E.N.I.A.C.),

⁵³¹ Michael R. Williams, dans [Williams, 1997], p. 299, rapporte qu'au mois de juillet 1944, deux accumulateurs de l'E.N.I.A.C. avaient été complétés et testés avec succès.

⁵³² *A fortiori* lorsque l'on connaît l'envergure des investissements financiers qui furent consentis par le gouvernement américain pour la construction du projet PX, soit quelques 486804,22 dollars de l'époque.

devait obligatoirement être perdu à l'une et l'autre de ses « extrémités » (périphériques d'entrée/sortie électromécaniques et *Constant Transmitter*).

L'ensemble des imperfections matérielles et surtout conceptuelles qui furent mises en lumière à l'occasion de cette investigation de fond permet de saisir les raisons profondes pour lesquelles l'E.N.I.A.C., finalement, « peinait » à être un instrument de calcul scientifique véritablement générique (*general-purpose scientific calculator*). Dans le mémorandum qu'il adressa le 11 août 1944 (date qui correspond *grosso modo* à la période à laquelle John Von Neumann commença à multiplier ses visites à la *Moore School of Electrical Engineering*⁵³³), au Major Général L. E. Simon (B.R.L.), H. H. Goldstine, soulignant ces différents points, faisait le compte-rendu suivant :

« 2. *Due however to the necessity for providing the ENIAC in a year and a half it has been necessary to accept certain make-shift solutions of design problems, notably in the means of establishing connections between units to carry out given procedures and in the paucity of high speed storage devices. These defects will result in considerable inconvenience and loss of time to the Laboratory [i.e. le Ballistic Research Laboratory] in setting up new computing problems.*

3. *It is believed highly desirable that a new RAD [i.e. Research & Development] contract be entered into with the Moore School to permit that institution to continue research and development with the objet of building ultimately a new ENIAC of improved design*⁵³⁴... »

Cet extrait de note de service, à plus d'un titre, se révèle pour nous extrêmement intéressant. En premier lieu, le paragraphe 2 expose clairement, quoique de manière il est vrai succincte, les raisons pour lesquelles certains expédients théoriques et techniques (*make-shift solutions*) – desquels devaient forcément s'ensuivre les imperfections nombreuses de l'E.N.I.A.C. – furent retenus et mis en œuvre pour construire ce calculateur électronique (ce sont les dispositifs au moyen desquels il devait être programmé, câbles et interrupteurs (*switches*), donc plus largement l'architecture matérielle du système, qui sont tout particulièrement remis en cause ici). La guerre, et donc les délais très brefs de recherche et de

⁵³³ Il semblerait que le jour où John Von Neumann vit effectivement l'E.N.I.A.C. pour la première fois soit le 7 août 1944. Mais ce fait n'est pas avéré historiquement. Même Herman H. Goldstine, qui introduisit pourtant J. Von Neumann au sein du projet PX n'a jamais été en mesure de certifier absolument l'exactitude de cette date (il se remettait alors d'une sérieuse affection hépatique). Selon toutes vraisemblances, c'est néanmoins autour du 7 août – à quelques jours près - que J. Von Neumann effectua de toute façon sa première visite à la Moore School.

⁵³⁴ Mémorandum, Herman H. Goldstine à Leslie E. Simon, *Further Research and Development on ENIAC*, daté du 11 août 1944. Partiellement reproduit dans [Goldstine, 1972], p. 185.

développement qui avaient été imposés à l'équipe de la *Moore School* pour concevoir et réaliser cette machine, en étaient partiellement – mais aussi largement - responsables. Notons que Goldstine fait également mention dans ce texte de la pénurie (*paucity*) de composants électroniques à laquelle durent faire face les membres du team E.N.I.A.C. alors même qu'ils construisaient dans des circonstances particulièrement éprouvantes un dispositif absolument nécessaire à la poursuite de l'effort de guerre. Bien qu'assez onéreux, les composants électroniques, notamment les tubes à vides, continuèrent néanmoins à être produits en masse pendant toute la durée du conflit. Mais il doit être noté que l'E.N.I.A.C. (qui une fois complété devait contenir quelques 18000 tubes à vide⁵³⁵ de 16 types différents ainsi que 70000 résistances et 10000 capacités), n'était pas alors le seul et unique destinataire de cette production. Le domaine naissant du calcul digital électronique se trouva ainsi d'emblée placé dans un rapport de concurrence directe avec d'autres domaines cruciaux de la recherche militaire, eux aussi grands consommateurs de ce type de ressources (on pense notamment au secteur de la transmission radio et à celui de la détection par radar). D'où la pénurie de composants électronique dont parle Goldstine. Plus importante peut-être, et comme conséquence attendue et évidente de tout ce qui précède, est l'assertion formulée immédiatement après par le rédacteur. Herman H. Goldstine déclare en effet que : «... *les imperfections [ou défauts] dont il vient d'être fait état entraîneront un désagrément et une perte de temps considérables dès lors qu'il s'agira pour le laboratoire de paramétrer la machine en vue de résoudre de nouveaux problèmes*⁵³⁶».

Cette dernière affirmation permet tout d'abord de comprendre que très précocement, alors même que le projet PX avait été secrètement démarré le 31 mai 1943 et que nombre de ses unités étaient encore simplement en phase de développement, l'équipe de la *Moore School* avait déjà envisagé le fait que l'E.N.I.A.C. pourrait très vraisemblablement être employé à des tâches calculatoires différentes de celles impliquées par la résolution des équations différentielles totales relevant de la balistique. Parallèlement à cela, il semble aussi tout à fait patent que les membres de l'équipe de développement de l'E.N.I.A.C. s'étaient rendu compte que le design qui avait été précipitamment défini et retenu pour sa fabrication constituait d'emblée un obstacle sérieux - mais non pas indépassable dans l'absolu puisqu'il est seulement question ici de désagrément (*inconvenience*) et de perte de temps (*loss of time*) - à

⁵³⁵ Initialement, il avait été prévu qu'il en contiendrait « seulement » 5000. Un tube commun de type 6SN7 coûtait à peu près 0.50 dollar de l'époque tandis que ceux qui étaient utilisés pour les répéteurs des lignes téléphoniques sous-marines coûtaient plus de 100 dollars pièce, ce qui était bien entendu rédhibitoire dans le cadre d'un projet de cette envergure.

⁵³⁶ Nous traduisons.

l'actualisation de cette potentialité. C'était là, à n'en point douter et comme en négatif, une sorte de prise de conscience qui représentait déjà un premier pas informel en direction de ce qui deviendrait à peine un an après – tout du moins sur le plan purement *théorique* - l'ordinateur électronique. Deuxièmement, et concernant les *nouveaux* problèmes mathématiques que le (futur) collaborateur de John Von Neumann évoque en ne fournissant cependant guère plus de précisions, qu'il nous soit permis maintenant, avant d'y revenir ensuite plus longuement, de produire quelques indications. Par «*setting up new computing problems* » on peut en effet entendre au moins deux choses différentes. Par exemple, le fait consistant à calculer successivement deux tables balistiques pour deux modèles d'armes différents implique déjà que l'on ait affaire à deux problèmes mathématiques quelque peu distincts (donc dans une certaine mesure « nouveaux »), au moins du point de vue des variables et de l'ordre des séquences d'opérations qu'ils font respectivement intervenir. Au meilleur des cas il sera par conséquent nécessaire, avec tous les désagréments que cela suppose forcément, de reprogrammer en partie le calculateur (*i.e.* de reconfigurer partiellement le câblage et les *switches* des unités de la machine), afin de pouvoir les résoudre. Ensuite, et c'est là incontestablement ce que Goldstine a en tête lorsqu'il rédige ce mémorandum à l'endroit de Simon, il peut également s'agir de problèmes qui n'ont plus grand chose à voir avec ceux ordinairement envisagés. On sait bien évidemment que l'E.N.I.A.C. était dès l'origine destiné à entrer en opération au *Ballistic Research Laboratory* d'Aberdeen. On sait également que les différents types de calculs exécutés au sein de cet organisme de recherche militaire étaient directement liés aux champs applicatifs suivants :

- Calcul de tables de tir pour l'artillerie de campagne et la défense antiaérienne.
- Tables de bombardement.
- Tables de tir pour les aéronefs (engagement aérien ou attaque au sol).
- Calculs divers et majeurs ...

Bien qu'effectivement dissemblables en fait, les trois premières catégories susmentionnées supposaient néanmoins la résolution de problèmes participant d'une même classe mathématique. Il s'agissait dans tous les cas de procéder au calcul d'un ensemble de trajectoires optimales (finalement fourni à l'opérateur sous une forme tabulaire ou encore sous celle d'un automate d'assistance à la visée couplé à l'engin lanceur ou porteur), pour un certain type de projectiles mis en œuvre à partir de vecteurs terrestres ou aériens, en prenant

minutieusement en compte la variance d'une multitude de facteurs différents mais tous dépendants (à l'exception toutefois de la variable temporelle). Les expressions mathématiques qui devaient être résolues dans ce but précis (à savoir fournir, pourvu que soient donnés sa position et sa vélocité initiales, une description formelle du comportement dynamique d'un projectile militaire en fonction du temps), ressortissaient toutes à un même type fondamental: c'était en effet des équations différentielles totales (ou ordinaires). Or les problèmes de cette nature, qui en tout premier lieu intéressaient non seulement les balisticiens mais aussi les ingénieurs en électricité, étaient tous susceptibles de faire « aisément » l'objet d'un traitement numérique. Des techniques mathématiques de cet ordre existaient en effet depuis longtemps – elles remontaient entre autres choses aux recherches qui avaient été menées au 18^{ème} siècle par le mathématicien suisse Leonhard Euler ainsi qu'à celles qu'avait faites l'astronome britannique John C. Adams au 19^{ème} - qui permettaient de s'affranchir de cette tâche de manière quasiment routinière. Il ne s'agissait donc pas, à proprement parler, de nouveaux problèmes. Demeure alors à considérer ce que nous avons appelé de manière un peu énigmatique, et en reprenant la formule employée par Goldstine⁵³⁷, les « calculs divers et majeurs ». Parvenus à ce point et pour bien comprendre ce dont il est question ici, il est important de se remémorer tout d'abord que le lieutenant Goldstine, depuis la fin du mois de septembre 1942, était en charge de la subdivision calcul que le *Ballistic Research Laboratory* avait installée à la *Moore School* au début de la guerre. A ce titre, et puisqu'il était également un mathématicien confirmé, il n'est donc pas exclu qu'il ait été au courant, au moins partiellement, de la nature de la plupart des travaux qui étaient conduits à cette époque au sein de cette institution (qu'il avait par ailleurs intégrée dans le cadre du service actif le 7 août de la même année). D'autre part il convient également de se souvenir que John Von Neumann avait dès l'année 1940 rejoint le B.R.L. en tant que membre de son comité de consultation scientifique. Ajoutons à cela que le même John Von Neumann, en 1943, était devenu consultant scientifique au *Los Alamos Scientific Laboratory (Atomic Energy Commission* ou A.E.C.). Dans le cadre hautement confidentiel du projet Manhattan (c'est-à-dire du projet PY qui avait pour objectif la mise au point de la bombe A), c'est lui qui devait démontrer aux théoriciens de Los Alamos comment modéliser mathématiquement une réaction en chaîne nucléaire artificiellement amorcée au cœur d'une petite sphère d'uranium enrichi (U^{235}) ou de

⁵³⁷ Concernant certains des travaux de calcul effectués au B.R.L., Goldstine parle en effet de « *Miscellaneous Major Computations* » à la page 166 de [Goldstine, 1972].

plutonium (Pu^{239})⁵³⁸. Pour ce faire, une petite quantité de matière fissile devait être très rapidement amenée à la masse critique par compression violente grâce à une implosion de substance explosive conventionnelle générant de façon contrôlée une onde de choc sphérique⁵³⁹ et uniforme extrêmement puissante⁵⁴⁰. Ce sont Seth Neddermeyer, Edward Teller, James L. Tuck et John Von Neumann qui proposèrent ce schéma d'amorçage de la réaction en chaîne. C'est encore Von Neumann qui montra aux gens du L.A.S.L. comment résoudre par la méthode numérique le volume considérable de calculs compliqués que la description et le contrôle de ce phénomène impliquait. Notons qu'à cette occasion un centre de calcul électromécanique⁵⁴¹ – qui était alors le plus important de la planète – fut organisé au laboratoire scientifique de Los Alamos selon le schème tayloriste de la parcellisation et du chaînage du travail⁵⁴². Au delà des seuls faits historiques, dont le caractère absolument essentiel est bien entendu incontestable pour une histoire de l'informatique en train de se faire, se dessine quelque chose d'encore plus principal. Parmi les nombreux centres d'intérêt professionnels que nourrissait à cette époque John Von Neumann, c'est là chose de notoriété publique, figurait tout spécialement les questions ressortissant aux mathématiques appliquées. Au sein de celles-ci, il portait en outre une attention toute particulière aux problèmes relevant de la mécanique des fluides (mécanique des corps liquides et gazeux). Bien que les principales difficultés mathématiques inhérentes à ce champ aient été déjà identifiées depuis un certain temps – au moins depuis les travaux en hydrodynamique effectués par Osborne Reynolds ou John W. S. Rayleigh – ceci ne signifiait pas pour autant qu'elles aient commencé à être levées. En vérité, les outils de résolution que proposait alors l'analyse se révélaient presque totalement inefficaces dès lors qu'il s'agissait de résoudre avec un certain degré de précision les équations différentielles partielles non linéaires qu'impliquait entre autres champs de recherche scientifique – mais on aurait tout aussi bien pu évoquer ici l'aérodynamique, la mécanique ondulatoire ou la prévision météorologique par exemple - la

⁵³⁸ Pour élaborer une bombe atomique, il est nécessaire de disposer d'au moins cinq kilogrammes de l'un ou l'autre de ces isotopes.

⁵³⁹ Au tout début de la guerre, Von Neumann, avec les professeurs Valentine Bargmann et Deane Montgomery, avait entrepris à l'*Institute for Advanced Study* de l'Université de Princeton des travaux en hydrodynamique conduits selon l'approche numérique. Un certain nombre de rapports sur les ondes de chocs furent rédigés à cette occasion entre 1942 et 1945.

⁵⁴⁰ Une autre approche qui fut également envisagée mais ne fut cependant pas retenue consistait cette fois à projeter simultanément l'une contre l'autre, toujours au moyen d'un explosif conventionnel, deux hémisphères de matériau nucléaire de masse sous critique. De leur réunion brutale devait résulter une sphère de masse critique, ce qui permettait ainsi d'amorcer une réaction en chaîne.

⁵⁴¹ Des machines électromécaniques Merchant furent tout d'abord utilisées à cette fin. Elles devaient être assez vite remplacées par des dispositifs mécanographiques I.B.M., plus performants.

⁵⁴² Cette idée remarquablement innovante était due à Stanley Phillips Frankel, un des deux physiciens de la *Theoretical Physics Division* du L.A.S.L. qui devait partager l'insigne honneur, avec Nicholas Metropolis, de « soumettre » à l'E.N.I.A.C. son premier véritable problème.

mécanique des fluides (ce constat pouvant par ailleurs être globalement étendu à tous les types de problèmes mathématiques exhibant un comportement non linéaire). Avant et pendant la deuxième guerre mondiale, le physicien britannique Douglas R. Hartree avait essayé, avec quelques-uns de ses collègues et étudiants, de résoudre des systèmes d'équations différentielles partielles en se servant de l'analyseur différentiel dont disposait l'Université de Manchester (une machine demeurée fameuse depuis puisque, assez incroyablement, D. R. Hartree et A. Porter l'avaient fabriquée en utilisant principalement des pièces de Meccano !). Sûrement une des premières tentatives, si ce n'est même la première, ayant consisté à s'attaquer à des problèmes complexes d'ingénierie et de physique par des moyens autres que ceux habituellement rencontrés dans le cadre de la méthode expérimentale, l'effort entrepris par Hartree ne fut finalement guère couronné de succès. S'il parvint effectivement à quelques résultats encourageants avec les équations différentielles partielles de type parabolique (qu'exemplifie notamment le problème de la conduction de la chaleur), il achoppa néanmoins sur la résolution des équations différentielles partielles de type elliptique et hyperbolique (qui peuvent être respectivement typifiées par le problème du potentiel électrique d'une surface et celui de la pression, de la température et de la densité de l'air au voisinage et en chaque point des surfaces porteuses d'un avion). Nous avons déjà vu que lorsque l'on résout numériquement (au moyen d'une machine ou encore à la main), un problème mathématique impliquant des équations différentielles partielles ou totales, il s'avère en fait que la solution à laquelle on parvient finalement n'est pas celle, véritable, correspondant exactement au problème tel qu'il a pu être énoncé au départ. Cette solution correspond en réalité à celle d'un problème qui est voisin de celui qui a été initialement posé. De ce fait, et bien qu'elle puisse constituer par là une (très) proche approximation du résultat du problème original, elle ne peut être considérée comme étant sa *vraie* solution. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'opération de différenciation et son inverse, celle d'intégration, représentent des opérations « transcendantes » pour les calculateurs. Par l'adjectif « transcendantes », entendu évidemment ici au sens mathématique et non métaphysique du terme, il faut comprendre que de telles opérations ne peuvent être d'emblée et uniquement définies au moyen des opérations élémentaires qui sont celles de l'arithmétique. Or, comme tout un chacun ne manque sûrement pas de le savoir, il s'avère que l'addition, la soustraction, la multiplication et la division – autrement dit les opérations arithmétiques fondamentales - sont les seules et uniques fonctions dont sont communément capables les calculateurs numériques. Pour le domaine du calcul artificiel ceci entraîne une conséquence tout aussi remarquable qu'elle peut être incontournable. Ainsi, pour prétendre solutionner par l'approche numérique n'importe quel

problème comportant des opérations ou des fonctions transcendantes (comme le sont les fonctions logarithmiques ou exponentielles par exemple), il sera préalablement nécessaire de substituer à celles-ci des expressions approximantes formulées dans les termes de ces opérations basiques, autrement dit les seules qui puissent directement faire l'objet d'une manipulation par les machines. Dans tous les cas de figure, et étant donné l'obligation dans laquelle se trouvent le mathématicien, le physicien ou l'ingénieur de reformuler ou, si l'on préfère, de traduire de la sorte les composantes fondamentales du problème en cours pour que celui-ci puisse seulement faire l'objet d'une évaluation machinale chiffrée, le degré d'exactitude du résultat qui sera finalement obtenu ne pourra en aucun cas être considéré comme étant parfaitement équivalent à celui du problème originalement posé (et ce bien qu'une pareille approximation puisse se révéler tout à fait satisfaisante en fonction des objectifs spécifiquement poursuivis). D'une certaine façon donc, et au moins pour ce qui est de ce secteur de la sphère de la mathématique, le vieil aphorisme transalpin qui affirme que « *traduttore, traditore* » ne perd en rien de son autorité...

A la mention de ce problème crucial de perte de précision, il convient d'ajouter celle du phénomène connu sous le nom de problème de la stabilité numérique d'une solution (ou « condition de Courant »). Demeuré relativement ignoré jusqu'à la moitié des années quarante, ce dernier, pourtant, avait été découvert puis analysé dans un article publié par Richard Courant, Kurt Friedrichs et Hans Lewy⁵⁴³ dans les années 1928-1929. Dans ce papier les trois scientifiques avaient démontré que l'opération consistant à remplacer une équation différentielle par un ensemble correspondant d'approximations formulées dans les termes des opérations élémentaires de l'algèbre était susceptible de conduire à l'obtention d'un résultat qui pouvait n'avoir plus aucune relation avec celui de l'expression mathématique initialement considérée (et ce malgré toutes les précautions et tout le soin qui pouvaient bien avoir été pris pour procéder à la détermination de ces formules de substitution). Une expression algébrique, on le sait, « *est le résultat obtenu en faisant subir à des variables et des nombres réels des additions, des soustractions, des multiplications, des divisions, en les élevant à des puissances ou en extrayant des racines*⁵⁴⁴ ».

Dès lors que l'on remplace - et c'est là chose plus que fréquemment obligée tant en science qu'en ingénierie - dans une expression algébrique quelconque les littéraux (a, b, c, \dots, z) qu'elle peut bien comprendre par des valeurs réelles (qui peuvent donc être des nombres

⁵⁴³ R. Courant, K. Friedrichs et H. Lewy, « *Über die partiellen Differenzgleichungen der Physik* », (« *Sur les équations différentielles partielles de la physique* »), *Math. Ann.*, vol. 100 (1928-29), pp. 32-74.

⁵⁴⁴ In [Swokowski et Cole, 1997], p. 28.

rationnels, irrationnels, des relatifs, etc.), on se trouve alors en mesure de traiter cette expression numériquement en vue d'obtenir un résultat quantifié, autrement dit une valeur terminale chiffrée susceptible d'être exploitée. Or il se trouve que ce genre de processus, en apparence trivial et intuitif, est loin d'aller autant de soi qu'il serait peut-être permis de le supposer en premier examen. Cet état de fait surprenant, qui concerne en vérité *la totalité du domaine du calcul numérique*, peut être vérifié en considérant successivement deux cas de figure très simples impliquant tout d'abord l'opération de multiplication puis celle de division.

Lorsque l'on multiplie deux nombres a et b très grands ou très petits, le résultat final que l'on obtient, appelé *produit*, est susceptible d'être entaché d'erreur dans certaines conditions. Si, pour illustrer ceci, on convient de se donner deux nombres entiers a et b exprimés en base décimale tels que $a = b = 11111111$, et que l'on calcule ensuite à la main le produit de a par b (ou, ce qui revient ici au même, que l'on effectue $b \times a$, a^2 , ou b^2), on parviendra au résultat suivant : $a \times b = 123\ 456\ 787\ 654\ 321$ (pourvu seulement que l'on se montre un tant soit peu vigilant pendant l'exécution des multiples pas que nécessite ce calcul). Bien qu'ici a et b , qui sont posés comme étant égaux pour les besoins de la démonstration, ne soient pas des nombres excessivement grands, on nous accordera facilement que leur produit, lui, l'est incontestablement. Maintenant, si nous choisissons de confier l'exécution de ce calcul relativement élémentaire à une petite machine de poche, le résultat auquel nous parviendrons, exprimé sous la forme⁵⁴⁵ $x = c \times b^e$, sera en général⁵⁴⁶ égal à 1.2345×10^{14} . En

⁵⁴⁵ Cette manière de représenter les nombres est appelée notation en virgule flottante (elle est également nommée notation scientifique). Le symbole x représente la valeur réelle devant être exprimée en virgule flottante. Le symbole b correspond à la base numérique utilisée (ici il s'agit de la base 10) ; c , la mantisse, est un réel tel que $1 \leq c < 10$, et e , un entier relatif, est l'exposant. Ainsi, si $x = 515$, la notation scientifique correspondante sera $515 = 5.15 \times 10^2$ ou 0.515×10^3 par exemple. Si $x = 0.000648$, alors 0.000648 sera représenté au moyen de l'expression 6.48×10^{-4} ou encore 0.648×10^{-3} ... La notation en virgule flottante employée en informatique diffère quelque peu de ceci car elle est normalisée : à cette fin tous les chiffres significatifs sont positionnés à droite de la virgule, étant bien entendu qu'il existe une règle de construction qui stipule que le premier chiffre après la virgule ne doit jamais être un zéro (cette dernière valeur n'étant pas considérée comme significative). Une expression telle que 0.06×10^4 devra par conséquent faire l'objet d'une normalisation. A l'issue de ce processus, la représentation finalement obtenue sera donc 0.6×10^3 (tous les chiffres significatifs se trouvent à droite de la virgule et le premier chiffre rencontré à droite de la virgule n'est pas un zéro). Puisque tout, dans un ordinateur, est en raison dernière représenté en binaire, le premier chiffre que l'on trouvera nécessairement à droite de la virgule dans une expression en notation flottante normalisée sera un 1.

⁵⁴⁶ La précision du résultat final varie bien sûr en fonction du type de la machine qui est utilisée pour réaliser le calcul. Avec une calculatrice scientifique Casio *fx-7000G* par exemple, on a $a \times b = 11111111^2 = 1.234568 \cdot 10^{14}$, ce qui diffère assez nettement du résultat fourni par une petite calculatrice courante (1.2345×10^{14}). Un instrument de ce genre est bien sûr beaucoup moins performant (et moins cher aussi), qu'une calculatrice scientifique. Les différentes fonctions mathématiques qu'il propose à l'utilisateur sont généralement réduites au strict minimum (« + », « - », « / », « x », « = ») et surtout sa mémoire interne est très peu importante. Or c'est bien ce paramètre crucial qui détermine l'intervalle des nombres pouvant être représentés en machine de la même manière qu'il fixe le niveau de précision avec lequel celle-ci retourne ses résultats. Si un nombre x quelconque se trouve exprimé en notation flottante, (soit $x = c \times b^e$, avec $b = 10$ et c tel que $1 \leq c < 10$), et si c est arrondi à s décimales près, on dira alors que x est arrondi à s chiffres significatifs (notons que lorsque la première décimale négligée est supérieure à 5, on ajoute normalement la valeur 1 à la dernière décimale

examinant ces deux résultats de façon circonstanciée, nous n'aurons aucune difficulté à nous apercevoir qu'en fait, ils diffèrent largement l'un de l'autre. En effet, $1.2345 \times 10^{14} = 123\,450\,000\,000\,000$. Or, on le voit bien, cette valeur n'est en aucune manière égale à la quantité antérieurement calculée à la main, à savoir $123\,456\,787\,654\,321$. Si l'on pose que X correspond à la quantité devant être calculée (et dont on connaît la valeur dans ce cas précis pour avoir nous-mêmes effectué ce calcul), et que X^* représente la valeur effectivement calculée par la machine, alors l'effectuation de la soustraction $|X - X^*|$ nous permettra de connaître la valeur de l'erreur absolue E survenue pendant le calcul. La quantité à calculer, X , est ici égale au produit de a par b , c'est-à-dire 11111111^2 , élévation au carré de a ou bien encore de b qui est, nous le savons, égale à $123\,456\,787\,654\,321$. La valeur calculée, X^* , est quant à elle égale à 1.2345×10^{14} , ce qui, une fois développé, donne $123\,450\,000\,000\,000$. Dans le présent cas, l'erreur absolue E est donc égale à $|X - X^*| = |123\,456\,787\,654\,321 - 123\,450\,000\,000\,000| = |6\,787\,654\,321|$, soit $6\,787\,654\,321$. Cette erreur peut sans conteste être considérée comme gigantesque puisqu'elle est de l'ordre de 6×10^9 . Pourtant l'exemple que nous avons considéré n'impliquait qu'un nombre fini d'opérations (en vérité il ne s'agissait d'effectuer qu'une seule multiplication), tandis que les valeurs entières du multiplicande et du multiplicateur, bien déterminées et identiques, étaient « légèrement » supérieures à onze millions... Si nous nous intéressons maintenant à l'opération de division, nous verrons qu'un phénomène identique se produit parfois. Soit deux entiers positifs e et f tels que $e = 1$ et $f = 3$. En supposant que e soit le numérateur et f le dénominateur, le résultat du calcul de la fraction e sur f - indifféremment effectué à la main ou au moyen d'une machine à calculer courante - sera un nombre rationnel r à développement décimal infini et périodique⁵⁴⁷ :

$$r = \frac{1}{3} = 0.3333333333\dots$$

Par ailleurs, et algébriquement, on sait que :

conservée). Dans le cas de la petite calculatrice, et pour $x = 123\,456\,787\,654\,321$, x a été arrondi à 5 chiffres significatifs (en fait x a été purement et simplement tronqué car la machine n'a pas porté la cinquième décimale retenue à la valeur entière supérieure alors que la première décimale négligée, 6, était supérieure à 5). Avec la calculatrice scientifique (1.234568×10^{14}), cet arrondi a été fait à 7 chiffres significatifs et le dernier d'entre eux a été incrémenté d'une unité puisque la première décimale négligée, 7, était supérieure à 5. Cette dernière machine, donc, offre un degré de précision plus important que la première que nous avons considéré. Mais ceci ne signifie pas pour autant que le résultat qu'elle fournit soit parfaitement exact

⁵⁴⁷ Puisque pour $a \neq 0$ on a $\frac{1}{a} = a^{-1}$, le même résultat sera obtenu si l'on calcule f^{-1} , c'est-à-dire 3^{-1} .

$$\frac{e}{f} = r, \text{ de quoi on peut très facilement déduire que } e = r \times f.$$

Or si l'on multiplie la valeur de r par celle de f , (*i.e.* $0.3333333333... \times 3$), on n'obtiendra pas exactement, comme on le devrait, la valeur du numérateur e , c'est-à-dire 1, mais une valeur e' très approchante qui sera égale à $0.9999999999...$. Cet écart – ou plutôt cette erreur – bien entendu, est d'ordre infinitésimal puisque $E = 1 - 0.9999999999 = 0.0000000001$, soit 1×10^{-11} . Quel qu'infime que puisse être effectivement cet écart, il existe bel et bien, et cette existence même implique que le résultat du calcul qui a été exécuté n'est pas rigoureusement exact. Dans l'absolu donc, et malgré son caractère extrêmement minimal, une pareille erreur ne saurait véritablement être tenue pour insignifiante ou négligeable.

Lorsque nous effectuons nous-mêmes un calcul de ce genre, ou bien encore quand nous en confions l'exécution à une machine, ce qui se passe en vérité est que nous – ou la machine – le réalisons en ne prenant en compte qu'un certain nombre fixe ou fini de chiffres significatifs (que nous estimons par conséquent être suffisants pour mener à bien ce calcul en fonction de l'objectif que nous poursuivons). Si par exemple nous souhaitons déterminer quelle est l'aire d'un cercle C de rayon R tel que $R = 2$, il nous sera nécessaire de recourir à la formule $A = \pi \times R^2$. Or π , on le sait, est un nombre irrationnel, autrement dit son développement décimal est à la fois *infini* et *apériodique*. Pour être en mesure de calculer la valeur numérique de l'aire A , nous serons donc contraints d'utiliser une approximation de π , l'usage de cette valeur elle-même nous étant absolument interdit puisque π est un irrationnel. Si nous décidons alors de fixer à n le nombre de décimales significatives que nous emploierons pour spécifier la valeur de π , nous obtiendrons, après avoir multiplié cette dernière par R^2 , une certaine valeur numérique correspondant à l'aire du cercle considéré et dont le degré de précision ou d'exactitude sera déterminé par la valeur de n (si $n = 2$, la valeur approchée de π sera égale à 3.14 et A vaudra par conséquent 12.56. Si $n = 4$, la valeur approchée de π sera égale à 3.1415 et A vaudra alors 12.566, etc.). En fonction de la valeur entière qui sera retenue pour définir n , la valeur du résultat que nous obtiendrons en résolvant l'identité $A = \pi \times R^2$ différera donc sensiblement jusqu'à ce que soient atteintes les limites de la machine. Il est cependant évident que là où l'écolier peut généralement se satisfaire d'une valeur approchée de π telle que $\pi = 3.1415$, il en va tout autrement avec le mathématicien ou l'ingénieur (bien qu'une détermination de π à un million de décimales par exemple demeure encore une approximation). Bien entendu, et étant donné que π est un nombre irrationnel, il se peut parfaitement que l'on en vienne à supposer que l'exemple que nous avons choisi de

présenter à titre illustratif ne représente après tout qu'une situation « marginale » et que la nécessité qui peut être faite de procéder à de pareilles approximations ne survient seulement qu'en de rares occasions (celles impliquant π , e , ou $\sqrt{2}$ par exemple). Une pareille supposition, pourtant, est erronée. Lorsque nous calculons une fraction, il arrive quelquefois que le résultat auquel nous parvenons soit un nombre entier. Dans ce cas précis, effectivement, la question de l'approximation n'a pas lieu d'être posée. Mais il arrive fréquemment aussi que la résolution d'un quotient donne lieu à l'obtention d'un nombre rationnel dont le développement décimal peut être *fini* ou *infini* et *périodique* (c'était précisément le cas avec le quotient de 1 sur 3). Or le fait qu'un développement décimal puisse être *fini* ne signifie pas nécessairement qu'il soit *petit*. On peut ainsi légitimement et facilement imaginer que le résultat numérique d'une fraction nécessite, pour être représenté exactement et complètement, que l'on fasse par exemple figurer 27 décimales après la virgule. L'usage d'une semblable représentation numérique ne se situe pas hors de notre portée. Mais chacun s'accordera sans doute à reconnaître que sa manipulation recommencée sera extrêmement malcommode et qu'en raison même de cela, elle constituera en permanence une source potentielle d'erreurs pour le calculateur. Pareillement se pose la question de savoir jusqu'où il convient d'aller – autrement dit de combien de décimales il est nécessaire de tenir compte après la virgule pour parvenir à un résultat pouvant être considéré comme acceptable - lorsque l'on est conduit à travailler avec des nombres réels dont les parties décimales sont infinies et périodiques. Le même phénomène, notons-le, sera parfaitement susceptible de se produire dans le cas où l'on multiplierait une ou plusieurs fois deux nombres très petits ou très grands.

Sauf exception notable les êtres humains sont en général très loin d'être des calculateurs parfaits. Nos capacités de mémorisation et d'attention sont en effet fort limitées et les tâches calculatoires impliquant la répétition mécanique d'opérations faisant intervenir de grands nombres ou de petits nombres, quant elles n'en viennent pas tout simplement à bout, les soumettent de toute façon à rude épreuve. Pour ces raisons d'ordre essentiellement pratique l'homme s'est efforcé de construire des dispositifs artificiels qui devaient, si ce n'est lui permettre de s'affranchir complètement de ce genre de « corvées », au moins le seconder efficacement dans leur exécution. Mais ces machines, quel que puisse être par ailleurs le type technique auquel elles appartiennent, ne sont pas, à l'instar de leurs concepteurs, des calculateurs idéaux. Si l'ordinateur constitue aujourd'hui un instrument formidablement rapide, fiable, précis et performant qui - au delà de toute espérance - étend nombre de nos aptitudes spécifiques et démultiplie par là même notre capacité d'emprise sur le monde, il n'en demeure pas moins que lui aussi commet parfois des erreurs de calcul. Ceci tient

fondamentalement au fait que les quantités qui sont traitées par les ordinateurs sont représentées en machine de façon discrète, ce qui implique qu'elles le sont de manière finie. Grossièrement, on pourrait dire que l'amplitude de cette limitation est commandée par la taille de la mémoire dont dispose l'ordinateur. Le degré de précision que la machine sera par conséquent susceptible d'atteindre, même s'il est de loin plus important que celui auquel nous pourrions jamais nous-mêmes prétendre lorsque nous calculons à la main, sera ainsi inévitablement conditionné par la dimension finie de cette mémoire et par la ou les méthodes mathématiques, elles aussi sources d'erreur, qui auront été retenues afin de représenter les nombres et effectuer les calculs. Hormis dans les cas les plus simples, et puisque les computations sont ici aussi réalisées en ne tenant compte que d'un certain nombre n de chiffres significatifs qui dépend ultimement de l'étendue de la mémoire de l'ordinateur, il sera par conséquent nécessaire de recourir à des approximations pour représenter non seulement les quantités devant être calculées mais également pour représenter les résultats de ces opérations. Si sophistiqué et rapide qu'il puisse être, un calculateur ne peut par conséquent fournir que des résultats approchant aux calculs qui lui sont soumis. A partir de là, et si un calcul numérique implique un nombre peu élevé de multiplications et/ou de divisions, on pourra supposer que la taille de l'erreur affectant éventuellement le résultat final sera moindre et que celui-ci pourra de ce fait même être considéré comme légitimement recevable. En revanche, si un problème nécessite que l'on effectue un nombre important d'opérations élémentaires de ce type, des erreurs d'arrondi surviendront forcément pendant ce processus qui auront tendance à s'accumuler avec le temps. Or le cumul de ces erreurs de troncation ou d'approximation par arrondi des valeurs manipulées par la machine peut parfois atteindre une envergure telle que la validité du résultat final du calcul est susceptible de se voir sérieusement mise en doute. L'impact réel que peut avoir cette erreur est généralement réduit mais il n'est pas pour autant négligeable : dans certains cas importants, il doit être absolument pris en compte dans l'analyse des résultats produits par la machine car une utilisation irréfléchie de ces derniers pourrait s'avérer coûteuse, si ce n'est réellement dramatique. Répétons-le encore, le phénomène que nous venons de décrire intéresse le champ du calcul numérique dans sa totalité et non pas seulement le sous-ensemble de ce domaine qui est plus spécifiquement concerné par la résolution d'expressions mathématiques dans lesquelles des formules approximées sont employées (ainsi par exemple, parvenir à résoudre numériquement un système d'équations linéaires – qui n'implique pourtant qu'un nombre fini d'opérations élémentaires pour une machine digitale – n'est pas chose triviale). Le problème de la résolution d'expressions mathématiques de type transcendant est une chose et celui de

l'arrondi ou de la troncation en calcul numérique en est une autre, mais tous deux, de toute façon, finissent irrésistiblement par converger pour venir finalement se « superposer » dès lors qu'il s'agit de tenter d'apporter une solution aux premières au moyen de l'approche numérique, qu'elle soit ou non mécanisée. Il s'agit donc là d'une question qui fut tout à la fois centrale, capitale et fondatrice pour l'informatique au moment même où elle commençait à peine à se constituer comme telle.

Quoiqu'il en soit, nous comprenons maintenant qu'une telle perte de précision pendant et à l'issue du calcul est le prix qu'il faut obligatoirement consentir à payer pour se trouver simplement en mesure de l'exécuter en usant de la méthode numérique. Pourtant ce phénomène – dont une moindre chose est de convenir de son caractère perturbant - n'avait guère occasionné de problèmes sérieux dans la sphère des mathématiques appliquées durant les décennies qui avait précédé la seconde guerre mondiale. En effet, soit il était question de résoudre des systèmes d'équations différentielles totales, et ça on savait correctement le faire en tenant compte des troncations et des pertes de précision cumulées qui pouvaient éventuellement survenir dans le procès d'un calcul, soit alors, quand ce n'était pas le cas, le nombre de multiplications et de divisions qui devait être effectué par le calculateur (humain ou non), n'était jamais très élevé. L'effectuation manuelle ou mécanisée de ces opérations mathématiques élémentaires, qui figuraient donc généralement en faible nombre dans les calculs scientifiques conduits alors, n'était par conséquent pas susceptible de donner lieu à des erreurs d'arrondi qui puissent être considérées, quant elles étaient seulement perceptibles, comme véritablement handicapantes. Ceci, finalement, nous autorise à saisir pourquoi une difficulté de cette ampleur (tout au moins nous est-il permis de la qualifier de la sorte *a posteriori*), était passée quasi inaperçue à l'époque aux yeux de la plupart des membres de la communauté scientifique internationale. Ainsi par exemple, et d'après ce qu'avance Herman H. Goldstine⁵⁴⁸, le britannique Douglas Hartree ne semble pas avoir été au courant de la découverte qui avait été conjointement faite par Courant, Friedrichs et Lewy à la fin des années vingt lorsqu'il s'essaya à la résolution d'équations différentielles partielles au moyen de l'analyseur différentiel de l'université de Manchester. Ceci, dans une certaine mesure, semble pouvoir rendre compte du relatif insuccès que rencontra son entreprise. Le problème de l'instabilité numérique, même s'il avait été effectivement identifié et en partie analysé depuis plus d'une décennie, ne s'était donc jamais posé d'une façon qui puisse être qualifiée

⁵⁴⁸ « *Hartree's difficulty in part lay in his apparent lack of awareness of a totally new mathematical phenomenon [i.e. l'instabilité numérique] arising in the study of partial differential equations from a numerical point of view* », in [Goldstine, 1972], p. 101.

de réellement sérieuse ou systématique avant les années quarante et l'advenue concomitante des grands calculateurs électroniques digitaux.

L'irruption de la deuxième guerre mondiale devait modifier cette situation de manière toute aussi radicale que définitive. Avec celle-ci, nous l'avons vu, s'était rapidement faite jour pour les Alliés la nécessité de mettre au point un certain nombre d'armements conventionnels pour répondre efficacement à la terrifiante puissance de feu qu'alignait les forces de l'Axe sur la quasi totalité des théâtres d'opération. En plus de concevoir ces nouvelles armes, il avait été indispensable de les rendre utilisables en toutes circonstances, ce qui supposait que l'on dispose également de l'énorme puissance de calcul permettant d'établir ou bien encore de réviser les tables de tir balistique nécessairement requises à cette fin. De gigantesques centres de calcul où se trouvaient mises en œuvre des batteries entières de calculateurs électromécaniques parfois agencés selon une modalité de distribution sérielle furent organisés sur le territoire des Etats-Unis en vue de répondre à cet objectif. Assez vite cependant, et malgré les moyens humains et techniques extraordinaires qui furent engagés, ces derniers ne tardèrent pas à crouler littéralement sous le poids de la charge de travail sans cesse croissante qu'exigeaient d'eux les représentants des forces armées. Comme nous espérons en avoir apporté la preuve plus haut, c'est de l'incapacité croissante dans laquelle se trouvaient plongés ces centres militaro civils à calculer un volume de tables de tir en constante augmentation dans des intervalles de temps de plus en plus brefs que naquit, dans un climat scientifique pourtant hostile à l'emploi des composants électroniques⁵⁴⁹, le calculateur digital électronique (mais non pas l'idée du calculateur électronique). Cet artéfact, certes, rompait quasiment en tous points avec ceux qui l'avaient précédé jusque-là. Le fait qu'il ait constitué la preuve tangible qu'il était parfaitement possible d'effectuer des calculs complexes en faisant usage de la technologie électronique n'étant pas un des moindres. Mais malgré toutes ses caractéristiques distinctives, dont nous ne pouvons que très volontiers nous accorder à reconnaître à la fois le nombre, l'originalité et l'importance indéniables, force nous est faite

⁵⁴⁹ Concernant cette question, on citera par exemple les prises de position qui furent celles de Samuel L. Caldwell de la *Radio Corporation of America* (R.C.A.), et de George R. Stibitz de la *Bell Corporation*. En octobre 1943, le premier devait déclarer qu'en 1939, il pensait qu'il était parfaitement envisageable d'effectuer des opérations élémentaires grâce à des dispositifs intégrant des composants électroniques mais qu'en raison du manque de fiabilité de ces derniers et du nombre colossal d'unités de ce genre qu'il aurait été nécessaire d'employer pour fabriquer des machines plus élaborées, l'effectuation de calculs complexes par ce moyen lui semblait inconcevable. La même année, Stibitz, plutôt que de mettre l'accent sur le facteur vitesse de calcul, choisissait de le placer sur celui de la fiabilité de fonctionnement de la machine. A cette fin, il préconisait la mise au point d'un calculateur hybride mêlant technologies électromécanique et électronique. On pourrait également évoquer Howard Aiken qui, lorsque la *Navy* lui demanda au tout début de l'année 1945 de construire un calculateur pour le *Naval Proving Ground* de Dahlgren (Virginie), choisit de se tourner vers l'emploi de relais électromécaniques pour fabriquer ce qui allait devenir le Harvard Mark II alors qu'il était parfaitement au courant de l'existence de l'E.N.I.A.C.

de constater et de dire que les tâches calculatoires pour la réalisation desquelles le premier calculateur électronique digital fut originellement pensé et construit étaient strictement les mêmes que celles qui avaient été confiées jusque-là aux ensembles de calculateurs électromécaniques dont il était censé soulager la charge de travail une fois achevé : plus que jamais, il s'agissait de calculer des tables de tir balistique et donc de résoudre les systèmes d'équations différentielles que ce type de calcul impliquait systématiquement. Si l'instrument de calcul, au sens propre comme au sens figuré, devait se trouver radicalement métamorphosé en étant ainsi massivement investi par la technologie électronique, les objectifs pratiques effectivement poursuivis par ses commanditaires institutionnels, tout au moins initialement, étaient demeurés rigoureusement identiques à ce qu'ils avaient toujours été. Accélérer le processus de constitution ou de révision des tables de tir balistique qui se présentaient en nombre toujours plus considérable dans les centres de calcul installés aux Etats-Unis n'avait jamais cessé d'être la priorité première des militaires américains et c'est la poursuite de cette fin qui, foncièrement, devait exiger la mise en chantier et commander jusqu'à un certain point l'organisation physique⁵⁵⁰ de la nouvelle machine électronique. Cette dernière, par conséquent, avait été voulue dès l'origine pour effectuer le même genre de travaux que celui qui, la guerre venue, était échu par la force des choses à nombre de ses contemporaines mécaniques ou électromécaniques. La supériorité réelle de l'E.N.I.A.C. par rapport à ces machines résidait évidemment dans le fait qu'il était électronique et donc qu'il devait être capable, une fois achevée sa construction, de s'affranchir de ces tâches beaucoup plus rapidement qu'elles⁵⁵¹. La construction de l'E.N.I.A.C., débutée à la fin du mois de mai de l'année 1943, répondait ainsi à l'expression d'un besoin impérieux qui, fondamentalement, participait du domaine de la recherche de performance, ou, pour l'exprimer encore autrement, de la sphère du pur quantitatif: il fallait gagner la guerre et ceci impliquait entre autres choses essentielles que l'on se trouve très rapidement en mesure de calculer plus de tables de tir en moins de temps qu'il n'en avait été nécessaire jusque-là. Initialement, et au moins pour ce qui regarde l'E.N.I.A.C., il ne fut *jamais* question de quoi que ce soit d'autre...

Mais la guerre, on ne le sait décidément que trop bien, constitue un moteur d'innovation technologique tout aussi formidable qu'il peut se révéler abominablement cruel. Pendant les six années que dura le deuxième conflit mondial, les allemands devaient faire

⁵⁵⁰ Certains des circuits électroniques de l'E.N.I.A.C., notamment ceux dévolus à l'effectuation des opérations arithmétiques élémentaires, étaient ainsi des analogues électroniques des unités de calcul correspondantes employées dans les calculateurs électromécaniques ou les machines à calculer commerciales de l'époque

⁵⁵¹ De façon extrêmement paradoxale, l'E.N.I.A.C. ne devait pourtant *jamais* calculer de tables de tir balistique...

preuve d'une inventivité proprement stupéfiante en matière de conception d'armes. Leurs *Panzer Abteilung*, pour commencer, faisaient littéralement régner la terreur sur tous les théâtres d'opération où elles se trouvaient engagées. Dans les premières années de la guerre, et à l'exception peut-être du char britannique *Matilda II* (surnommé à très juste titre *Queen of the Battlefields*), peu de blindés alliés pouvaient en effet prétendre à rivaliser avec la puissance de feu, la fiabilité et la manœuvrabilité qu'exhibaient au combat les *Panzers* et autres *Jagdpanthers* composant les unités de cavalerie lourde du Reich. Dans les mers et les océans du monde entier, ce sont les *Wolfpacks* de U-Boats du *Grossadmiral Karl Dönitz* - lesquels avaient très largement fait la preuve de leur redoutable efficacité durant la première guerre mondiale - qui devaient assurer aux allemands une position de complète domination. Durant la période de l'entre-deux guerres, et fort étonnamment, la *Royal Navy* devait se montrer assez peu encline à faire bon usage des douloureuses leçons qui lui avaient été infligées par les sous-mariniers allemands au cours du premier conflit mondial. Ainsi, en 1937, l'Amirauté anglaise déclarait officiellement que plus jamais les sous-marins ne constitueraient une menace sérieuse pour les flottes de surface⁵⁵² (c'était là du reste un sentiment largement partagé par la plupart des officiers supérieurs des marines alliées). Cette proclamation, qui avec l'avantage confortable que nous confère aujourd'hui le recul historique ne manque pas de nous paraître proprement suicidaire, avait été principalement motivée par deux raisons. Les sous-marins, tout d'abord, étaient très lents, ce qui pour les stratèges britanniques de la guerre maritime constituait un évident facteur de vulnérabilité. Ensuite, vers la fin de la première guerre mondiale, la marine de ce pays était parvenue à développer un système actif/passif multidirectionnel de détection sous-marine par ultrasons appelé A.S.D.I.C.⁵⁵³ (pour *Anti-Submarine Detection Investigation Committee*). A l'orée de la guerre, et sans jamais avoir eu aucune preuve de sa véritable efficacité dans des conditions de combat réelles, les britanniques allaient aveuglément placer leur confiance dans ce dispositif qu'ils n'avaient eu de cesse de perfectionner depuis 1918. Persuadés qu'ils étaient de disposer avec l'A.S.D.I.C. de la contre-mesure ultime en matière de lutte anti-sous-marine, les officiels de la

⁵⁵² A ceci il doit être ajouté qu'une des dispositions du traité de Versailles signé en 1919 par les anciens belligérants interdisait formellement à la nouvelle République Allemande la possession de sous-marins militaires. Cependant, dès 1922, les allemands avaient déjà secrètement installé aux Pays-Bas un bureau de développement de sous-marins dans un chantier naval. Des U-boats destinés à l'Espagne, à la Turquie et la Finlande y étaient discrètement assemblés tandis que les vétérans sous-mariniers allemands de la première guerre étaient appelés à entraîner les équipages des marines récipiendaires. Lorsque l'Agrément Naval Anglo-allemand de parité fut signé en 1935, les plans pour un nouvel U-Boat étaient déjà prêts et à la fin de cette même année, une première escadre allemande composée des nouveaux U-Boats, la *Flotilla Weddigen*, était déjà en service.

⁵⁵³ Le même système est connu par les américains sous le nom de S.O.N.A.R. (pour *SOund NAVigation Ranging*).

marine de sa très Gracieuse Majesté la Reine Elizabeth en étaient ainsi arrivés à proclamer la mort des submersibles militaires. Dönitz et ses U-Boats, cependant, n'allaient pas tarder à leur démontrer tragiquement à quel point ils pouvaient être dans l'erreur. L'A.S.D.I.C., bien que relativement efficace (l'estimation dernière de la profondeur et de la trajectoire du U-Boat à sombrer restait cependant chose complètement empirique), souffrait en effet de quelques imperfections notoires. Enchâssé dans un dôme noyé assujéti à la coque du navire porteur, il était systématiquement sujet à des dysfonctionnements dès lors que les conditions de navigabilité se dégradait (le bâtiment doté étant alors affecté par le roulis, le tangage, etc.). En outre, les ondes ultrasoniques émises par l'A.S.D.I.C. avaient tendance à être anarchiquement défléchies lorsqu'elles rencontraient des couches d'eau de températures différentes (c'était là un défaut majeur que les capitaines de U-Boats furent prompts à exploiter : en plongeant sous ces couches, ils rendaient ainsi leur détection impossible⁵⁵⁴). Enfin, et paradoxalement, l'A.S.D.I.C. était trop sensible : originellement conçu pour détecter la signature acoustique des sous-marins, il détectait également celle des baleines, des bancs de poissons, des courants maritimes ascendants et des sillons provoqués par le déplacement des bâtiments escortés. L'opération de différenciation entre les « bons » et les « mauvais » signaux réfléchis n'étant pas automatisée, elle reposait donc entièrement sur le talent et l'expérience de l'opérateur de l'A.S.D.I.C. On ne s'étonnera donc pas d'apprendre que dans ces conditions particulières les fausses alertes étaient fréquentes et que de nombreuses charges de profondeurs furent mouillées pour rien... Au début du mois septembre de l'année 1939 la *Kriegsmarine* disposait d'une flotte de 57 U-Boats « modernes » et entièrement opérationnels (notons que sur cet effectif seuls 20 bâtiments étaient réellement adaptés aux conditions de guerre en pleine mer, le restant étant plutôt destiné à opérer dans les zones côtières). A l'issue de la première quinzaine de ce mois (du 3 au 18 septembre pour être parfaitement exact), les U-Boats avaient déjà envoyés par le fond quelques 182431 tonnes de bâtiments civils et militaires (il s'agissait principalement de navires britanniques, finlandais et belges) tandis qu'à la fin du mois de décembre de cette même année seuls 9 d'entre eux avaient été perdus au combat. Le formidable potentiel destructeur de ces submersibles ne résidait pas tant dans l'armement qu'ils emportaient habituellement⁵⁵⁵ - lequel demeurait de type conventionnel –

⁵⁵⁴ Cette technique d'évitement est encore employée de nos jours.

⁵⁵⁵ Il serait trop long ici de procéder à l'énumération de la totalité de ces armes et des différentes versions qu'elles connurent successivement. Contentons-nous par conséquent de préciser que, fondamentalement, elles appartenaient à trois classes. Il s'agissait tout d'abord de torpilles à propulsion par air comprimé (type G7a T1) ou à propulsion électrique (types G7e T2, T3 ou T4, G7s T5 ou T11) possédant une portée opérationnelle variable (de 5000 à 8000 mètres) et une vitesse maximum allant de 24 à 44 nœuds. On trouvait également en dotation des canons de pont (*Deck Guns*) de 88 ou 105 mm. installés à l'avant du château du bâtiment (bien

mais plutôt dans la manière dont ils préparaient puis conduisaient leurs opérations offensives. Au début de la guerre, et en raison de la menace supposée que représentait pour eux le système A.S.D.I.C, les commandants de sous-marins allemands avaient reçu l'ordre express de ne pas engager de cibles à moins d'un mile et demi (soit à peu près 2500 mètres). Cette disposition sécuritaire devait s'avérer particulièrement coûteuse puisque seul le mouillage d'un nombre important de torpilles était à même de compenser l'énorme perte de précision que le respect de cette distance de tir impliquait forcément. Très vite cependant, l'amiral Dönitz en vint à douter sérieusement quant à la soi-disant extraordinaire efficacité de l'A.S.D.I.C. En conséquence, il ordonna à ses commandants de réduire la distance d'engagement à 550 yards (ce qui représente une distance très légèrement supérieure à 500 mètres). Ce *modus operandi* fut à ce point payant – et l'A.S.D.I.C. à ce point inopérant – que certains « as des profondeurs », tels Otto Kretschmer et Joachim Schepke, finirent par pousser l'audace jusqu'à naviguer au sein même des convois ennemis afin de sélectionner leurs cibles. La première tactique d'attaque « officielle » employée par les commandants d'U-Boats était l'offensive nocturne menée en surface. A une distance respectable de sa cible, et tout en mettant à profit les ténèbres ambiantes pour assurer sa couverture visuelle, le sous-marin faisait surface, frappait, puis plongeait à nouveau afin d'échapper aux éventuelles représailles ennemies. La seconde manœuvre d'assaut, plus étroitement associée au nom de Dönitz, était connue sous la désignation explicite de *Wolfpack Attacke*. Des jours durant, une « meute » composée de plusieurs U-Boats se dispersait afin de couvrir efficacement une zone maritime où était attendu le passage d'un convoi allié. Une fois correctement disséminés, ils faisaient route séparément vers celui-ci en respectant une allure d'environ 10 nœuds marins. A la faveur du crépuscule ou de la nuit, les submersibles nazis se positionnaient ensuite dans la direction qu'était censé emprunter le convoi. Le premier sous-marin ayant repéré les navires ennemis envoyait alors un signal radio d'alerte au quartier général allemand puis, usant du même procédé, il transmettait cette information aux autres U-Boats de sa formation pour les amener à se regrouper progressivement en vue de l'assaut, lequel n'était finalement lancé que lorsque qu'un certain équilibre des forces en présence avait été effectivement atteint. Une telle procédure de rassemblement, on le conçoit aisément, nécessitait un certain temps pour être totalement accomplie. Cette tactique patiente et sophistiquée, mais ô combien efficace, nécessitait donc une préparation et une capacité de coordination absolument irréprochables.

évidemment, ceux-ci ne pouvaient être mis en service que lorsque les sous-marins faisaient surface, ce qui constituait une procédure relativement rare). Enfin, les U-boats embarquaient parfois à leur bord des mines sous-marines magnétiques (types TMA, TMB, TMC ou SMC) destinées à être immergées à de faibles profondeurs (entre 30 et 40 mètres).

Outre la discrétion et la vigilance de tous les instants qui devait être celles des éléments du groupe de chasse, sa parfaite exécution reposait fondamentalement sur la communication en temps réel de renseignements tactiques transmis par l'entremise de signaux radio. Des émissions de ce genre, cela va sans dire, les alliés se trouvaient depuis longtemps déjà en mesure de les intercepter de façon systématique. Dans des conditions d'engagement qui pourraient peut-être être qualifiées de « normales », cette capacité d'interception aurait dû suffire à offrir aux destroyers alliés le délai qui leur était nécessaire pour préparer une stratégie de défense efficace, laquelle, bien évidemment, aurait eu pour conséquence très appréciable de faire perdre aux allemands tout l'avantage de la surprise que leur octroyait leurs audacieuses manœuvres de groupe. Pour se prémunir entre autres choses de la menace que n'aurait sûrement pas manqué de représenter pour eux ce genre de réaction anticipée, les sous-marins nazis disposaient d'une « arme » formidable, l'Enigma M4. Au moyen de cette ingénieuse petite machine électromécanique dont tous les U-Boats avaient été systématiquement dotés bien avant que la guerre⁵⁵⁶ ne soit déclarée, les opérateurs radio allemands pouvaient rapidement crypter tous les signaux radio qu'ils étaient appelés à émettre tout de même qu'ils étaient en mesure de décrypter l'ensemble des messages amis qu'ils recevaient (les principaux organes de chiffrement de la machine étant réglementairement permutés ou changés à raison d'une fois toutes les vingt-quatre heures). La maîtrise d'un processus de chiffrement et de déchiffrement semi automatisé de l'information de guerre représentait ainsi un des atouts essentiels de la puissance militaire allemande puisque non seulement les unités de la *Kriegsmarine*, mais également celles de la *Wehrmacht*, de la *Luftwaffe* et de l'*Eisenbahn*⁵⁵⁷ étaient régulièrement pourvues de l'une ou l'autre des versions de la machine Enigma depuis la seconde moitié des années vingt (la M4 de la *Kriegsmarine* étant la plus élaborée et donc la plus sûre d'entre elles). Indifféremment noyées dans la masse impressionnante qu'était celle des messages cryptés quotidiennement émis par les allemands et interceptés tout de go par les nombreuses cellules d'écoute alliées, les communications protégées des sous-marins nazis, quant elles parvenaient à être « cassées », se révélaient la plupart du temps inexploitable. En effet, et même s'il ne pouvait prétendre à être qualifié de parfait, le niveau de sécurité qu'offrait la machine Enigma était particulièrement élevé et briser son chiffre impliquait par conséquent que l'on y consacre beaucoup de temps et d'énergie : lorsque, après bien des efforts, on y réussissait enfin, le contenu des messages était

⁵⁵⁶ En 1918, le premier modèle d'Enigma fut breveté en Allemagne par son inventeur Arthur Scherbius. En 1926, la production en série débuta et l'armée allemande commença à s'en équiper. Dix ans après cette date, plus de 30000 machines Enigma étaient en service dans les forces armées de ce pays.

⁵⁵⁷ Chemin de fer allemand.

donc sans objet. Dans l'intervalle, bien entendu, les « loups de mer » de Dönitz continuaient à conduire leurs terribles raids dévastateurs. Cette situation d'hégémonie maritime, à la fois extrêmement coûteuse et démoralisante pour les alliés, allait demeurer en grande partie inchangée jusqu'à la fin de l'année 1942...

Dans les airs, la situation ne semblait guère plus encourageante pour les alliés. Tout juste après la première guerre mondiale, des progrès absolument considérables avaient été faits dans les domaines de la conception et de la construction des aéronefs de combat. Aux anciens appareils multiplans essentiellement constitués de bois et de toile n'avaient pas tardé à succéder des machines dotées de surfaces porteuses métalliques semi-monocoques renforcées par des rigidificateurs longitudinaux et rivetées à la cellule principale de l'engin. Au cours des années vingt, avaient également fait leur apparition les premiers volets de courbure, les atterrisseurs escamotables dans des fuselages désormais pourvus d'un véritable profil aérodynamique et des cockpits fermés équipés de verrières en Plexiglas. Au mois de décembre 1934, le Ministère de l'Air britannique, impressionné par les performances en vol du prototype de chasseur Supermarine « Etude 300 » - le fameux *Spitfire* conçu par l'ingénieur anglais R. J. Mitchell - devait passer commande massive de cet appareil. Trois ans plus tard (en janvier 1937), un contrat était également passé entre la firme anglaise *Hawker* et ce même ministère qui portait cette fois sur la livraison de 600 chasseurs de type *Hurricane*. Bien que de conception moins révolutionnaire que le *Spitfire* (il empruntait en effet nombre de ses caractéristiques techniques au biplan *Hawker Fury*), le *Hurricane* devrait être avec ce dernier l'un des deux chasseurs principaux que la *Royal Air Force* opposerait systématiquement aux *Gruppen* de la *Luftwaffe* pendant toute la durée du conflit. Les allemands, quant à eux, disposaient également d'excellents appareils, autant dans le domaine de l'interception que dans celui du bombardement : dans la première catégorie on pourrait par exemple mentionner les chasseurs monoplaces Messerschmitt Bf109 et Focke Wulf Fw190 et dans la seconde, le Junkers Ju87 (le célèbre *Stuka*), ou encore le Heinkel He111. Au moment où la deuxième guerre mondiale éclata, certains de ces avions (notamment le Bf109 et le He111), avaient déjà largement fait la preuve de leur valeur au combat : envoyés en soutien aux franquistes par Hitler lors de la guerre civile espagnole, ils allaient en effet entrer en service dans les escadrilles de la Légion aérienne nationaliste Condor, de sinistre réputation. Le *Spitfire* et le *Hurricane*, tous deux propulsés par un moteur V12 Rolls-Royce Merlin II, étaient respectivement capables d'atteindre des vitesses de 349 mph (562 Km/h) et 312 mph (502 Km/h) tandis que le Fw190 et le Bf109, le premier motorisé par un moteur Junker Jumo 213 et le second par un bloc Daimler-Benz DB 605D, atteignaient des vitesses

encore supérieures (426 mph). De leur côté, les bombardiers et les chasseurs-bombardiers avaient bien entendu bénéficié d'améliorations similaires. Leur vitesse, cela va sans dire, n'atteignait pas celle de la plupart des intercepteurs légers, mais leur blindage, leur capacité d'emport, leur armement défensif et leur autonomie en vol avaient été considérablement étendus. La conjugaison de tous ces facteurs allait littéralement bouleverser les schémas tactiques traditionnels qui jusque-là avaient pu caractériser la guerre aérienne. Ainsi, les stratégies de combat qui avaient été mises au point au cours de la première guerre mondiale et qui privilégiaient les vols en formation serrée et le combat tournoyant rapproché étaient désormais rendues obsolètes par les vitesses impressionnantes qu'était capable d'atteindre la très grande majorité des appareils de combat alignés par les deux camps. Les nouveaux dispositifs de radiocommunication embarqués autorisaient dorénavant l'adoption de configurations tactiques éclatées bien mieux adaptées aux nouvelles performances des aéronefs en même temps qu'elles permettaient à ces derniers de maintenir une parfaite coordination offensive ou défensive lors des engagements (laquelle était autrefois assurée par une signalétique gestuelle codifiée). Pour la défense antiaérienne au sol (D.C.A.⁵⁵⁸ ou *Flak*), tout ceci ne manquait pas d'entraîner un certain nombre de conséquences notoires. Si au commencement de la première guerre mondiale il était encore parfaitement envisageable pour un artilleur habile et expérimenté d'abattre un appareil ennemi en plein vol, en 1916-1917, ce n'était plus du tout le cas. Les vitesses atteintes par les aéronefs qui furent introduits à cette époque, bien qu'évidemment inférieures à celles que devraient par la suite exhiber les appareils de la R.A.F., de l'U.S.A.F. ou de la *Luftwaffe*, interdisaient désormais aux servants de pièces antiaériennes ce genre d'interceptions à la volée : ouvrir le feu directement *sur* un appareil ne servait plus à rien puisqu'au moment où les obus atteignaient la position qui avait été pointée, ce dernier ne s'y trouvait déjà plus. Des mécanismes automatiques d'assistance au tir, les *gun directors*, furent alors développés⁵⁵⁹ pour se voir quasi systématiquement couplés aux batteries antiaériennes : intégrant des tables de tir balistique pré-calculées, ces dispositifs auxiliaires de visée qui combinaient généralement un servomécanisme de contrôle et un calculateur analogique mécanique ou électromécanique permettaient de déterminer de façon automatisée la position future de la cible en mouvement en fonction notamment de sa position courante et de la vélocité des projectiles qui étaient employés pour l'abattre. De

⁵⁵⁸ Acronyme signifiant « Défense Contre les Aéronefs ». La *Flak* étant la défense antiaérienne allemande.

⁵⁵⁹ Ce sont des mathématiciens comme Oswald Veblen (que l'on retrouvera à la tête de la division scientifique du *Ballistic Research Laboratory* pendant la seconde guerre mondiale), et Norbert Wiener, le père de la première cybernétique, qui furent chargés du développement de ces instruments au *Army's Aberdeen Proving Ground*.

manière anticipée, à l'instant $t-1$ par exemple, la pièce d'artillerie pouvait donc être automatiquement orientée vers le point de la trajectoire de vol que l'avion antagoniste devait supposément emprunter à l'instant $t+1$; à l'instant t , les salves de projectiles défensifs étaient tirées et atteignaient cette zone au moment précis où l'avion était censé s'y trouver. Une batterie sol-air équipée d'un tel système de visée automatisée augmentait ainsi considérablement les chances que son servant pouvait avoir d'abattre un appareil de l'armée adverse (sans celui-ci, elles n'étaient d'ailleurs pas loin d'être nulles). Quelles qu'aient pu être effectivement les performances réelles de ces systèmes auxiliaires, tout ce que nous venons précédemment d'évoquer contribue à mettre en lumière un fait particulièrement significatif pour nous: dans les conditions qui étaient celles de la guerre moderne, les aptitudes naturelles de l'homme ne suffisaient plus à assurer sa simple survie (sans même mentionner ici la protection de ses infrastructures sensibles). Sans le secours salutaire que lui offrait désormais l'automate calculateur/orienteur, l'homme se serait donc trouvé parfaitement démuni face à la menace de plus en plus vérifiée que représentaient pour lui les assauts aériens. Au cours de l'entre-deux guerres, nous avons déjà mentionné cela, la vitesse des avions fut multipliée par deux, voire trois, alors même que leur manoeuvrabilité, leur résistance et leur potentiel destructeur se voyaient considérablement accrus. L'ensemble de l'armement antiaérien qui avait été conçu et utilisé pendant la première guerre mondiale était donc devenu complètement obsolète. Par souci d'économie, certains de ces matériels firent l'objet d'une remise à niveau. Cependant de nouvelles armes, de nouvelles munitions (vélocité et pouvoir de pénétration accrus) et de nouveaux dispositifs automatiques de visée durent être développés et produits en masse. Evidemment chaque arme ou système d'arme amendé ou récemment introduit nécessitait soit que l'on révisé complètement ses tables de tir, soit que l'on procède à leur calcul. Le tout en un minimum de temps bien sûr puisqu'à bien des égards, des matériels performants utilisés de manière optimale pouvaient décider du sort favorable d'une bataille. C'est précisément dans la perspective de résoudre ce genre de problèmes que l'*U.S. Army's Ballistics Research Laboratory* prit la décision de construire l'E.N.I.A.C., au cours du mois de juin 1943.

2.2.6. De l'E.N.I.A.C. au concept de machine universelle à programme interne.

Dans ce qui précède, nous avons déjà eu très largement l'occasion d'évoquer les circonstances historiques particulières dans lesquelles décision fut prise par les autorités militaires américaines de donner leur aval à la construction de l'*Electronic Numerical Integrator and Computer* à la *Moore School of Electrical Engineering*. Nous avons également vu que la profonde originalité de cette machine numérique à fonctionnement mixte - en ceci qu'il s'agissait d'un calculateur opérant à la fois en mode parallèle et sériel - résidait essentiellement dans le fait qu'elle reposait massivement sur l'emploi de la technologie électronique. L'E.N.I.A.C., mais c'est bien là la raison décisive pour laquelle il avait été décidé de le fabriquer, était donc incommensurablement plus rapide que toutes les machines à calculer analogiques ou numériques existantes. Pour le reste, c'est-à-dire sur le plan logique, il ne différait en réalité que très peu des grands calculateurs électromécaniques digitaux déjà en service à la même époque. Ainsi la plupart de ses unités fonctionnelles, comme les accumulateurs, le diviseur / *square rooter*⁵⁶⁰ ou les multiplicateurs ne constituaient-elles que des répliques électronisées des modules à relais de l'I.B.M. A.S.C.C. / Harvard Mark I. Quant à son organisation logique, elle répondait peu ou prou à un schéma structurel similaire à celui de ces monstres électromécaniques. Hors sa vitesse d'opération ahurissante due à l'emploi en masse de composants électroniques – ce qui certes représentait une avancée technologique réellement prodigieuse – le calculateur d'Eckert et Mauchly n'introduisait donc rien de véritablement nouveau...

Il s'agit à présent pour nous de tenter de comprendre exactement pourquoi et comment naquit l'idée de la machine digitale universelle à programme interne, autrement dit de tenter de saisir dans tout ce qu'il peut avoir de spécifique le processus à la fois intellectuel et technologique qui, débuté à partir de 1944, conduisit finalement à la genèse et à la formalisation du concept d'ordinateur au début de l'été de l'année 1945. *De facto*, l'E.N.I.A.C. et l'E.D.V.A.C. ne partageaient que très peu de points en commun : tous deux étaient des machines numériques, tous deux étaient électroniques et tous deux furent effectivement conçus et réalisés à la *Moore School* de l'Université de Pennsylvanie. Mais c'est là à peu près tout ce qui les réunissait : l'E.N.I.A.C. était un calculateur, l'*Electronic Discrete Variable Arithmetic Computer* une machine d'un tout autre type et d'une toute autre portée. Le *First*

⁵⁶⁰ Cette unité combinait les circuits dédiés à la division et ceux dévolus au calcul de la racine carrée. Le terme américain *square rooter* n'est pas aisé à traduire en langue française, c'est pourquoi nous l'avons fait figurer ici tel quel.

Draft of a Report on the EDVAC, le document séminal rédigé en juin 1945 par John Von Neumann en vue de décrire *l'architecture logique* du premier ordinateur devait ainsi introduire une rupture absolument décisive – et définitive – dans l'univers du calcul automatique. Pour soudain et radical que puisse effectivement paraître cet essentiel moment de rupture – les choses commencent en effet à changer et ce changement à s'accélérer dans les quelques mois qui suivent la diffusion du *First Draft* - il s'avère pourtant qu'il ne saurait être convenablement entendu en dehors du bref *continuum* dans lequel il s'est historiquement déroulé. Car l'E.D.V.A.C. est bien né de l'E.N.I.A.C., ou plutôt d'une série de profondes réflexions menée par Eckert, Mauchly et Von Neumann sur les lourdes imperfections structurelles qui grevaient celui-ci (l'histoire, très injustement, ne retiendra pourtant que le nom du mathématicien d'origine hongroise). Si l'on cherche alors à comprendre pourquoi l'ordinateur a été inventé et en quoi il rompait absolument avec toutes les machines de cette époque, et c'est l'objectif que nous visons ici, il est donc impératif d'en revenir d'abord au calculateur électronique de la *Moore School*, à ses caractéristiques techniques mais aussi à son design : c'est là en effet que tout s'est joué.

L'E.N.I.A.C., nous avons eu l'occasion de vérifier ce point notamment lorsque nous l'avons comparé à l'Atanasoff-Berry Computer, était considérablement plus sophistiqué que les rares machines à calculer électroniques qui l'avaient précédé. Composé de 40 unités fonctionnelles distinctes disposées en forme de U (voir figure *n* ci dessous), de trois tables de fonction mobiles et de deux périphériques électromécaniques d'entrée/sortie, il comprenait 70000 résistances, 10000 condensateurs, 6000 *switches*, 1500 relais électromécaniques et 17468 tubes à vide dont à peu près la moitié était dévolue au stockage temporaire des quantités à traiter. On se souviendra sûrement qu'au début des années quarante régnait aux Etats-Unis un climat de défiance scientifique tout particulièrement marqué à l'endroit de l'usage de la technologie électronique dans le domaine de la conception des calculateurs. De par sa nature et son envergure sans précédent, le projet PX s'inscrivait donc en faux, et de manière plutôt spectaculaire, contre cette attitude hostile affichée notamment par des gens tels que S. H. Caldwell (R.C.A.) ou G. Stibitz (*Bell Labs*). La principale critique adressée à l'encontre de la faisabilité d'un grand calculateur numérique entièrement électronique portait en priorité sur la faible fiabilité des tubes à vide. Si l'on s'accordait généralement à reconnaître qu'il était possible de réaliser des calculs simples en employant cette technologie, donc par là même de fabriquer des instruments électroniques de taille relativement modeste, il en allait tout autrement lorsque l'on considérait le cas de calculs difficiles, lesquels

nécessitaient évidemment que l'on réalise de nombreux montages interdépendants autrement plus complexes que les précédents.

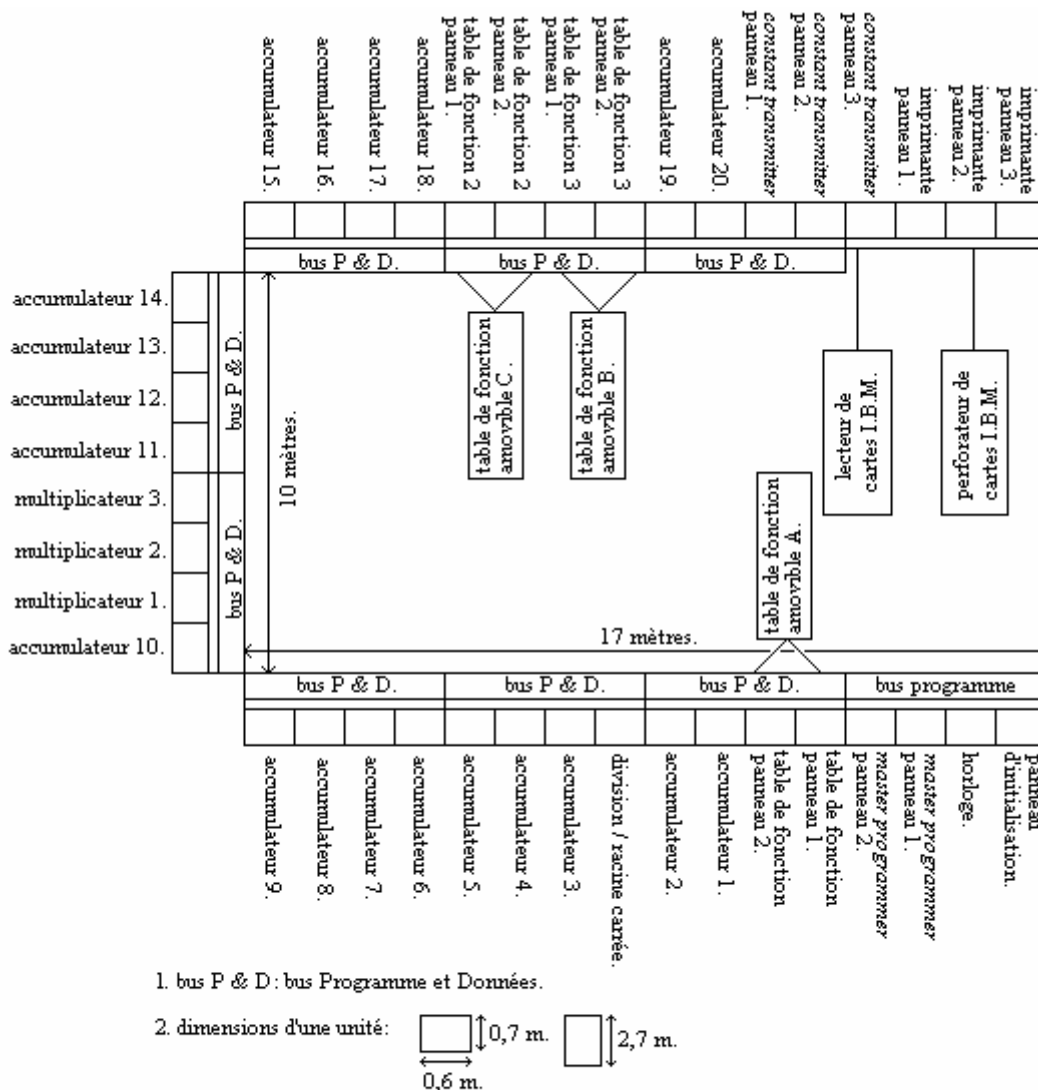


Fig. 15: organisation matérielle des 40 unités fonctionnelles de l'ENIAC, des tables de fonctions mobiles et des unités périphériques de lecture et d'écriture.

Le problème majeur ici était qu'en fonctionnant les tubes à vide chauffaient nécessairement et qu'au fur que leur température augmentait, ils avaient une nette tendance à claquer. En raison de cela, il était donc supposé qu'un grand calculateur reposant intégralement sur la technologie électronique ne pourrait jamais constituer une réponse raisonnable, et encore moins une solution viable, au problème devenu extrêmement préoccupant de la vitesse d'opération des instruments de calcul scientifiques: le très grand nombre de composants électroniques qu'une telle machine aurait obligatoirement requis pour sa fabrication, leur intégration et leur interaction au sein d'un ensemble technique formidablement compliqué, sans même parler de la chaleur énorme qu'ils auraient tous

dégagé ensemble, représentaient autant de dangers dont on pensait qu'ils menaceraient dangereusement et à coup sûr sa fiabilité globale. Non seulement l'emploi d'éléments de cette sorte dans le champ du calcul automatique était chose très peu connue, mais en plus de cela cette technologie était jugée *a priori* comme insuffisamment maîtrisée et maîtrisable pour que l'on envisage avec elle la construction d'un calculateur. Ceci est intéressant à deux titres au moins. Technologiquement tout d'abord, puisque Presper J. Eckert parvint effectivement à découvrir une solution pour contourner le délicat problème posé par la surchauffe et la casse des tubes à vide. Historiquement ensuite car cette réticence presque institutionnelle vis-à-vis du calcul électronique permet exactement de comprendre pourquoi John Von Neumann ne fut mis au courant que très tardivement – et accidentellement de surcroît - de l'existence de l'E.N.I.A.C. Le budget initialement attribué au projet PX s'élevait à peu de choses près à 150 000 dollars⁵⁶¹, ce qui impliquait bien entendu la mise en place d'un contrôle des dépenses extrêmement rigoureux. Un simple calcul suffit à s'apercevoir d'emblée que le montant de cette somme interdisait définitivement à Eckert l'usage des tubes à vide les plus fiables qui étaient alors proposés sur le marché : employés notamment dans les circuits des stations répétitrices téléphoniques sous-marines, ceux-ci coûtaient en effet presque 100 dollars pièce. Et il en aurait fallu près de 18000... Dans ces conditions Eckert n'eut d'autre option que de porter son choix vers les tubes de type 6SN7, certes beaucoup moins performants que les premiers, mais qui possédaient cependant l'avantage de ne coûter qu'un demi dollar l'unité. Le problème auquel se trouvait confronté l'ingénieur en chef de l'E.N.I.A.C. s'articulait par conséquent autour de ces trois facteurs essentiels : nombre, coût et fiabilité des composants électroniques. Statistiquement, l'espérance de vie moyenne d'un tel tube placé en fonction s'élevait à peu près à trois mille heures, ce qui peut effectivement sembler suffisant. Mais il ne faut pas oublier que 18000 de ces tubes à vide étaient censés opérer de manière simultanée ce qui fait que le meilleur des cas, il fallait s'attendre à voir survenir une panne à peu près toutes les dix minutes (et ce sans même tenir compte des milliers de résistances et de condensateurs qui eux aussi représentaient potentiellement une source d'incident non négligeable). L'I.B.M. A.S.C.C. / Harvard Mark I pouvait réaliser trois opérations par seconde alors que l'E.N.I.A.C. pouvait en effectuer 5000. Mais dans de telles conditions, il est bien évident qu'il n'aurait quasiment servi à rien de disposer d'une machine capable d'opérer à la vitesse de la lumière si celle-ci risquait de tomber en panne plusieurs fois par heure sachant en outre que le temps passé à détecter l'origine de la panne – donc le tube défaillant

⁵⁶¹ Chiffre avancé officiellement dans le mémorandum en date du 26 avril 1943 qu'adressa John G. Brainerd, directeur de la *Moore School*, à Harold Pender, doyen de cette même institution.

parmi 17468 éléments identiques – pouvait nécessiter plusieurs heures de recherche... Presper J. Eckert, en brillant ingénieur qu'il était, eut alors deux intuitions absolument déterminantes: premièrement, les trois mille heures de durée de vie moyenne généralement prêtées à un tube à vide constituait une estimation valable uniquement dans l'hypothèse où celui-ci fonctionnait à plein rendement, c'est-à-dire au maximum du voltage et du courant pour lesquels il avait été conçu. De ce fait, abaisser respectivement ces valeurs nominales de cinquante pour cent et de vingt-cinq pour cent revenait à accroître proportionnellement la fiabilité (ou à réduire la probabilité de dysfonctionnement), du composant électronique considéré. En faisant usage de cette astucieuse méthode, Eckert se trouva donc à même d'augmenter la fiabilité d'ensemble de la machine⁵⁶² mais parvint également à réduire de manière tout à fait appréciable le temps requis pour tester les composants électroniques destinés au système avant que ceux-ci ne se trouvent intégrés à l'ensemble (ce qui permet donc de diminuer les délais de construction du calculateur). Sur l'insistance d'Eckert, des standards encore plus draconiens furent mis en place pour accroître la fiabilité de tous les autres composants électroniques (condensateurs, résistances, etc.). De surcroît, il choisit de n'employer qu'un nombre très limité de types de circuits qui tous, *in fine*, devaient être montés sur des modules enfichables (*pluggable units*) dans le but évident de faciliter après coup les interventions de maintenance sur l'E.N.I.A.C. Ainsi, quant une panne survenait, on ne devait pas seulement changer l'élément incriminé mais la totalité du circuit dont il faisait partie intégrante: c'était là une stratégie de remplacement coûteuse mais elle présentait cependant l'avantage d'éviter de laisser la machine trop longtemps immobilisée (le circuit défectueux était retourné à l'atelier pour réparation). Ensuite, deuxième intuition, Eckert et Mauchly⁵⁶³ savaient parfaitement que la plupart des pannes qui survenaient sur les appareils comportant des tubes électroniques se produisaient lorsqu'ils étaient mis en fonction et que ces éléments commençaient à chauffer. C'était là un problème bien connu des opérateurs radio de l'époque qui avaient pour habitude de ne jamais éteindre les dispositifs de mise en température dont disposaient habituellement

⁵⁶² La durée de vie moyenne d'un tube fut portée de 9000 à 10000 heures grâce à ce procédé.

⁵⁶³ N'oublions pas que J. W. Mauchly, le « scientifique » du groupe E.N.I.A.C., fut l'auteur en août 1942 d'un mémorandum intitulé « *The Use of High Speed Vacuum Tubes for Calculating* » qui circula parmi ses collègues et certains étudiants de la *Moore School* (notamment Presper J. Eckert sur lequel il eut une influence dont la moindre chose est de dire qu'elle fut décisive). Ce travail est aujourd'hui considéré comme le véritable point de départ du projet PX. Pourtant, lorsque Mauchly le proposa au directeur des recherches de la *Moore School* ainsi qu'aux responsables de l'*Army Ordnance Department*, ceux-ci l'ignorèrent purement et simplement. C'est en mars 1943, et sous l'impulsion déterminante du lieutenant Herman H. Goldstine alors chargé par l'*U.S. Army* d'explorer toutes les pistes susceptibles d'accélérer le calcul des tables de tir balistique, que le texte de Mauchly fut redécouvert. Après que Goldstine eut convaincu John G. Brainerd (directeur de la *Moore School*), du bien-fondé des idées proposées par Mauchly, les discussions préliminaires qui devaient conduire à la mise en chantier de l'E.N.I.A.C. purent enfin commencer avec les gens du B.R.L.

ces instruments de transmission. Dans un but préventif, Eckert proposa alors de procéder de la même manière avec le calculateur électronique de la *Moore School*, sa fiabilité d'ensemble ne pouvant par là même que s'en trouver renforcée. A l'énoncé de ces quelques éléments, on se rend parfaitement compte de l'importance du rôle que devait jouer ici Presper J. Eckert Jr. : non seulement il organisa le travail de manière extrêmement rigoureuse, il procéda à la définition de standards exigeants pour garantir au maximum la bonne fiabilité des composants électroniques⁵⁶⁴, il conçut l'intégralité de la circuiterie de la machine, mais en plus, ce fut lui qui recruta bon nombre des membres de l'équipe de développement de l'E.N.I.A.C. John W. Mauchly, tout du moins jusqu'à ce que John Von Neumann ne rejoigne le projet PX à titre de consultant, était plutôt le « visionnaire » du groupe (son titre officiel était quelquefois conseiller technique, quelquefois ingénieur de recherche): c'est en effet lui qui était à l'origine de l'E.N.I.A.C. et qui imagina en grande partie son design

Compte tenu de l'extrême gravité des circonstances historiques dans lesquelles la construction de ce calculateur électronique avait été décidée - il fallait travailler très rapidement puisque ce qui se jouait ici n'était ni plus ni moins qu'une sorte de contre la montre face aux puissantes forces de l'Axe – mais aussi du faible budget initial qui avait été alloué au projet, le jeune ingénieur originaire de Philadelphie n'eut d'autre choix que de concevoir chaque partie de la machine de la manière la plus simple possible. Ainsi si l'on devait à un moment donné choisir entre un design élégant, mais long à réaliser, et une solution « grossière » mais plus facile et plus rapide à mettre en œuvre, c'est cette dernière option qui était systématiquement retenue. L'objectif poursuivi avec ce *worse case design* était relativement simple : il fallait que l'état d'avancement du projet ne cesse jamais de progresser. En d'autres termes, aucun ralentissement « injustifié » ne pouvait être toléré. La vitesse d'opération de la machine constituait indubitablement le point crucial autour duquel avait été organisé le projet PX, mais son temps de fabrication, on le voit, représentait également un facteur déterminant puisque cette contrainte eut des répercussions non négligeables sur son organisation logique. En définitive c'est bien là ce qui permet de comprendre pourquoi

⁵⁶⁴ Lorsque la machine fut placée en fonctionnement au *Proving Ground* d'Aberdeen (en 1946), les gens de ce centre de recherche militaire se plaignirent à ceux de la *Moore School* en affirmant que l'E.N.I.A.C. présentait un taux de panne anormalement élevé et que de ce fait, il ne fonctionnait au mieux que cinquante pour cent du temps. Une enquête interne aboutit à la conclusion qu'une personne haut placée, pour des raisons d'économie, avait pris la décision d'éteindre la machine tous les soirs (quant elle ne calculait pas, elle consommait tout de même 174 kilowatts / heure, ce qui revenait à dépenser quelques 650 dollars par heure de « sommeil »). Lorsque ce problème fut corrigé, la machine recommença à opérer normalement (en moyenne, l'E.N.I.A.C. ne brûlait plus qu'un tube à vide tous les deux jours, une quinzaine de minutes étant alors nécessaire pour remplacer l'unité défectueuse). Ceci prouvait bien la réelle efficacité des décisions qui avaient été prises en amont par Presper J. Eckert.

l'architecture de l'E.N.I.A.C. empruntait très largement à celle des grands calculateurs numériques électromécaniques de sa période : en procédant de la sorte, c'est-à-dire en « électronisant » des structures fonctionnelles déjà existantes et éprouvées, il devenait possible de réaliser de substantielles économies de temps et d'argent en terme de recherche et de développement... C'est aussi ce qui permet de saisir pourquoi l'ambitieuse machine de la *Moore School*, sur le plan théorique, fut quasiment un instrument de calcul mort-né. De 1946, date à laquelle l'E.N.I.A.C. fut livré à l'*Aberdeen Proving Ground*, jusqu'au 2 octobre 1955, jour où il fut définitivement éteint avant d'être démantelé, ce calculateur travailla avec une remarquable efficacité sur les nombreux problèmes mathématiques qui lui furent soumis (on mentionnera entre autres choses les questions liées à la mise au point de la bombe à hydrogène, l'étude de *patterns* météorologiques au dessus de l'U.R.S.S. afin d'évaluer le comportement de retombées nucléaires sur ce pays, le design de tunnels de soufflerie et, bien sûr, le calcul de tables de tir balistique). Mais en dépit de ses « bons et loyaux services », l'E.N.I.A.C. demeurera le seul et unique représentant de la lignée qu'il inaugura. Comme on le sait il ne devait connaître ni pair, ni descendance directe...

Plusieurs mois après que la construction de ce calculateur ait débutée, les défauts inhérents à son design commencèrent à apparaître de plus en plus nettement à ses concepteurs. Parmi tous ces problèmes, les plus préoccupants concernaient sûrement sa très faible capacité mémoire et le temps requis pour « reprogrammer » la machine⁵⁶⁵ (ce qui se produisait systématiquement lorsque l'on devait passer d'un type de calcul à un autre). Sur un instrument tel que l'I.B.M. A.S.C.C., des bandes de papier perforées ou des *bunches* de cartes perforées étaient couramment utilisés afin de changer la séquence d'instructions et les données destinées au calculateur. Ceci était possible car la vitesse d'opération de l'*Automatic Sequence Controlled Calculator* (soit trois opérations par seconde), était parfaitement compatible avec celle des dispositifs de lecture qui lui étaient attachés. Or il n'était pas envisageable de procéder de la sorte avec l'E.N.I.A.C. Puisque électronique, celui-ci pouvait effectuer quelques 5000 opérations par seconde et, bien évidemment, il n'existait à cette époque aucun lecteur de cartes ou de bandes⁵⁶⁶ capable de soutenir une telle fréquence de fonctionnement : dans ces conditions, les bandes ou les cartes se seraient déchirées ou bien se seraient accumulées de façon catastrophique en occasionnant un phénomène de bourrage. Pour contourner ce délicat problème de « compatibilité » *hardware*, Eckert et Mauchly ne virent

⁵⁶⁵ Ces deux difficultés, bien sûr, étaient intimement liées l'une à l'autre. Nous verrons bientôt pourquoi.

⁵⁶⁶ Ces dispositifs étaient principalement constitués de relais électromécaniques. De tels éléments pouvaient commuter entre 100 et 200 fois par seconde alors que les tubes électroniques changeaient d'état à peu près 100000 fois par seconde.

d'autre solution que celle consistant à faire appel à des liaisons câblées permettant de raccorder les unes aux autres les différentes unités de la machine en fonction du type des computations réalisées. Fondamentalement le rôle dévolu à ces câbles - ou « bus » - était le même que celui que remplissaient les cartes ou les bandes perforées de l'A.S.C.C.: il s'agissait par conséquent d'acheminer grâce à eux les signaux nécessaires au fonctionnement du calculateur au bon endroit et au bon moment. Ils servaient par conséquent à alimenter la machine en instructions, en données, et à parfaitement synchroniser l'opération de ses différents éléments fonctionnels. Trois types de bus existaient qui « courraient » tout le long de la machine. Les premiers d'entre eux, les bus numériques -ou bus de données - servaient à transporter les valeurs codées sous forme d'impulsions électroniques. Les autres, appelés bus programme - ou bus de contrôle - permettaient d'acheminer des signaux d'activation (les instructions), vers la totalité des unités de l'E.N.I.A.C. Enfin le bus de synchronisation transmettait en permanence des tops de coordination à tous les éléments du calculateur. Une unité restait inactive jusqu'à ce qu'elle reçoive une impulsion d'activation via un bus programme. Quant elle recevait ce signal, et en fonction de la manière dont avait été configurés les boutons de son panneau de contrôle (*switches*), l'unité se trouvait alors en mesure d'effectuer plusieurs opérations distinctes. Pour donner une idée de cela, on pourra par exemple citer les quatre processus suivants: 1) déterminer quel bus digital devrait ensuite être utilisé pour recevoir ou transmettre des informations ; 2) déterminer si elle devait recevoir ou transmettre un nombre au cours de cette phase d'activation ; 3) déterminer si ce processus de transmission devait constituer un événement unique ou si au contraire il devait être réitéré n fois ; 4) quant un nombre était transmis, déterminer si la mémoire de l'unité devait être remise à zéro ou si le nombre envoyé devait être stocké pour un usage ultérieur. Une fois ce type d'action complété, l'unité employée envoyait une impulsion spéciale sur un des bus programme afin d'activer le module devant intervenir immédiatement après elle dans la séquence de calcul. Les bus numériques, eux, servaient à acheminer les nombres d'une unité donnée à n'importe quelle autre. Ils consistaient chacun en douze fils dont les dix premiers servaient exclusivement au transport des impulsions représentant les valeurs transmises. Les deux derniers fils étaient respectivement employés afin de transférer le signal correspondant au signe du nombre transmis et pour la mise à la terre. Quant un accumulateur envoyait un nombre – disons 5 – à une unité similaire, il envoyait 5 impulsions successives d'une durée de 2 microsecondes sur un fil donné (*e.g.* celui dédié aux unités), en respectant un délai de 10 microsecondes entre chacune d'entre elles. Si aucune impulsion n'était envoyée sur le onzième fil du bus numérique, cette valeur était positive. Pour représenter le signe négatif, on

utilisait une série de neuf impulsions successives (un procédé compatible avec la méthode des compléments). Vouloir rentrer ici dans le détail du fonctionnement de l'E.N.I.A.C. nous conduirait beaucoup trop loin. C'est certes là un thème passionnant, susceptible d'être nourri grâce à une abondante littérature technique très bien renseignée, très précise, mais son traitement nous éloignerait par trop de ce sur quoi notre attention doit impérativement demeurer focalisée: l'organisation logique de ce calculateur électronique, ses insuffisances profondes, et la mutation fondamentale qu'elles entraînaient assez rapidement sur le plan théorique. Disons donc simplement que l'économie de l'E.N.I.A.C., via les bus, reposait entièrement sur ces multiples échanges d'impulsions électroniques significatives. Au final le calculateur, avec ses quarante unités différentes, ses canaux de routage, ses trois tables de fonction mobiles et ses deux unités périphériques, ressemblait à ces gigantesques centraux d'échange téléphonique qui existaient au milieu du siècle.

A l'aune de ceci, on se trouve en mesure de vérifier à quel point la programmation de cette machine pouvait être tout à la fois complexe et délicate. Dans *ENIAC : the Triumphs and Tragedies of the World's First Computer*, Scott McCartney rapporte ainsi les propos de Jean Bartik, l'un des tous premiers « programmeurs » du calculateur dont il devait affirmer⁵⁶⁷ plus tard: « *The ENIAC was a son-of-a-bitch to program* ». C'est là une déclaration fort inconvenante que la décence la plus élémentaire nous interdit bien sûr de traduire. Pourtant force nous est faite de reconnaître que si elle possède au moins une vertu, c'est bien celle d'être extrêmement révélatrice quant à la difficulté que représentait réellement la programmation de l'E.N.I.A.C. Ainsi, et en fonction de la nature du calcul devant être effectué, il était tout d'abord nécessaire de transformer le problème en lui donnant forme numérique. Ensuite il fallait planifier le calcul. La première phase de cette opération se déroulait sur le papier, la seconde directement sur la machine. Pour cela on devait configurer la position de tous les interrupteurs figurant sur les panneaux de contrôle de l'ensemble des unités du calculateur (accumulateurs, tables de fonction mobiles, multiplicateurs, *master programmer*, etc.), puis relier ces dernières les unes aux autres en respectant un schéma de câblage correspondant spécifiquement au schéma dégagé préalablement. Cette méthode somme toute très lourde permettait effectivement de contourner le problème de compatibilité matérielle dont nous avons fait mention plus haut : une fois paramétré, l'E.N.I.A.C. pouvait ainsi fonctionner au maximum de ses capacités. Mais c'était pour ainsi dire passer de Charybde en Scylla car si grâce à ce procédé particulier il était effectivement possible de

⁵⁶⁷ In [McCartney, 1999], p. 94.

surmonter l'obstacle que représentait le différentiel de vitesse existant entre le calculateur électronique et les périphériques d'entrée électromécaniques de l'époque, le temps requis pour reconfigurer la machine à chaque nouveau calcul était proprement énorme : quand tout se déroulait convenablement – ce qui était fort rare – il fallait plusieurs heures, voire quelquefois plusieurs jours, pour la reprogrammer. Ce que l'on avait pu gagner d'un côté en termes de temps se trouvait donc perdu de l'autre mais, parvenus à ce point, Eckert et Mauchly s'étaient tout simplement trouvés pris au dépourvu : ils ne voyaient plus aucune solution susceptible de résoudre ce problème...

La façon pour le moins fortuite dont John Von Neumann pris connaissance du projet PX est fort bien connue⁵⁶⁸. Alors qu'un beau jour de l'été 1944 il attendait un train en partance pour Philadelphie à la gare d'Aberdeen, il fut abordé par un lieutenant de l'armée américaine qui l'avait reconnu pour avoir assisté naguère à quelques-unes de ses conférences. Surmontant une appréhension bien compréhensible, Herman H. Goldstine entama alors la conversation avec cette très grande figure du monde des mathématiques et de la physique. L'atmosphère de la discussion, d'abord amicale et relaxée, prit une toute autre tournure – Goldstine affirme même qu'à partir de là elle eut tout d'un examen oral de doctorat en mathématiques - lorsque Von Neumann apprit que le jeune officier travaillait sur un calculateur numérique révolutionnaire censé être capable d'effectuer 333 multiplications par seconde (la multiplication, avec la division, étaient les opérations les plus coûteuse en temps de calcul, c'est pourquoi on les évitait au maximum en leur substituant généralement des méthodes telles que l'addition répétée ou encore la méthode des différences). Peu de temps après cette rencontre décisive, Von Neumann venait voir l'E.N.I.A.C. à la *Moore School*.

Au delà du caractère anecdotique – et, il nous faut bien l'avouer, quelque peu savoureux - de cet événement historique, une question mérite d'être posée: comment se fait-il qu'une personne de l'envergure de Von Neumann, par ailleurs conseiller scientifique du B.R.L. depuis 1940 et doté de l'habilitation secret défense, n'ait pas été mise d'emblée au courant de la construction de l'E.N.I.A.C. ? Depuis 1943, le prestigieux mathématicien était en effet consultant au *Los Alamos Laboratory* dans le cadre du très confidentiel projet Manhattan. En cette qualité, il était tout particulièrement préoccupé par la question que posait la résolution des grands systèmes d'équations différentielles partielles impliqués par le problème de l'implosion de la charge nucléaire. Au mois de janvier 1944, c'est-à-dire

⁵⁶⁸ La plupart des ouvrages consacrés à l'histoire des ordinateurs et à celle de l'informatique y font en effet référence. Le mieux, croyons-nous, est encore de se référer directement à la source. On consultera donc de préférence [Goldstine, 1972], p. 182.

quelques mois avant qu'il ne rencontre Goldstine, on sait que Von Neumann adressa un courrier officiel à Warren Weaver⁵⁶⁹, alors à la tête du bureau des mathématiques appliquées à l'*Office of Scientific Research and Development* (O.S.R.D.) et membre du *National Defense Research Commitee* (N.D.R.C.), dans le but de s'enquérir des instruments de calcul existants qui seraient susceptibles de l'aider à réaliser ce type de computation. W. Weaver lui répondit en évoquant l'I.B.M. A.S.C.C. / Harvard Mark I d'Howard Aiken ainsi que les travaux qui étaient alors conduits par George Stibitz aux *Bell Telephone Laboratories* mais, très curieusement, il ne fit nulle mention de l'E.N.I.A.C., pourtant le projet de calculateur numérique le plus prometteur du moment. Pourquoi en fut-il ainsi ? La réponse à cette question, nous la connaissons déjà : très peu nombreuses étaient les personnes, notamment dans les hautes sphères de l'O.S.R.D. et du N.D.R.C., qui avaient foi dans le calcul électronique. A partir de là, et compte tenu du scepticisme ambiant qui sévissait à l'encontre de cette technologie, il est bien évident qu'il n'y avait pas lieu pour eux de gaspiller le temps extrêmement précieux de Von Neumann en lui parlant d'un projet de calculateur intégralement électronique que de ce fait même on jugeait presque sûrement voué à l'échec. C'est là bien entendu pure spéculation, mais il n'est pas interdit de penser que l'hostilité générale affichée alors vis-à-vis du calcul électronique eut très certainement pour conséquence de retarder de quelques mois l'entrée en scène de John Von Neumann dans le monde des instruments de calcul automatiques. De quelle manière se seraient déroulées les choses si Herman H. Goldstine ne l'avait pas abordé sur le quai de la gare d'Aberdeen, nul ne saurait l'imaginer.

Von Neumann vit l'E.N.I.A.C. pour la première fois au tout début du mois d'août 1944 (très vraisemblablement le 7). Tous les membres de l'équipe de conception, à l'exception notable de Presper J. Eckert qui paraissait en fait assez peu impressionné par la perspective de cette visite⁵⁷⁰, attendaient fébrilement l'arrivée du mathématicien: celui-ci pouvait en effet apporter beaucoup à l'E.N.I.A.C. En dehors de ses évidentes compétences scientifiques, le simple fait que son nom se trouve attaché à un projet suffisait généralement à lever des financements qui autrement auraient été très difficiles à obtenir. Goldstine se souvient qu'à cette occasion, Eckert déclara qu'il pourrait dire si Von Neumann était vraiment un génie en fonction de la première question que celui-ci poserait en voyant le calculateur

⁵⁶⁹ Warren Weaver sera un des principaux acteurs du mouvement cybernétique ouvert en 1942 par Norbert Wiener, Arthur Rosenblueth et Julian Bigelow (avec l'article « *Behavior, Purpose and Teleology* »).

⁵⁷⁰ De son propre aveu, Eckert devait déclarer qu'à cette époque il n'avait jamais entendu parler de Von Neumann. A ce qu'il semble, c'est à un Goldstine extrêmement impressionné que revint donc la tâche de lui dépeindre le savant.

électronique : si celle-ci concernait la structure logique de la machine il serait convaincu, autrement... Evidemment, la première question qu'adressa Von Neumann aux concepteurs de l'E.N.I.A.C. portait sur sa structure logique et ceci suffit à emporter les réserves qu'avait pu émettre Eckert quant à la réputation du savant. Quant, enfin, Von Neumann rejoignit le projet PX « officiellement » - n'oublions pas qu'au même titre que la bombe atomique, ce calculateur était classé secret défense – la construction de l'E.N.I.A.C. était déjà bien avancée (en juin 1944 deux accumulateurs, soit un quinzième de la machine, étaient opérationnels), et ses imperfections majeures parfaitement identifiées depuis au moins plusieurs mois: étaient mis en cause le nombre beaucoup trop élevé des tubes à vide, la capacité de stockage extrêmement limitée des accumulateurs (au total 20 nombres signés comportant 10 chiffres chacun), et le caractère particulièrement malcommode – sans parler de la lenteur – de son mode de programmation. Mais l'E.N.I.A.C. était tel qu'il était et compte tenu de l'avancement des travaux et de l'évolution du conflit mondial, il fallait impérativement compléter sa construction pour qu'il puisse servir au plus vite à des fins militaires. En janvier 1944, soit une dizaine de mois avant que Von Neumann n'intègre le groupe de la *Moore School*, Eckert commença à travailler sur le design d'un nouveau calculateur, lequel devait différer de l'E.N.I.A.C. en de nombreux points. Il en décrivit les grandes lignes dans un document d'à peine trois pages intitulé *Report on the Magnetic Calculating Machine*⁵⁷¹. Dotée d'une architecture plus simple et plus élégante que ce dernier, cette machine de taille modeste (comparée à l'E.N.I.A.C. s'entend), aurait du bénéficier d'une capacité de stockage portée à 2000 nombres décimaux à dix chiffres et d'un canal unique permettant d'assurer la transmission de *toutes* les impulsions électroniques nécessaires à son opération. Mais ce n'est pas tout. Les programmes auxquels la *Magnetic Calculating Machine* devait accéder très rapidement auraient du être stockés magnétiquement sur des disques spéciaux d'aluminium quand le calculateur n'en avait besoin que de manière intermittente. Si cet usage s'avérait devoir être répété, Eckert avait prévu de les graver de manière permanente sur des disques offrant un temps d'accès très réduit. Il semble ainsi que les premières idées concernant un *stored program computer* – un calculateur dont le programme est stocké *dans* la mémoire de la machine - datent de la fin de 1943 ou du tout début de 1944. En conséquence, mais cela ne fait pas toujours l'unanimité⁵⁷², nous croyons que c'est à juste titre que la paternité de ce concept est habituellement attribuée à P. J. Eckert et J. W. Mauchly. Bien évidemment il ne

⁵⁷¹ Des passages de ce document ont été reproduits dans l'ouvrage de Nancy Stern : *From ENIAC to UNIVAC*, Bedford, Mass., Digital Press, 1981, pp. 28-75.

⁵⁷² Avant la guerre, J. V. Atanasoff avait en effet inventé un dispositif de stockage, le *rotating capacitor drum*, dont les disques d'Eckert ne constituaient ni plus ni moins que des analogues magnétiques.

s'agissait pas encore d'une machine à architecture Von Neumann - et pour cause ! - mais certaines notions essentielles, appréhendées sur le plan matériel et non pas sur le plan purement logique, se trouvaient déjà esquissées. L'objectif poursuivi ici par Eckert, en plus d'augmenter ses performances, visait à simplifier considérablement les structures logique et matérielle du calculateur de façon à éviter que ne soient reproduites à l'avenir les nombreuses erreurs théoriques et techniques qui avaient été commises lors de la conception de l'E.N.I.A.C. Dans une conférence qu'il donna en 1946, l'ingénieur en chef du projet PX devait affirmer la chose suivante : « *We constructed a machine which we later felt – even felt to some extent at the time – was considerably more complicated than it should have to be, not only in its logical structure but also in the actual physical structure*⁵⁷³ ».

La prise de conscience que l'E.N.I.A.C. était beaucoup trop compliqué et grossier, en tout cas beaucoup plus qu'il n'aurait pu et dû l'être, survint donc très tôt dans l'esprit de ses concepteurs. Il avait fallu travailler dans une extrême urgence, privilégier des solutions logiques et techniques efficaces et rapides à mettre en oeuvre aux dépens de concepts plus élégants mais aussi confier la réalisation des éléments de circuiterie à différents groupes oeuvrant de manière quasi indépendante. Puisque tous ces dispositifs, finalement, devaient être intégrés au sein d'un même système pour fonctionner de concert, aucun ne pouvait posséder un design optimal : il avait fallu aller au plus rudimentaire – ce qui ne signifie pas nécessairement aller au plus efficace - pour s'assurer de leur compatibilité. La totalité de l'effort entrepris à la *Moore School* depuis 1943 s'était ainsi centrée sur l'aspect technique du problème tandis que son versant logique, lui, avait été largement négligé. Le nouveau projet de machine envisagé par Eckert dès le mois de janvier 1944, et qui représentait en quelque sorte une « antithèse » de ce qu'avait été l'E.N.I.A.C., devait constituer le point de départ théorique du projet PY, autrement dit l'esquisse de ce qui allait bientôt devenir un des tous premiers ordinateurs : l'*Electronic Discrete Variable Calculator* (E.D.V.A.C.). Avec tout cela, on comprend qu'avant même que Von Neumann n'arrive à la *Moore School*, un changement de perspective intellectuelle décisif avait déjà commencé à se dessiner au sein de l'équipe chargée de la conception et de l'assemblage de ce formidable « boulier de luxe » qu'était l'E.N.I.A.C.

Durant la première moitié de l'année 1944, deux idées ou certitudes paraissaient solidement établies parmi les membres du groupe E.N.I.A.C. La première, bien entendu, était que ce calculateur souffrait de plusieurs défauts majeurs qui tous, à un titre ou à un autre,

⁵⁷³ Cité in [McCartney, 1999], p.112.

étaient directement liés à l'insuffisance de sa capacité de stockage interne. Par exemple chaque accumulateur, avec la circuiterie annexe, nécessitait à lui seul 550 tubes à vide. Puisqu'il y en avait 20, ils réclamaient au total 11000 tubes pour ne permettre en retour le stockage que de 20 nombres à dix chiffres ce qui de façon patente était très peu au regard de l'énorme investissement matériel consenti et des risques de pannes afférents. Quant aux séquences d'instructions, et compte tenu de cette capacité mémoire extrêmement limitée, le seul expédient technique envisageable pour permettre au calculateur de fonctionner aux vitesses permises par l'électronique était le câblage, avec tous les inconvénients que cela supposait. John Von Neumann, tout comme Eckert et Mauchly avant lui, saisit assez rapidement les limitations dont souffrait l'E.N.I.A.C. Il comprit également que si ce calculateur pouvait être employé pour résoudre les équations différentielles habituellement utilisées en balistique, il n'en irait pas du tout de même avec les problèmes mathématiques complexes sur lesquels il travaillait alors : la capacité mémoire de la machine était bien trop faible pour cela. Il semblait donc clair que la résolution du problème posé par le stockage constituait la priorité absolue : elle conduirait non seulement à la suppression ou à la simplification de tous les autres mais également à l'extension du pouvoir de la machine. La deuxième de ces idées avait été empruntée à George Stibitz (qui la tenait lui-même de C. Babbage). Dans un article intitulé « *A Statement Concerning the Future Availability of a New Computing Device* », le concepteur des calculateurs électromécaniques des *Bell Telephone Laboratories* avait détaillé le fonctionnement d'un dispositif permettant d'alimenter en instructions une petite machine digitale à relais, le *Relay Interpolator* (R.I.) : « *To make the Relay Interpolator (RI) carry out a required computation, that computation is broken down into a succession of orders to the machine to memorize, read or write numbers, add, and so on. These orders are placed on a control tape with the aid of a device similar to the ordinary typewriter.*⁵⁷⁴ ».

L'idée, ici, consistait donc à diviser ou à réduire le calcul à réaliser en une succession d'ordres élémentaires (*e.g.* mémoriser une valeur, lire ou écrire un nombre, additionner, etc.), puis à placer ces derniers les uns à la suite des autres, c'est-à-dire en respectant l'ordre naturel du calcul, sur une bande préparée grâce à un instrument proche d'une machine à taper. Pour les gens de la *Moore School*, il ne faisait donc aucun doute quant au fait qu'il était parfaitement possible de stocker sur une bande des instructions de contrôle codées numériquement puis de piloter automatiquement l'opération de la machine grâce à ce moyen.

⁵⁷⁴ G. R. Stibitz, *Applied Mathematics Panel*, N.D.R.C., « *A Statement Concerning the Future Availability of a New Computing Device* », 12 novembre 1943, cité in [Goldstine, 1972], p. 184.

Le problème, encore une fois, concernait la faible capacité de stockage dont disposait l'E.N.I.A.C. : comment imaginer faire tenir tout cela en machine alors que l'espace mémoire disponible se limitait tout au plus à 20 nombres à dix chiffres ? En outre, il faut bien comprendre que dès le départ, aucune disposition de ce type n'avait été prise pour ce calculateur: l'accent avait été mis exclusivement sur la rapidité de la machine et la solution du câblage, tout du moins à l'origine, semblait parfaitement adaptée pour répondre à cette exigence. Après tout l'E.N.I.A.C. était initialement destiné à travailler sur les seuls problèmes de balistique, ce qui sous-entendait que des procédures de reconfiguration surviendraient assez peu fréquemment. L'idée de Stibitz était pourtant exceptionnellement prometteuse et elle allait avoir sous peu d'extraordinaires répercussions. Restait cependant à découvrir un moyen de la mettre concrètement en œuvre...

A partir de là toutes les pièces du puzzle étaient réunies, et, comme nous allons le voir maintenant, les événements s'enchaînèrent très vite. Le 11 août 1944, Herman H. Goldstine, se faisant ainsi le porte-parole de l'équipe de développement de l'E.N.I.A.C., adressa un mémorandum au directeur du *Ballistic Research Laboratory*, le Colonel Leslie Earl Simon. Dans le troisième paragraphe de cette note, il déclarait: « *It is highly desirable that a new RAD contract be entered into with the Moore School to permit that institution to continue research and development with the object of building ultimately a new ENIAC of improved design*⁵⁷⁵ ... ». Par ce biais, Goldstine proposait donc qu'un contrat de recherche soit signé d'office entre la *Moore School* et le B.R.L. en vue de la construction d'un nouvel E.N.I.A.C. au design amélioré (*new ENIAC of improved design*). Différents points d'ordre général étaient évoqués préfigurant les grandes lignes qui seraient celles du développement de ce calculateur. La nouvelle machine devrait: 1) contenir beaucoup moins de tubes à vide que la machine précédente. Ainsi elle coûterait moins cher et sa maintenance s'en trouverait grandement facilitée; 2) être capable de prendre en charge les nombreux types de problèmes mathématiques dont le traitement ne s'était pas révélé aisé avec l'E.N.I.A.C. à cause de son mode de programmation et de sa faible capacité mémoire; 3) être capable de stocker à moindre coût, et à haute vitesse, une quantité importante de données numériques; 4) être plus facile et plus rapide à programmer que sa devancière; 5) être plus petite que l'E.N.I.A.C. Il nous paraît ici légitime d'avancer l'idée selon laquelle la présence de Von Neumann n'était étrangère ni à la rédaction ni à la teneur de ce document. Primo, c'est peu de temps après son arrivée que les discussions formelles qui aboutirent à la conclusion qu'il devait être possible

⁵⁷⁵ Mémorandum, H. H. Goldstine au Col. Leslie E. Simon, 30 août 1944, cité in [Goldstine, 1972], p.185.

de calculer autre chose que des équations balistiques avec une machine comme l'E.N.I.A.C. eurent lieu. Tel quel bien sûr, le calculateur de la *Moore School* était incapable de cela, mais en droit cela paraissait cependant parfaitement envisageable. Nous n'avons pu établir si Eckert et Mauchly, mais aussi Arthur W. Burks et Herman H. Goldstine – respectivement le logicien et le mathématicien du groupe - avaient pris la pleine mesure de ce problème auparavant mais un courrier envoyé par J. G. Brainerd au Colonel Paul N. Gillon, assistant directeur du B.R.L., souligne le rôle absolument prépondérant que joua ici John Von Neumann. Dans cette lettre en date du 13 septembre 1944 on peut en effet lire :

« The progress of work on the ENIAC has led to some rather extensive discussions concerning the solution of problems of a type for which the ENIAC was not designed. In particular, these discussions have been carried out with Dr. Von Neumann... Dr. Von Neumann is particularly interested in mathematical analyses which are the logical accompaniment of the experimental work which will be carried out in the supersonic wind tunnels... It is not feasible to increase the storage capacity of the ENIAC... to the extent necessary for handling non-linear partial differential equations on a practical basis. The problem requires an entirely new approach.⁵⁷⁶ ».

Il est ici absolument capital de prendre acte de tout ce que cette déclaration peut impliquer. En premier lieu, on comprend bien que c'est Von Neumann qui a véritablement perçu et attiré l'attention des autres membres de l'équipe sur les limitations des capacités de calcul de l'E.N.I.A.C. D'après Brainerd, c'est même le mathématicien qui prit la tête (*carry out*), des nombreux débats afférents à cette question. Ensuite il convient de se rappeler qu'au moment précis où il rencontra Goldstine, Von Neumann était en quête d'un instrument qui lui permettrait d'effectuer les calculs d'hydrodynamique fort complexes que requerrait la mise au point de la bombe A (d'où la mention faite aux souffleries supersoniques). John Von Neumann, on le sait, était tout particulièrement intéressé par la neurologie. Il était parfaitement au fait des travaux théoriques de McCulloch et Pitts (1943) et devait largement s'inspirer de leur modélisation mathématique du cerveau, c'est-à-dire d'une représentation du cerveau conçu et décrit comme un automate logique, pour définir l'organisation de

⁵⁷⁶ Lettre de John G. Brainerd, directeur de la *Moore School of Electrical Engineering*, au Colonel Paul N. Gillon, assistant directeur du *Ballistic Research Laboratory*, 13 septembre 1944 ; l'extrait que nous avons cité plus haut a été reproduit in [Goldstine, 1972], pp. 186-187.

l'E.D.V.A.C. Ainsi qu'en témoignent certains de ses textes⁵⁷⁷ - *The General and Logical Theory of Automata, The Computer and the Brain* – l'intérêt qu'il portait aux automates⁵⁷⁸ et au fonctionnement du cerveau continua de croître avec le temps et ces deux champs n'eurent en fait de cesse de s'enrichir mutuellement. Mais au départ tout indique que Von Neumann ne s'intéressa vraiment aux machines à calculer que pour des motifs essentiellement pratiques, à vrai dire des mobiles militaires, lesquels le conduisirent ensuite à se plonger dans les profondes considérations théoriques que l'on sait. Le mathématicien devait en quelque sorte constituer une formidable « passerelle » entre le *Ballistic Research Laboratory*, la *Moore School of Electrical Engineering* et le *Los Alamos Laboratory* - toutes institutions de recherche au service de l'armée américaine – et faire bénéficier l'équipe de l'E.N.I.A.C. de son génie en logique, en physique et en mathématiques. L'ensemble du travail de réflexion qui par la suite sera mené pour faire évoluer l'E.N.I.A.C. et qui conduira finalement à l'E.D.V.A.C., donc à la définition de l'architecture Von Neumann et par là même à l'ordinateur, sera habité et guidé par ce souci primordial : concevoir un calculateur électronique numérique capable d'effectuer des calculs difficiles et diversifiés, en d'autres termes une machine rapide, facile à programmer, et dotée d'une mémoire importante. Or, et nous en revenons maintenant au mémorandum de Goldstine, la réalisation de cette potentialité impliquait que le design de la machine – notamment le type et l'organisation de sa mémoire ainsi que son mode de programmation - se trouve repensé en profondeur. C'était là un important travail de recherche et de développement qui nécessitait bien sûr l'octroi de fonds supplémentaires... Deusio, l'arrivée au sein de la *Moore School* d'un scientifique aussi éminent et entendu que l'était Von Neumann contribua très sûrement à « l'enhardissement » de ses membres les plus influents : ainsi que l'a écrit Philippe Breton « *la participation de Von Neumann [assurait] au projet une légitimité sur un plan scientifique et aussi auprès des financeurs potentiels.* ⁵⁷⁹ ». S'il n'avait été là, nul ne sait si la requête de Goldstine ne serait pas restée lettre morte ou si elle aurait tout simplement été formulée. Le 29 août 1944, à la suite d'une série d'importantes discussions portant sur ces questions, une rencontre fut arrangée dans les locaux du B.R.L. entre les représentants du *Ballistic Research Laboratory* et ceux de la *Moore School of Electrical Engineering*. Les minutes de cette réunion (connue sous le nom de *Firing Table Reviewing Board*), indiquent que John Von Neumann participa activement aux débats. Au mois d'octobre 1944, L'U.S. *Army Ordnance Department* accorda

⁵⁷⁷ La terminologie employée par Von Neumann dans le *First Draft of a Report on the EDVAC* témoigne déjà de cette influence.

⁵⁷⁸ En tant que mathématicien et logicien, il connaissait de longue date les travaux de Turing et de Church.

⁵⁷⁹ In [Breton, 1990], p. 85.

une rallonge budgétaire de 100000 dollars à la *Moore School* afin que celle-ci puisse poursuivre le travail de recherche et de développement sur l'E.N.I.A.C. Le contrat n° W-36-034-ORD-7593 concernant le financement du projet PY – l'E.D.V.A.C. - ne serait signé que le 12 avril 1946.

Telle était la situation à la *Moore School* à la fin du mois d'août 1944. Les imperfections de l'E.N.I.A.C., depuis longtemps déjà, avaient été clairement repérées mais des orientations et des solutions nouvelles commençaient de se dessiner. Pourtant la question du média physique de stockage – puisque la clef du problème était bien la mémoire du calculateur – n'était toujours pas résolue. C'est alors que Presper J. Eckert proposa d'utiliser des lignes délai ultrasoniques au mercure. Avant d'en venir à l'E.D.V.A.C. et à l'organisation révolutionnaire de cette machine, nous allons examiner le fonctionnement, les avantages et les inconvénients que présentaient ces dispositifs tout en précisant immédiatement que pour cette fonction, ils ne tardèrent pas à être placés en situation de concurrence avec les iconoscopes et autres C.R.T. (dans cette perspective, Von Neumann rencontra le Dr. Zworykin des R.C.A. *Research Laboratory* à plusieurs reprises. Les tubes cathodiques ne furent pas retenus pour l'E.D.V.A.C. mais ils devaient constituer les éléments de base de la mémoire de l'I.A.S. *Computer*). Ces dispositifs qui avaient été mis au point aux *Bell Telephone Laboratories* par William B. Shockley⁵⁸⁰ – un des trois inventeurs du transistor – P. J. Eckert les connaissait très bien pour les avoir perfectionnés dans le cadre de son travail sur les applications radar au début de la seconde guerre mondiale. Le mode d'opération des lignes délai au mercure – à l'origine ce ne sont pas des mémoires – est le suivant : aux extrémités d'un tube cylindrique rempli de mercure à l'état liquide sont placés des cristaux de quartz piézoélectriques jouant le rôle de transducteurs. L'un d'entre eux constitue l'entrée du tube, l'autre la sortie. Les cristaux sont tous deux connectés à un circuit commun transportant des signaux électriques (lesquels peuvent être modulés de façon à représenter une information, c'est le principe du téléphone). Quant ces signaux électriques entrent en contact avec le cristal placé à l'entrée du tube, celui-ci subit un ensemble de déformations mécaniques – il vibre – ce qui induit l'apparition d'une pression acoustique, bref d'une série d'ondes sonores à haute fréquence, dans le mercure. Ces ondes traversent alors le tube dans toute sa longueur (la durée du délai qui peut être obtenu est précisément fonction de la dimension du cylindre), et subissent la conversion inverse à son autre extrémité (toujours en vertu des propriétés piézoélectriques du cristal de quartz en sortie).

⁵⁸⁰ Le fluide employé par Shockley n'était pas du mercure mais un mélange d'éthylène glycol et d'eau.

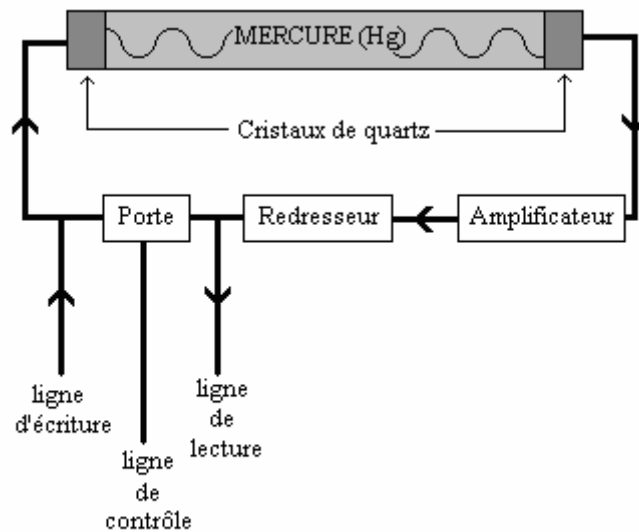


Fig. 16: schéma d'une ligne mémoire ultrasonique au mercure.

Même si les fréquences impliquées sont beaucoup plus basses et qu'il y a amplification du signal à la sortie du circuit, c'est exactement ce qui se passe lorsque l'on utilise un microphone couplé à un haut parleur. Le fonctionnement des lignes délai au mercure, on le voit, reposait donc entièrement sur la transformation d'un signal électrique en signal acoustique, sur le ralentissement de ce dernier, puis sur sa reconversion en signal électrique. Mais quels avantages pouvait-il donc y avoir, sur les plans techniques et conceptuels, à employer un pareil mécanisme dans un calculateur électronique ? Pour comprendre cela, il nous faut tout d'abord préciser que la vitesse de propagation d'un signal acoustique dans un milieu élastique, et tout particulièrement dans un fluide⁵⁸¹ tel que le mercure, est très lente : elle atteint en effet 1450 mètres par seconde, soit 1,5 mm par microseconde⁵⁸². A titre de comparaison, celle de l'électricité dans un circuit s'élève à 3×10^8 mètres par seconde. En diminuant ou en augmentant la longueur du tube, et en tenant compte toujours des éventuels problèmes de fidélité posés par le phénomène de la réflexion d'une partie du signal sonore sur le cristal de sortie, il était possible de parvenir à l'obtention d'un délai plus ou moins long : avec un tube d'une longueur de 1,450 mètre de long par exemple, la latence était d'une milliseconde. Comme on peut le voir sur la figure ci-dessus, le circuit électrique de la ligne délai mercure liait les deux cristaux de quartz piézoélectriques, ce qui signifie que le *pattern* acoustique sériel qui circulait dans le tube réapparaissait de

⁵⁸¹ A température « normale » s'entend.

⁵⁸² Ces valeurs sont ne données qu'à titre indicatif car la vitesse du son dans le mercure dépend étroitement de sa température.

manière périodique, autrement dit, il était *stocké* de façon permanente (tout du moins tant que l'alimentation n'était pas coupée). Régulièrement il était toutefois nécessaire d'amplifier et de redresser le signal électrique source pour éviter que les inévitables phénomènes de déperdition énergétique et de bruit ne le dégradent au point de le rendre illisible. A cette fin des dispositifs électroniques de contrôle du signal – amplificateur, redresseur – étaient employés, mais une ligne délai d'une capacité de 1000 bits⁵⁸³ ne réclamait au total qu'une dizaine de tubes à vide pour assurer convenablement l'ensemble de ces fonctions, ce qui était fort peu. Nous avons vu que sur l'E.N.I.A.C., les nombres exprimés en base décimale étaient transmis d'une unité fonctionnelle à l'autre sous la forme d'impulsions électriques (3 impulsions successives d'une durée de 2 microsecondes, avec un délai de dix microsecondes entre chacune d'entre elles, permettaient par exemple de représenter et de transférer le chiffre 3). Le même principe allait être repris ici mais à une différence près : si l'électricité était bien appelée à demeurer la porteuse du signal, les nombres, eux, seraient désormais représentés en base binaire (nous reviendrons sur les raisons qui motivèrent ce choix en étudiant l'architecture de l'E.D.V.A.C.). H. H. Goldstine propose d'illustrer ceci de la manière suivante: en supposant que la valeur binaire 1 – le bit 1 – soit représentée par une impulsion électrique d'une durée de 0,5 microseconde et que la valeur 0 soit représentée par une absence d'impulsion de même durée, alors un tube de 1,450 mètre de long est à même de stocker 1000 bits d'information les uns à la suite des autres (soit 125 octets si l'on se réfère au standard actuel). Sur l'E.N.I.A.C., la fonction de stockage était assurée par vingt accumulateurs, lesquels remplissaient également le rôle d'unités arithmétiques (comme nous l'avons vu plus haut, ces derniers permettaient d'effectuer l'addition et la soustraction). Pour accomplir ces différentes opérations, un accumulateur ne nécessitait pas moins de 550 tubes à vide, la très grande majorité d'entre eux étant employée afin de stocker un nombre décimal signé de 10 chiffres (soit un mot⁵⁸⁴). Ici, le circuit électronique de base était le flip-flop, un montage élémentaire composé de deux tubes à vide capable d'adopter l'un ou l'autre de deux états stables exclusifs. Ceci autorisait donc la représentation d'un seul bit – 1 ou 0 - à un quelconque instant t (le tube à vide de gauche était activé quand celui de droite ne l'était pas et inversement). Sur un plan purement pratique maintenant, il n'est pas exagéré de considérer une bascule flip-flop comme une unité individualisée. En effet, les deux tubes à vide et la circuiterie attachée que comprenait ce dispositif se trouvaient intégrés au sein d'une seule et même enveloppe de verre (l'ensemble

⁵⁸³ 64 lignes de ce type seront utilisées sur l'E.D.V.A.C.

⁵⁸⁴ En informatique, le terme « mot » sert à désigner la quantité d'information (en bits ou octets), correspondant à ce qu'une mémoire peut contenir. Rapporté à l'E.N.I.A.C., son usage est bien sûr quelque peu anachronique mais non pas illégitime.

était en quelque sorte placé « sous cloche »). On dira par conséquent d'un tel tube que sa capacité de stockage s'élevait à un bit. En supposant que ce soit réalisable techniquement, mémoriser 1000 bits par ce moyen aurait ainsi nécessité l'emploi de 1000 tubes (en réalité 2000 tubes à vide), alors que les lignes délai au mercure, pour dix ou onze tubes seulement et un encombrement spatial réduit, offraient une capacité de stockage absolument identique. Dans le premier cas de figure, le coût correspondant au stockage de 100 bits s'élevait donc à 100 tubes à vide alors que dans le second, stocker le même nombre de bits ne coûtait tout au plus qu'un seul tube. On passait ainsi d'un rapport équivalent à 1:1 (un tube pour un bit), à un rapport 1:100 (un tube pour 100 bits). L'économie ainsi réalisée – qui aurait des répercussions positives non seulement sur le coût de revient de la machine, mais aussi sur sa complexité, sa fiabilité d'ensemble, ses dimensions physiques et ses performances – était proprement colossal. De surcroît, les lignes délai au mercure conçues à cette époque à la *Moore School* furent dotées de trois lignes électriques supplémentaires toutes reliées au circuit principal du dispositif. De la sorte il devenait possible d'en contrôler automatiquement l'opération (synchronisation par horloge et interruption), de lire les informations actuellement stockées ou d'en ajouter de nouvelles en fonction des besoins courants. Le seul problème qui se posait véritablement ici était que ces mémoires fonctionnaient selon la modalité sérielle, autrement dit si l'on souhaitait accéder au 997^{ème} bit de la série pour le lire ou l'écraser (en écrire un autre sur le même emplacement), il était nécessaire de laisser « passer » les 996 bits précédents avant de pouvoir effectuer la manipulation voulue. L'introduction de délais d'attente plus ou moins importants dans la réalisation du processus de calcul était donc inévitable, mais il est bien évident que les bénéfices de tout ordre obtenus par ailleurs au moyen de ce procédé compensaient plus que largement ce type de désagrément. Comme nous nous sommes efforcés de le démontrer à plusieurs reprises, la quasi totalité des difficultés rencontrées avec l'E.N.I.A.C. était directement ou indirectement – mais toujours essentiellement – liée à sa mémoire. L'idée consistant à utiliser des lignes délai au mercure en guise de dispositifs de stockage devait enfin permettre de résoudre tous ces problèmes - tout au moins de les simplifier considérablement - et par là même conduire à une « libération » de la machine⁵⁸⁵. Ces systèmes électroacoustiques autorisaient en effet le stockage fiable de données pendant de longues périodes, ils offraient des temps d'accès relativement brefs (et ce

⁵⁸⁵ Alan M. Turing, lorsqu'il rendit visite à Von Neumann à la fin de 1946, devait prétendre que ce type de dispositif ne pourrait jamais fonctionner convenablement. Le logicien britannique pensait en effet que le bruit généré en cours de fonctionnement finirait obligatoirement par dégrader le signal de façon catastrophique, ce qui rendait par là même impossible le stockage des données. Assez rapidement pourtant il revint sur cette position puisque sur la version 5 de l'A.C.E. du *National Physical Laboratory*, 200 lignes de ce type (chacune capable de stocker 32 mots de 32 bits), furent employées.

en dépit de leur fonctionnement sériel), ils ne nécessitaient que peu d'éléments sensibles (les tubes à vide), ils permettaient de lire et surtout d'écrire rapidement sur des emplacements libres ou déjà occupés et, pour une capacité de stockage assez importante, ils étaient en outre très peu coûteux à fabriquer. Cependant il ne s'agissait pas encore de mémoires « parfaites ». Il faudrait en réalité attendre la toute fin des années quarante et les travaux de An Wang (Université d'Harvard) et ceux de Jay W. Forrester (M.I.T.) pour voir apparaître les premiers dispositifs de stockage à accès aléatoire : les mémoires à tores de ferrite. Toujours est-il qu'en 1944-45 les lignes délai constituaient de loin la solution la mieux adaptée pour résoudre le problème de la mémoire. Demeurait alors à penser une nouvelle organisation de la machine, radicalement différente de celle sur laquelle avait été basé l'E.N.I.A.C., qui serait susceptible de tirer pleinement partie des propriétés de ces nouveaux instruments. Bien sûr, il faudrait également qu'elle ne comporte aucune des imperfections de sa devancière, l'accent étant tout particulièrement mis ici sur la nécessité d'automatiser intégralement l'ensemble des processus réalisés par le nouveau calculateur. En d'autres termes, la machine devait être capable de se piloter elle-même – on allait ainsi vers un très net accroissement de son autonomie - le rôle de l'opérateur devant en principe se borner à l'introduction des instructions de contrôle et des données puis à la réception et à l'interprétation des résultats du traitement. La conceptualisation de tout ceci, comme nous allons le voir, devait principalement échoir à John Von Neumann.

Avant de passer à l'étude des caractéristiques techniques de l'E.D.V.A.C. (contrat n°W-670-ORD-4926 passé entre l'*United States Army Ordnance Department* et l'Université de Pennsylvanie), de voir en quoi celui-ci différait réellement de l'E.N.I.A.C. sur le plan de l'ingénierie ou du *hardware*, il nous sera auparavant nécessaire d'étudier le *First Draft of a report on the EDVAC*. Le contenu et la forme de ce texte, ou plutôt de cette ébauche de rapport restée depuis légendaire, sont à bien des égards nettement plus importants que la machine elle-même. L'architecture originale qui s'y trouve décrite par Von Neumann – et qui à partir de ce moment portera son nom - constituera en effet la matrice organisationnelle, le plan logique, de la quasi totalité des ordinateurs à venir, y compris de ceux que nous utilisons au quotidien.

2.2.7. Le *First Draft of a Report on the EDVAC* ou l'acte de naissance de l'ordinateur.

Pour quiconque prend connaissance du *First Draft of a Report on the EDVAC*, une chose – outre sa clarté et son organisation rigoureuse - est d'emblée frappante : John Von Neumann, contrairement à ce qu'avait fait par exemple Presper J. Eckert en janvier 1944, a conçu son cheminement réflexif en le dégageant complètement des considérations habituellement liées à l'ingénierie - donc au matériel - pour l'installer au contraire dans une perspective foncièrement logique. À l'inverse de ce que son intitulé laisse peut-être entendre, le *First Draft* n'a en fait rien d'un document technique. Il ne contient, à proprement parler, aucune espèce de plan ou de diagramme servant à décrire la machine dont il parle⁵⁸⁶. Von Neumann, ici, a réfléchi en mathématicien et en logicien, il a appréhendé son objet d'étude comme un automate ou un mécanisme logique – une machine de Turing⁵⁸⁷ - effectuant des opérations mathématiques. Il ne l'a donc pas vu comme un calculateur possédant une quelconque réalité matérielle mais bien comme une entité abstraite obéissant à un corps défini de règles strictes. Le mathématicien de Princeton est très sûrement le premier à avoir compris cela, tout comme il est le premier à avoir saisi que les questions relevant de l'ordre matériel étaient ici secondaires. L'essence de la machine, qu'il était impératif de penser en tout premier lieu afin de se trouver en mesure de surmonter toutes les difficultés liées à son organisation, était donc d'ordre logique tandis que les problèmes d'implémentation physique, qui revenaient à l'ingénieur, étaient accessoires. La réflexion sur les composants fondamentaux des calculateurs, ce que Von Neumann nomme *elements*, n'en n'est pas pour autant absente : dans la quatrième partie du texte – 4. 0 *Elements, Synchronism Neuron Analogy* – l'auteur considère en effet tour à tour les différents dispositifs existants susceptibles de remplir ce rôle pour aboutir finalement à la conclusion que les tubes à vide du genre le plus commun – ils sont les moins chers, les plus connus et les mieux maîtrisés - représentent les meilleurs candidats pour cela. L'exigence d'une rapidité de fonctionnement accrue, qui depuis longtemps se situe au cœur de tout projet de construction de machine à calculer digitale, ne disparaît donc pas puisque l'électronique, comme on dit, demeure à vrai dire sans grande surprise la technologie « reine ». Mais il faut bien voir ici qu'encore une fois

⁵⁸⁶ A dire vrai, le *First Draft of a Report on the EDVAC* contient bien un certain nombre de figures (elles sont au nombre de vingt-deux exactement). Mais ces dernières ne sont utilisées par Von Neumann qu'afin de représenter symboliquement certains des circuits ou des éléments fondamentaux de l'ordinateur (comme la « valve simple », le multiplicateur ou le diviseur par exemple), et non la machine dans son ensemble.

⁵⁸⁷ L'influence de Turing – n'oublions pas ici qu'il est question d'une *machine universelle* essentiellement appréhendée sur le mode abstrait – traverse bien entendu l'ensemble du texte.

le développement opéré par Von Neumann procède fondamentalement des ordres de la logique et de la mathématique : tous les composants examinés – relais électromagnétiques ou tubes à vide – sont des éléments dont le mode d'opération discret est de type *all-or-none*. En cela, ils constituent précisément des analogues des neurones biologiques, ou plutôt des analogues des neurones biologiques idéalisés et simplifiés tels que Warren S. McCulloch et Walter Pitts les ont formalisés dans leur célèbre article de 1943, « *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity* ». Le lien avec la logique et avec la neurologie qui, comme chez Alan M. Turing, occupe une place prépondérante dans la pensée de Von Neumann, est ici absolument patent. C'est en s'appuyant sur cette analogie féconde que Von Neumann proposera ensuite⁵⁸⁸ d'utiliser la représentation binaire pour la nouvelle machine: à l'instar des neurones formels décrits par McCulloch et Pitts, les tubes à vide, mais aussi les relais, opèrent en effet selon le mode « tout ou rien ». Le système binaire, parce qu'il ne requiert que la manipulation de suites numériques composées de 1 et de 0, mais aussi parce qu'il possède une structure logique – l'expression est de Von Neumann - beaucoup plus simple que celle du système décimal, apparaît donc ici comme le choix le plus optimal, voire le plus naturel. Avant la rédaction du *First Draft*, l'essentiel de l'effort intellectuel concernant la conception et la fabrication des calculateurs s'était exclusivement articulée et déployée autour des questions d'ingénierie et de *hardware*. La nature de l'équipement avait ainsi primé sur la structure de la machine. Pour tout dire, elle l'avait même fondamentalement déterminée. Ceci, jusqu'à un certain point, s'était avéré efficace mais l'E.N.I.A.C. avait fini par révéler les limites ultimes de cette approche singulière qui tendait à subordonner complètement l'organisationnel au matériel. Pour se trouver en mesure d'avancer, il était désormais nécessaire de penser différemment. Ce fut le grand accomplissement de Von Neumann.

Le *First Draft* s'ouvre sur quelques considérations d'ordre général – à vrai dire un ensemble de définitions - concernant les *calculateurs numériques automatiques à très haute vitesse*, leur fonctionnement et surtout leur *contrôle logique*. Il s'agit essentiellement de présenter ce qui va suivre et de mettre en place les notions essentielles à la compréhension de la chaîne du raisonnement :

« 1.1. *The considerations which follow deal with the structure of a very high speed automatic digital computing system, and in particular with its logical control. Before going*

⁵⁸⁸ Cette proposition se trouve formulée pour la première fois dans le deuxième paragraphe de la première section de la cinquième partie du *First Draft* (5.0 *Principles Governing the Arithmetical Operations*).

*into specific details, some general explanatory remarks regarding these concepts may be appropriate*⁵⁸⁹.».

Dans le deuxième paragraphe (1.2. *Exact description of the functions of such a system*), Von Neumann définit ce qu'est un système automatique de calcul (*automatic computing system* ou, de façon plus générique, *device*), et procède à la description détaillée de son fonctionnement en insistant tout particulièrement sur le rôle rempli ici par ses instructions de contrôle, sur les différentes façons dont celles-ci peuvent lui être fournies, sur leur contenu et enfin sur la forme qu'il convient de leur donner :

« 1.2. *An automatic computing system is a (usually highly composite) device, which can carry out instructions to perform calculations of a considerable order of magnitude – e.g. to solve a non-linear partial differential equation in 2 or 3 independent variables numerically.*

The instructions which govern this operation must be given to the device in absolutely exhaustive detail. They include all information which is required to solve the problem under consideration: Initial an boundary values of the dependent variables, values of fixed parameters (constants), tables of fixed functions which occur in the statement of the problem. These instructions must be given in some form which the device can sense: Punched into a system of punchcards or on teletype tape, magnetically impressed on steel tape or wire, photographically impressed on motion picture film, wired into one or more, fixed or exchangeable plugboard – this list being by no means necessarily complete. All these procedures require the use of some code, to express the logical and the algebraical definition of the problem under consideration, as well as the numerical material (c.f. above).

*Once these instructions are given to the device, it must be able to carry them out completely and without any need for further intelligent human intervention. At the end of the required operations the device must record the results again in one of the forms referred to above. The results are numerical data: they are a specified part of the numerical material produced by the device in the process of carrying out the instructions referred to above*⁵⁹⁰.».

Ce court passage est en réalité d'une immense richesse. Pour commencer, la définition générale que donne Von Neumann de ce qu'il nomme un *automatic computing*

⁵⁸⁹ Les expressions « *very high speed automatic digital computing system* » et « *logical control* » sont soulignées par Von Neumann.

⁵⁹⁰ L'expression « *automatic computing system* » est soulignée par l'auteur.

system marque d'emblée et définitivement la rupture avec l'E.N.I.A.C. Littéralement, la machine qui sera décrite par la suite devra ainsi être capable d'effectuer numériquement des calculs « d'un ordre considérable de magnitude », à savoir par exemple des équations différentielles non linéaires. On se souvient que dans le cadre du projet Manhattan, c'est justement le besoin d'effectuer automatiquement ce genre de computations extrêmement complexes qui avait conduit le mathématicien à s'intéresser aux machines à calculer numériques. Or c'est précisément ces calculs que l'E.N.I.A.C., en raison de sa faible capacité mémoire mais aussi de son mode de programmation lent et malcommode, était impuissant à réaliser. Ce que le premier calculateur électronique de la *Moore School* ne pouvait faire, l'E.D.V.A.C. en sera désormais capable : la nécessité de disposer d'une machine numérique ultrarapide à même de traiter des problèmes mathématiques fort compliqués oriente ainsi de part en part la totalité de la recherche menée par Von Neumann. Une autre chose s'avère également très intéressante. C'est l'utilisation immédiate du terme *system* dans l'expression « *automatic computing system* ». Par système – mais il existe bien sûr nombre d'acceptions plus ou moins apparentées pour ce mot – il faut entendre ici un ensemble hautement intégré et organisé d'unités fonctionnelles différentes interagissant de façon cohérente les unes avec les autres dans le but de réaliser (automatiquement) une tâche précise, en l'occurrence effectuer numériquement un certain type de calcul. De manière implicite, la présence de ce mot annonce en réalité tout ce qui sera développé dans la deuxième partie du *First Draft (2.0)* : la nouvelle machine comportera en effet plusieurs parties primordiales et distinctes – dans la notation utilisée : *CA*, *CC*, *M*, *R*, *I* et *O* – appelées à opérer ensemble selon un ordre implacable (déterminé par la manière dont s'enchaînent automatiquement et successivement les instructions de contrôle), et un mode synchrone très précis (l'analogie avec les neurones formels, nous le verrons, jouera ici encore un rôle important). Von Neumann, justement, fait ensuite référence aux instructions de contrôle de la machine ou, s'il l'on préfère, au programme et à ses données. Ceux-ci, explique-t-il, doivent être absolument complets. Comprendre qu'ils doivent impérativement contenir tout ce dont la machine a besoin pour accomplir le calcul qui lui est soumis : les séquences numériques qui servent à gouverner son opération bien sûr, les valeurs initiales et limites des variables dépendantes, les valeurs fixes des constantes et les tables de fonction, bref tout ce que l'auteur désigne sous l'appellation générique de « *numerical material* » et qui sert d'une part à spécifier exactement le problème mathématique en cours et d'autre part la procédure structurée que doit suivre pas à pas le calculateur afin de le résoudre. Il n'est donc nulle place ici pour l'omission ni non plus pour la plus légère imprécision : l'ensemble de ce qui sera appelé à faire le calculateur une fois le

programme et les données du problème chargés en machine- en mémoire - se doit par conséquent d'être spécifié et structuré adéquatement *avant* de lui être présenté. Dans l'hypothèse où l'exigence d'ordre et d'exhaustivité strictement requise ici ne serait pas respectée *ad litteram*, la machine ne pourrait pas fonctionner convenablement (il se pourrait même qu'elle ne puisse pas le faire du tout). Immédiatement après cela, l'auteur dresse un catalogue (qui, précise-t-il, ne prétend aucunement à l'exhaustivité⁵⁹¹), destiné à présenter les différents moyens techniques disponibles qui permettraient de fournir au système l'ensemble du « matériel numérique » dont il a besoin. Peut-être conviendrait-il en fait de renverser le sens de cette dernière proposition car selon Von Neumann « *These instructions must be given in some form which the device can sense* ». Puisque le dispositif est défini comme une machine entièrement automatique – l'*intervention humaine intelligente* étant par là même réduite à la portion la plus congrue – c'est « lui » qui doit aller chercher les données dont il a besoin à l'emplacement voulu au cours des différentes étapes du calcul et non pas un opérateur qui doit les lui fournir en fonction de l'état de progression de ce processus. D'une certaine façon, et même si rien ne doit être laissé au hasard en cette matière, la machine est donc maîtresse de sa propre « destinée ». Au passage, on ne manquera d'ailleurs pas de remarquer l'emploi qui est fait ici du verbe *to sense*. Tout se passe en effet comme si le calculateur, grâce à une voie de transfert réservée, pouvait en quelque sorte « sentir » ses propres instructions et données, c'est-à-dire leur emplacement mais aussi leur contenu. Dans la section 2.6., Von Neumann examine les organes d'entrée et de sortie du calculateur (*R*, *I* et *O*) en les considérant respectivement comme des neurones moteurs afférents et efférents, tous objets qui, pour avoir été ensuite saisis par le logos mathématique en vue de modélisation, n'en ont pas moins été directement empruntés au registre de la neurologie. Il n'est donc guère étonnant de retrouver sous sa plume une formule telle que « ces instructions doivent être données sous une certaine forme que le dispositif [*device*] peut *sensir* [ou détecter] ». Le calculateur étant ici conçu à la manière d'un immense cerveau artificiel (cette conception s'appuie sur le modèle mathématique de McCulloch et Pitts), il est évident que le champ lexical qui convient le mieux à la description de ses parties (y compris les plus décentrées), tout de même qu'à celle de son opération est celui que l'on utilise habituellement pour rendre compte du fonctionnement de la machine cérébrale des mammifères supérieurs et de celle de l'homme en particulier. L'homologie avec le cerveau humain et l'esprit, tout du moins la manière dont il se représente leur conformation et leur opération, ne quitte donc jamais la

⁵⁹¹ Von Neumann prend par conséquent la précaution de laisser ouverte la porte aux développements en cours ou à venir.

pensée de Von Neumann lorsqu'il rédige ce texte : elle occupe ici une position centrale et remplit une fonction assurément séminale. En vérité, il n'a de cesse de projeter cette représentation fondatrice dans l'artefact en vue de lui conférer organisation et matière (les tubes à vide, éléments fondamentaux de la machine, sont vus comme des neurones). Elle le guide en permanence. Pour Von Neumann, il ne semble faire aucun doute que le cerveau est une machine à calculer organique incroyablement complexe ou, pour paraphraser Dominique Pignon, une machine de Turing « molle » ; son calculateur, qu'il imagine digital et universel, devra donc être organisé à l'image (simplifiée) du cerveau et obéir à ses règles de fonctionnement - les règles de l'esprit - qui ne sont autres que celles qui régissent la logique. Le *First Draft of a report on the EDVAC*, en plus de constituer l'acte de naissance officiel du premier ordinateur, est donc également et surtout celui d'un véritable cerveau artificiel (en tout cas est-il entendu comme tel). Ainsi l'œuvre de Von Neumann s'inscrit-elle tout d'abord dans la très ancienne tradition de l'automatisme ouverte il y a plus de deux millénaires de cela par la parole mythologique grecque. Celle qui, des servantes d'or et des trépieds autonomes du divin fils boiteux de Zeus et d'Héra décrits par Homère dans l'Iliade, finit par conduire aux artefacts anthropomorphes réalisés par les mécaniciens automaticiens du 18^{ème} siècle : ici, et déjà, ce n'est pas uniquement le corps humain qui est objet de reproduction et de simulation. L'entreprise technicienne, parfois au prix d'habiles supercherries, s'empare également de fonctions intellectuelles « nobles » telles qu'écrire, parler, jouer aux échecs ou encore jouer de la musique. Peu à peu le miroir automate gagne ainsi en netteté, en précision, et l'image qu'il nous renvoie de nous-mêmes se trouve progressivement débarrassée de ses résidus les plus nébuleux à tel point qu'il en arrive finalement à étendre ses prétentions explicatives aux fonctions de ce que l'on suppose y avoir de plus sacré et de plus divin en l'homme : l'esprit. La réflexion de Von Neumann, en ceci qu'elle est foncièrement pensée logico-mathématique, prolonge et renouvelle aussi le paradigme mécanico-géométrique cartésien audacieusement radicalisé par La Mettrie dans le *Traité de l'Homme* puisque ce dernier, comme on le sait, n'a pas hésité à en utiliser la formidable puissance explicative afin de pénétrer et d'éclairer cette *terra sacrosancta*, ce lieu métaphysique par excellence, qu'était jusqu'alors la *res cogitans*. Enfin, Von Neumann est l'héritier du philosophe Thomas Hobbes et du logicien Georges Boole pour lesquels il ne semblait faire aucun doute quant au fait que « *Thinking is reckoning* » (concernant cette visée théorique qui définit l'acte de pensée comme une computation – donc le cerveau comme une sorte de calculateur - et ainsi qu'en peuvent témoigner certains passages de la *Théorie générale et logique des automates* et du *Cerveau et l'ordinateur*, la position adoptée par Von Neumann, nous y reviendrons, était nettement moins

radicale que celle qui pu être affichée à la même époque par un McCulloch). L'intelligence artificielle, en reprenant notamment les recherches logico-mathématiques et les réflexions philosophiques de Turing et Von Neumann ne fera que reconduire – en le radicalisant encore et avec plus ou moins de réussite – l'ensemble de ce projet. Dans un étonnant jeu de va-et-vient entre modèle et modèles, le cerveau, organe qui inspira l'ordinateur, verra se mettre en place au milieu des années 50 une entreprise ambitieuse visant purement et simplement à reproduire ses propres fonctions cognitives, ou, plus raisonnablement, à les simuler afin de les étudier au moyen de la machine dont il a inspiré directement l'organisation. Au passage, économie théorique ultime et sacrilège, les tenants de ce mouvement technoscientifique démesurément « optimiste » auront procédé à la mise hors-jeu de la divinité...

Comme nous l'indiquions un peu plus haut, Von Neumann poursuit en énumérant les différents *media* susceptibles de constituer un support fiable pour recevoir d'une part l'ensemble des données de départ et d'autre part enregistrer les résultats terminaux une fois les calculs effectués. Il existera donc deux dispositifs de stockages externes, l'un placé en entrée de la machine pour lire les instructions de contrôle et les données spécifiant le problème, l'autre en sortie pour recueillir l'issue du calcul. Bien entendu, aujourd'hui ceci nous semble être d'une évidence confondante. Après tout ces unités périphériques ne sont ni plus ni moins que les ancêtres de nos modernes disquettes. Mais comme l'a fort judicieusement remarqué Gérard Chazal dans son introduction à l'édition française de la *Théorie générale et logique des automates*, il s'agit là en réalité d'un des apports les plus décisifs de Von Neumann : nous y reviendrons bientôt mais ce qui est en train de se dessiner sous nos yeux, ce sont les prémisses de la distinction essentielle entre *mémoire externe*, celle dont nous venons de parler, et *mémoire interne* de la machine (Von Neumann abordera ce point crucial un peu plus loin). Autre chose absolument essentielle – mais qui passerait presque inaperçue tant elle se trouve mentionnée brièvement - est la référence faite ici à la nécessité de recourir à un *code* : Von Neumann indique en effet que : « *Toutes ces procédures [i.e. celles qu'il vient de décrire] réclament l'usage d'un certain code afin d'exprimer la définition logique et mathématique du problème considéré [ses instructions] ainsi que le matériel numérique nécessaire [les données essentielles à sa résolution] ».*

Après Leibniz, qui avant tout autre avait perçu l'importance véritable du symbole (songeons à la caractéristique universelle, idéal du raisonnement mécanisé, et à son travail sur la numération binaire), Von Neumann comprendra le pouvoir représentatif, mais aussi la puissance opératoire qui sont ceux du signe (c'est là aussi quelque chose qui sera repéré par A. M. Turing lorsqu'il travaillait à Bletchley Park sur la cryptanalyse militaire et sa

mécanisation). Un code, qui constitue un dispositif déterminé conventionnellement, est un ensemble fini de signes opérant en tant que symboles, c'est-à-dire que ces derniers peuvent être mis à la place d'un objet ou d'une série d'objets – physiques ou abstraits – afin de les représenter, de les remplacer. L'entité ainsi figurée n'étant pas nécessairement « présente » lorsque l'on y pense, le symbole vaut alors pour elle, il y renvoie. Mieux. En quelque sorte il la condense et la mémorise afin de la signifier pour quelqu'un ou quelque chose. La forme « idéale » que prend cette correspondance bilatérale est celle d'une application bijective, donc d'une relation symétrique non ambiguë, établie entre les éléments constitutifs du code et ceux d'une sous catégorie du monde. Un simple feu de signalisation est déjà un automate dont l'opération repose sur une forme de code : à chacun de ses changements d'états correspond un comportement et un seul que les automobilistes sont censés adopter immédiatement. La couleur verte symbolise l'ordre « vous pouvez circuler jusqu'à ce que la couleur passe à l'orange », la rouge l'injonction « restez immobile jusqu'à ce que la couleur passe au vert », l'orange « ralentissez puis arrêtez-vous ». Il s'agit là d'un code élémentaire – il doit bien entendu demeurer interprétable par quiconque conduit un véhicule sur la voie publique - basé sur trois⁵⁹² changements à la fois chromatiques et positionnels auxquels correspondent respectivement une posture comportementale et une seule. A chaque individu membre de l'ensemble {couleurs} se trouve donc associé un élément de l'ensemble {comportements} et réciproquement. Le ou les codes dont nous avons à nous préoccuper ici diffèrent cependant de cela : ce sont des codes numériques, des codes binaires plus précisément. Jusqu'à présent, les séquences de code utilisées avec les calculateurs digitaux – elles étaient binaires avec les machines de Stibitz et Zuse, décimales avec celles d'Aiken, Eckert et Mauchly – servaient uniquement à la représentation des nombres. Von Neumann comprendra qu'il est possible, via l'articulation et la mise en correspondance de différents types de codes, d'étendre les pouvoirs représentatifs du système binaire à d'autres jeux de symboles, des caractères alphabétiques par exemple. Il ne sera plus ici seulement question de manipuler automatiquement des signes représentant des quantités mais bien d'opérer des séries de transformations sur des symboles *au sens générique du terme* et ce par l'entremise de codages numériques successifs et de procédures de calcul. Pour donner un bref aperçu de cela, on sait par exemple que dans le code international A.S.C.I.I., les codes numériques décimaux correspondant respectivement aux caractères alphabétiques « A » et « a » sont 065 et 097 (#41 et #61 en notation hexadécimale). La machine, bien sûr, ne traite pas directement ces valeurs. Elles sont d'abord

⁵⁹² En réalité quatre s'il l'on compte le feu orange clignotant.

traduites en binaire (ce qui donne 01000001 et 00110000), puis transformées en suites d'impulsions électroniques qui codent pour elles. C'est sur ces signaux, ou plutôt sur ces séries symboliques physiques, que le dispositif opère en tout dernier lieu. Lorsque l'on passe du caractère minuscule « a » au caractère majuscule « A » ou inversement, ce qui advient en réalité est que l'on effectue un calcul : dans le premier cas on soustrait 00100000 à 01100001, dans le second on ajoute 00100000 à 01000001. Ecrire ou amender un texte au moyen d'un tel instrument, c'est donc calculer. Or une machine capable de faire cela – c'est-à-dire une machine à même de manipuler tous types de symboles pour représenter à la fois des instructions et des données de n'importe quel genre - n'est plus seulement un calculateur : c'est ce que nous nommons un *ordinateur* (comme nous l'avons vu dans la première partie de ce travail, les américains et les britanniques continuent néanmoins à employer les termes *calculator* ou *computer* pour la désigner).

Reprenons à présent le fil du *First Draft* là où nous l'avons momentanément laissé. Sans toutefois indiquer sa préférence pour l'un ou l'autre des dispositifs de stockage externes qu'il vient d'énumérer, Von Neumann mentionne successivement les cartons ou les bandes de télétype perforés, les bandes ou les fils d'acier magnétisés, les pellicules de film ou encore les câbles (branchés sur des panneaux comportant des emplacements de connexion). Toutes choses étant égales par ailleurs, ces différents systèmes sont fonctionnellement identiques : ils servent fondamentalement à enregistrer des données à la sortie de la machine (peu) ou à lui en restituer en entrée (beaucoup). Etant donné cela, les critères qui présideront finalement à l'élection de l'un ou l'autre d'entre eux seront très certainement basés sur le quadruple rapport vitesse/capacité/fiabilité/coût. Toutefois, à ce point, aucune sorte d'indication n'est donnée en ce sens. Dans les sections 1.3. et 1.4. (respectivement intitulées *Distinctions within the numerical material produced by such a system* et *Checking and correcting malfunctions (errors), automatic possibilities*), Von Neumann donne quelques précisions importantes directement liées au mode opératoire de la machine. Tout d'abord (1.3.), il apparaît que la machine produira une quantité importante de « matériel numérique » avant de parvenir enfin au résultat final. Pour l'exprimer autrement, la quantité de données produite au cours de la computation, c'est-à-dire l'ensemble des opérations intermédiaires survenant à *l'intérieur* de la machine pendant qu'elle effectue le calcul, sera nettement plus importante que celle qu'elle produira en sortie. De ceci il s'ensuit clairement deux choses. *Primo*, et puisque les données correspondant au résultat des calculs ne représente pas un volume d'information important, il est patent que le dispositif externe d'enregistrement placé en sortie de l'appareil n'a pas besoin de disposer d'une grande capacité de stockage. Ce sont celles-là, et celles-là seules,

dont les opérateurs humains ont essentiellement besoin de disposer. Tout le reste – *i.e.* la somme de processus intermédiaires ayant conduit à l'obtention du résultat final - peut être considéré comme survenant à l'intérieur d'une boîte noire et être ignoré en tant que tel : il n'est donc pas nécessaire d'en garder trace définitivement. *Deusio* et par suite, la machine, bien qu'elle soit supposée fonctionner correctement, n'est pas à l'abri d'un « incident numérique » (sans parler bien sûr d'un dysfonctionnement lié au matériel). Quant un dispositif aussi complexe que l'E.D.V.A.C. manipule pendant un certain temps de longues séquences numériques, il existe en effet une probabilité finie de voir survenir un pareil problème (par exemple une accumulation d'erreurs d'arrondi). Si le calcul est appelé à durer longtemps, il est alors parfaitement déraisonnable de tenir cette éventuelle déviation pour un événement négligeable. Le faire ce serait tout bonnement risquer de voir le calcul compromis. Tout serait alors à recommencer en encourageant bien entendu le péril de voir à nouveau se reproduire le même genre de mésaventures si rien n'est fait entre-temps. Von Neumann préconise alors deux choses : d'une part, et dans ces conditions, il semble tout à fait inenvisageable de se passer de l'intervention humaine à la fois pour identifier mais aussi pour corriger ces erreurs lorsqu'elles se produisent. Ceci pour le versant « curatif » de la question. A titre « prophylactique », il indique également qu'il doit être faisable de prévenir automatiquement ce type de dysfonctionnement – tout au moins d'en limiter les dégâts - en dotant la machine de quelques fonctionnalités spécialement conçues à cette fin : armée de la sorte contre ses propres tendances erratiques, ses propres comportements pathologiques, elle devrait être capable : 1) de repérer mécaniquement les incidents les plus fréquents ; 2) d'indiquer leur présence et leur localisation au moyen de signaux perceptibles depuis l'extérieur (la boîte noire « s'ouvre » par conséquent aux regards des opérateurs dès lors que survient un problème grave) ; 3) de s'arrêter afin que l'homme, comme on dit, reprenne la main pour résoudre la difficulté. Ce que Von Neumann a en tête, avec une inventivité et une clairvoyance peu communes, ce sont en fait des dispositifs ou des codes correcteurs et réparateurs. Tout l'effort de réflexion déployé ici vise donc à accroître le pouvoir de l'automate jusqu'aux limites en renforçant et en étendant l'autosurveillance, l'automatisme réflexif, dont il est capable. Dans cette perspective, l'immixtion de l'homme dans le processus se doit d'être réduite au maximum : ne demeurent alors pour la machine que quelque *terra incognita* où seul l'humain, grâce aux indices qu'elle lui fournit, peut intervenir afin de la garder d'elle-même. De machines susceptibles de se réparer elles-mêmes à des automates

capables d'autoreproduction, il y a un pas théorique que Von Neumann n'hésitera pas à franchir dans *The General and Logical Theory of Automata*⁵⁹³. Tous les thèmes fondamentaux développés dans le *First Draft of a Report on the EDVAC* – considérations de fond sur la machine et ses éléments, amplification de l'automatisme, neurones formels de McCulloch et Pitts, machine universelle de Turing – trouveront d'ailleurs une place de choix dans ce texte spéculatif et visionnaire un peu plus tardif (il date de 1948), qui rapproche de façon tout à fait spectaculaire l'artificiel et le biologique en ceci que, puisque les automates théoriques qui s'y trouvent décrits et analysés y sont conçus comme capables d'autoreproduction, ils en viennent presque à se confondre avec les êtres vivants (l'I.A. tentera de faire le reste). Comme tout un chacun le sait, et même si le cinéma de science fiction ne s'est pas privé pour exploiter largement le filon⁵⁹⁴, nos machines actuelles ne peuvent faire cela⁵⁹⁵. Mais le *modus operandi* des algorithmes génétiques, celui des programmes agents intelligents basés sur un schéma évolutionniste/adaptatif ou encore celui des codes viraux, lesquels prennent assez fréquemment la forme de séquences d'instructions autorépliquatrices discrètes et très nuisibles, s'en rapproche grandement. Peut-être convient-il alors de se souvenir qu'après tout un programme n'est rien de plus que la description formelle d'une machine toujours susceptible, au moins en droit, d'être un jour construite...

La deuxième partie du *First Draft of a Report on the EDVAC*, intitulée « 2.0. *Main Subdivisions of the System* » (subdivisions principales du système), contient très certainement quelques-uns des développements les mieux connus de ce texte. C'est en effet dans cette section que Von Neumann présente et explique pour la première fois la structure originale qui bientôt portera son nom dans le monde entier: l'architecture Von Neumann. La particularité essentielle de ce dispositif, outre bien sûr ses éléments et leur singulière organisation, réside foncièrement dans le fait qu'il s'agit d'un schéma *logique* dégagé absolument de toute forme de contrainte liée au matériel pouvant être ensuite utilisé pour construire le système qu'il décrit. En d'autres termes, et contrairement à ce que son intitulé indique clairement, le *First*

⁵⁹³ Voir notamment la section intitulée « Le concept de complexité : autoreproduction », in *Théorie Générale et Logique des Automates*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 1996, pp. 95-104.

⁵⁹⁴ On pensera par exemple à *Star Wars*, *Terminator 1* et *Terminator 2*, à *Star Trek*, à *Matrix*, et à certains épisodes de la série télévisée *Stargate*.

⁵⁹⁵ Quoique certains prototypes si : le *Biowall*, développé par l'équipe du professeur Daniel Mange du Laboratoire des Systèmes Logiques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, est une paroi électronique tactile composée de 3200 cellules qui est capable de réparer automatiquement ses propres circuits quant ils sont détériorés (un simple toucher suffit à cela). A terme, l'objectif visé par cette recherche et toutes celles qui lui sont apparentées vise à mettre au point des automates susceptibles d'évoluer dans des environnements extrêmement hostiles (exploration spatiale ou planétaire, centrales nucléaires, fosses abyssales). Dotés de capacités biologiques telles que la capacité de clonage, d'évolution et d'autoréparation, ils constitueraient ainsi des machines parfaites, infaillibles et autonomes (l'intervention humaine, dans ces conditions, serait tout bonnement impossible), pourtant fabriquées à partir de composants faillibles.

Draft of a Report on the EDVAC ne concerne pas uniquement l'E.D.V.A.C. Hormis les A.N.N.⁵⁹⁶ (*Artificial Neural Networks*), qui, *mutadis mutandi*, hériteront leur organisation du Perceptron⁵⁹⁷ conçu par Frank Rosenblath en 1957 (lequel devait s'inspirer pour cela des travaux de McCulloch et Pitts), tous les ordinateurs conçus à partir de cette date reposeront sur l'architecture de Von Neumann. Or on sait les nombreuses mutations qu'a subie la technologie des éléments qui composent ces machines : tubes à vide tout d'abord, puis transistors, et enfin circuits électroniques de plus en plus intégrés. Depuis la seconde moitié des années quarante, les ordinateurs ont changé de manière extrêmement spectaculaire : progressivement pourvus de systèmes d'exploitation et de logiciels applicatifs intuitifs, ils sont devenus de plus en plus petits, de plus en plus puissants et de moins en moins chers. Mais leur architecture, c'est-à-dire le schéma fondamental qui spécifie formellement à la fois la nature de leurs unités et la manière dont elles doivent interagir les unes avec les autres, a traversé ces extraordinaires transformations sans s'en trouver le moins du monde bouleversée.

Von Neumann débute cette deuxième section du *First Draft* en précisant d'emblée qu'il est certaines distinctions classificatoires – car il s'agit bien ici de spécifier et d'organiser - qui semblent s'imposer d'elles-mêmes. Le dispositif dont il est question étant essentiellement (*primarily*) un calculateur, il est bien évident qu'il devra être en mesure d'effectuer les opérations arithmétiques les plus courantes à savoir l'addition, la soustraction, la multiplication et la division. Précisant que ce principe de base constitue très certainement une approche solide du problème, il envisage néanmoins que l'on puisse parfaitement lui apporter quelques modifications. Ainsi cette liste primitive pourra-t-elle par exemple se trouver élargie pour inclure des opérations telles que la racine carrée, la racine cubique, le logarithme népérien, le logarithme de base 10, le logarithme de base 2, les fonctions sinusoïdales et leurs inverses. Von Neumann considère également la réduction de cet ensemble en arguant du fait qu'il serait tout à fait possible d'en éliminer la division et la

⁵⁹⁶ Encore qu'il arrive très souvent qu'ils soient simulés sur des machines à architecture Von Neumann.

⁵⁹⁷ Le fonctionnement de ce dispositif tricouche, légataire direct des travaux de la cybernétique de Wiener, repose fondamentalement sur le phénomène de rétroaction, le modèle de neurone formel de McCulloch et Pitts et la loi de Hebb (renforcement synaptique). En 1969, Marvin Minsky et Seymour Papert porteront cependant un coup d'arrêt brutal à cette voie de recherche prometteuse en démontrant qu'il existait une classe entière de problèmes - ceux impliquant la fonction logique XOR - que le Perceptron, du fait même de sa structure, ne pourrait jamais résoudre. Pour les A.N.N., la résurrection viendra de deux sources : tout d'abord l'approche énergétique des réseaux proposée en 1982 par le physicien John Hopfield (CalTech) et qui permet d'analyser leur comportement dans le temps. Ensuite l'algorithme de *backpropagation*, initialement découvert par P. Werbos mais largement promu par D.E. Rumelhart et McClelland dans leur ouvrage *Parallel Distributed Processing : Exploration in the Microstructure of Cognition*. L'algorithme de rétropropagation permettra enfin aux réseaux de neurones artificiels multicouches de résoudre la classe de problèmes intraitables identifiée par Minsky et Papert. De fait, ils seront ainsi promus au rang de machines universelles de Turing. Nous reviendrons sur ce point, et sur les A.N.N. en général, dans la troisième chapitre de ce travail.

multiplication. Cette dernière proposition est très sûrement dictée par le fait que ces deux opérations élémentaires sont les plus coûteuses en termes de temps de calcul. Etant donné qu'il a été mathématiquement démontré que l'on peut les remplacer l'une et l'autre par d'autres méthodes de calcul, plus avantageuses sur ce plan, on peut alors tout à fait imaginer s'en passer. Citant ensuite pour exemple les tables de fonctions et la méthode des approximations successives, il poursuit en précisant que d'autres arrangements, qualifiés de plus « élastiques » que les précédents, sont aussi envisageables. De ce point de vue, et puisque toutes sortes de combinaisons d'opérations de base, à condition qu'elles soient cohérentes, sont légalement réalisables, l'architecture logique qu'il est en train de définir demeure totalement ouverte. Seule la contrainte que représente ici la nécessité de procéder à l'optimisation de la vitesse d'opération de la machine semble en vérité constituer un facteur réellement déterminant (en ceci qu'il est de nature limitative). Quoi que puissent devenir par la suite ces possibles orientations, une chose demeure définitivement acquise : dans tous les cas il sera nécessaire de doter le dispositif d'une unité arithmétique centrale (*central arithmetical part*). Le tout premier élément fonctionnel qu'il vient de distinguer, Von Neumann décide de le nommer *CA* (pour *Central Arithmetical*). Pour paraphraser ici Paul Ceruzzi – qui ailleurs⁵⁹⁸ a pu intituler un de ses articles « Nothing new since Von Neumann » - nous pourrions à notre tour écrire *nothing new since Babbage*. En effet, le module que le mathématicien vient de décrire et qui par la suite deviendra partie intégrante de l'unité centrale de traitement (C.P.U.) de nos ordinateurs remplit exactement le même rôle que celui qui revenait autrefois au *Mill* du *Difference Engine #1*: il s'agit fondamentalement d'un dispositif fonctionnel individualisé capable d'effectuer un certain nombre d'opérations mathématiques. Etant bien entendu qu'ici la nature des composants matériels utilisés est considérée comme parfaitement contingente- le *Mill* du D.E. #1 était mécanique, la *CA* de l'E.D.V.A.C. et des machines de même genre sera électronique – la seule différence notable qui peut être relevée concerne le nombre et le type des opérations que la *central arithmetical part* sera susceptible de réaliser. Sur ce plan donc, il n'est rien de véritablement neuf depuis Charles Babbage. C'est dans les deux sections subséquentes - la première (2.3. *Second : Central control part : CC*) est consacrée aux organes dédiés au *contrôle* de la machine, la seconde (2.4. *Third : Various forms of memory required (a) – (h).*) à sa *mémoire* - que s'opère en vérité la formidable révolution technologique dont Von Neumann est à l'origine. Selon lui le contrôle logique de la machine, spécifié par la séquence strictement ordonnée de ses

⁵⁹⁸ Cet article a notamment fait l'objet d'une publication in [Rojas, Hashagen et al., 2000], pp. 195-217.

opérations, peut être mené plus efficacement si son exécution se trouve confiée à un organe de contrôle centralisé, c'est-à-dire à une unité complètement spécialisée. A ce point, une précision et une discrimination fondamentales vont être opérées. Ainsi écrit-il «

If the device is to be elastic, that is as nearly as possible all purpose, then a distinction must be made between the specific instructions given for and defining a particular problem, and the general control organs which see to it that these instructions – no matter what they are – are carried out. The former must be stored in some way – in existing devices this is done as indicated in 1.2. – the latter are represented by definite operating parts of the device. By the central control we mean this latter function only, and the organs which perform it form the second specific part : CC⁵⁹⁹».

Qu'est-ce que cela signifie ? Quelles conséquences ceci va-t-il avoir sur l'organisation logique et surtout sur la puissance de la machine ? Une première chose doit être repérée. Si, remarque Von Neumann, on souhaite que la machine ait une portée réellement *universelle* (*all purpose*), c'est-à-dire si l'on veut que sa puissance computationnelle soit finalement équivalente à celle d'une machine universelle de Turing, il est nécessaire d'établir clairement un distinguo entre les instructions *spécifiques* qui servent à définir un problème *particulier* à un moment donné et les organes de contrôle précisément chargés de les exécuter. Jusqu'alors la structure physique et le répertoire d'instructions des machines à calculer digitales⁶⁰⁰ étaient très étroitement déterminés par le type même des tâches qu'elles étaient censées réaliser. Il s'agissait donc de dispositifs extrêmement spécialisés – des *one kind computers* nous l'avons déjà dit – dont l'organisation et le fonctionnement, au final, constituait un exact reflet de ce pour quoi elles avaient été précisément construites. De ce fait, leur pouvoir de calcul s'en trouvait nécessairement restreint. L'E.N.I.A.C. par exemple fut au départ construit dans le but exclusif de calculer des tables de tir balistiques. Or comme nous l'avons vu, et avec toutes les conséquences que cela n'a pas manqué d'entraîner, il était extrêmement difficile, voire même impossible, de calculer quoi que ce soit d'autre avec : la structure de l'E.N.I.A.C. était en réalité par trop dépendante de sa fonction mathématique première pour autoriser la réalisation de computations autres que celles qui avaient été prévues à l'origine ou encore, si l'on désire exprimer les choses autrement, sa propre finalité mathématique avait à ce point prescrit les

⁵⁹⁹ Les termes ou expressions « *elastic* », « *all purpose* », « *central control* » et « *the second specific part* » sont soulignés par Von Neumann.

⁶⁰⁰ Si l'on s'en tient à la seule organisation, ceci est encore plus vrai des dispositifs analogiques.

lignes fondamentales de son organisation physique qu'elle empêchait un éventuel accroissement de son domaine de calcul. Bien entendu, et en dépit de son indéniable originalité, le calculateur électronique de la *Moore School* ne constituait pas en cela un « cas à part ». *Mutatis mutandis* la même chose pouvait se trouver vérifiée avec des machines telles que l'A.E., le D.E. #1, l'A.B.C. ou le Mark I (pour faire mention de quelques calculateurs plus récents). En proposant de distinguer ainsi entre les séquences d'instructions – les *programmes* devant être initialement stockés sur des dispositifs du type de ceux cités en 1.2. – et l'organe de contrôle central et générique dont le rôle spécifique consiste à exécuter ces flux sériels de directives formelles en examinant et en coordonnant pour cela l'opération des différentes composantes fonctionnelles du dispositif, Von Neumann cherche à rompre cette espèce de lien d'immanence qui à l'agencement de la machine (autrement dit sa forme), rattachait de manière absolument déterminante la réalisation d'une ou de quelques tâches mathématiques très particulières (c'est-à-dire sa fonction). A la différence notoire de ses devancières, la machine décrite ici par le mathématicien de Princeton ne sera pas réservée à un usage parfaitement déterminé et c'est justement cette indétermination essentielle, cette polyvalence fondamentale, qui lui conférera finalement sa formidable puissance : puisqu'elle n'a pas été conçue pour faire quelque chose en particulier – son organisation logique n'a pas été pensée en vue de l'effectuation d'un ensemble fini de processus bien identifiés - elle pourra alors tout faire ou presque. Le *central control* ou *CC* devra donc être un module interne dédié et générique, c'est-à-dire une unité spécialisée mais de portée universelle, capable de réaliser *tous* les types de problèmes susceptibles d'être définis par des combinaisons légales d'instructions et non plus seulement quelques-uns qui auraient été clairement déterminés à l'avance (à vrai dire en amont du processus d'élaboration du calculateur), en vue de contrôler directement l'opération de ses différents composants. L'apparition d'une unité de commande interne, sorte d'autorité centrale régulatrice et ordonnatrice placée au cœur de cette structure ultra rationnelle, pour ne pas dire panoptique, qu'est l'ordinateur à architecture Von Neumann ouvre ainsi sur un automatisme quasi intégral – la machine se pilote désormais elle-même - autorisant une pleine optimisation de sa vitesse de fonctionnement. Pourvue de ses propres programmes de gestion du système, l'unité de contrôle central sera en effet capable de surveiller automatiquement l'état des différentes parties de la machine (unité arithmétique et logique, mémoire interne, périphériques et canaux d'entrée/sortie), et de commander au moment opportun l'activation d'une ou de plusieurs d'entre elles afin d'accomplir une procédure ou une sous procédure donnée (lesquelles sont spécifiées par les instructions). C'est là le premier pas accompli en direction d'une machine universelle, une première porte ouverte

sur un univers infini de possibles mathématiques et, plus généralement, de possibles informationnels (rappelons que l'emploi du code binaire permet de représenter non seulement des nombres mais aussi des symboles de n'importe quel genre). Le second pas, qui délivrera définitivement la machine et son schéma organisationnel de toute forme de contrainte occasionnelle attachée aux tâches devant être effectuées sera constitué, nous allons le voir maintenant, par l'introduction du concept de mémoire interne.

La *mémoire* centrale de la machine – on ne manquera pas ici de noter l'emploi original d'un terme qui habituellement est réservé à la désignation d'une de nos capacités mentales les plus essentielles dans un contexte assurément technologique - constitue en quelque sorte le pendant interne des différents dispositifs d'enregistrement externes dont Von Neumann a procédé à l'énumération dans la section 1.2. du *First Draft*. En vérité, et si l'on accepte, quel que puisse être le type technique auquel ils appartiennent, de ranger les premiers sous l'appellation générique de mémoire externe (on dirait aujourd'hui mémoire de masse), mémoire interne et mémoire externe ne possèdent que très peu d'attributs communs en dehors précisément de la fonction qu'elles remplissent à savoir le stockage simultané des programmes (y compris les séquences de contrôle de l'ordinateur), et des données sur lesquelles ces derniers sont appelés à opérer. En dehors de ce rôle fondamental qu'elles ont effectivement en partage, peu de choses les rapprochent. Pour commencer, et comme sa dénomination l'indique clairement, la mémoire interne fait partie intégrante de la machine : c'est une sorte de boîte noire au contenu de laquelle l'opérateur n'a pas un accès direct⁶⁰¹. Sa proximité « topographique » avec les autres unités fonctionnelles du dispositif ainsi que les technologies possiblement utilisables pour la réaliser (*e.g.* les lignes délai acoustiques au mercure ou les iconoscopes), font qu'elle offre un temps d'accès extrêmement réduit et ce tant durant les cycles de lecture que lors des cycles d'écriture. Même si elle demeure inférieure, et de loin, à l'extraordinaire vitesse de fonctionnement qui caractérise précisément une machine presque entièrement composée de constituants électroniques, la rapidité d'opération de la mémoire interne est donc des plus satisfaisantes. En contrepartie de cette vitesse, et puisque le volume et la complexité de l'ordinateur ne sont pas indéfiniment extensibles, sa taille ou, ce qui revient au même, sa capacité, se trouve nécessairement limitée (elle doit cependant demeurer suffisante pour autoriser à la fois le stockage et le traitement de problèmes

⁶⁰¹ L'E.D.V.A.C. devait cependant disposer d'une console comportant six tubes moniteurs permettant, en temps réel, de voir notamment les changements dynamiques survenant dans chacune des 32 lignes délai de 32 bytes qu'il comportait. Martin Campbell-Kelly a conçu un émulateur gratuit (freeware) de l'E.D.V.A.C., l'*EDVAC Simulator*, dont la dernière version, pour Mac ou PC, peut-être téléchargée à l'adresse suivante : <http://www.dcs.warwick.ac.uk/~edsac>. Ce petit logiciel remarquable, qui est livré avec un tutorial et quelques programmes originaux, permet parfaitement de se rendre compte de la manière dont cette machine fonctionnait.

complexes⁶⁰²). *A contrario*, les mémoires de masse de la machine – il en existe deux que Von Neumann nomme indifféremment *outside recording medium of the device* ou *R* – sont localisées à l'extérieur du système et communiquent avec lui au moyen de deux canaux spéciaux d'entrée et de sortie respectivement désignés par les symboles alphabétiques *I* et *O* (nous reviendrons sur ce point un peu plus tard). Du fait de cet éloignement spatial – lequel demeure pourtant très relatif - il survient donc toujours une certaine latence entre le moment où une requête d'accès est formulée par l'ordinateur et celui où celle-ci se voit complètement satisfaite. Cette période d'attente, justement, se trouve systématiquement amplifiée en raison même des types techniques auxquels sont susceptibles d'appartenir ces instruments de stockage externes. Que l'on utilise à cette fin, ainsi que le suggère le mathématicien, des cartes perforées, des bandes de télétype, des bandes ou des fils magnétiques ou bien encore des pellicules cinématographiques, toutes ces solutions de stockage impliquent pour leur fabrication que l'on recoure soit à la technologie mécanique, soit à la technologie électromécanique. Or il est bien évident que les différentes vitesses de fonctionnement permises par ces dernières sont très largement inférieures à celle autorisée par l'électronique⁶⁰³. Dans ces conditions on aura donc tout intérêt – mais, nous le verrons, c'est là l'avantage principal qu'il peut effectivement y avoir à disposer d'une mémoire très rapide logée au cœur même d'un système autocontrôlé – à limiter au strict nécessaire le nombre de fois où ces dispositifs externes devront être sollicités (sans quoi la machine demeurera inactive trop longtemps et tout le bénéfice susceptible d'être obtenu grâce à l'emploi massif de composants électroniques à grande vitesse sera perdu). En réalité, les choses sont un tout petit peu plus complexes que nous ne l'avons laissé entendre jusqu'à présent (ne serait-ce que par le fait qu'en définitive tous ces éléments sont nécessairement appelés à interagir les uns avec les autres sous la commande de l'unité de contrôle central). S'il existe assurément deux

⁶⁰² Ce qui inclut bien entendu le stockage des résultats intermédiaires, et ils peuvent être fort nombreux, pouvant survenir au cours de l'effectuation d'une quelconque procédure de calcul.

⁶⁰³ Tout un chacun a pu ou peut faire encore une pareille expérience sans grande difficulté. Il suffit pour cela de disposer d'un petit programme enregistré sur une simple disquette (sa taille doit donc être inférieure ou strictement égale à 1,44 Mo). Dans un premier temps, on lancera directement cette application à partir du lecteur de disquette (un dispositif électromécanique donc). A partir de là, il est possible de constater qu'un certain temps (du reste assorti d'un bruissement assez caractéristique), s'écoule nécessairement entre le moment où l'ordre d'exécution est émis par l'utilisateur et celui où l'application est enfin disponible à l'écran. Si maintenant on procède au transfert ou à la copie du contenu de la disquette sur le disque dur de l'ordinateur et qu'ensuite on lance ladite application à partir de celui-ci, on remarquera que cette période d'attente se trouve considérablement réduite (les disques durs, eux aussi des systèmes électromécaniques, sont tout simplement plus rapides que les lecteurs de disquettes). Dans le cas où cette application aurait été réduite (c'est-à-dire « désactivée » mais non pas fermée), après avoir été lancée une première fois, c'est-à-dire chargée en mémoire interne, sa réactivation, opérée au moyen d'un simple bouton, sera quasiment instantanée. La vitesse de la mémoire interne - elle est aujourd'hui entièrement électronique - est incomparablement plus élevée que celle des disques durs ou des lecteurs de disquette.

types de mémoires, une interne et une externe (soit M et R), et que leur fonction, en dernier lieu, consiste bien à stocker des informations codées, la modalité selon laquelle elles remplissent précisément ce rôle varie grandement en fonction de la position qu'elles occupent dans le dispositif. Von Neumann, nous l'avons déjà dit, a clairement distingué entre la mémoire propre de la machine (M) et ce qu'il a appelé son « médium extérieur d'enregistrement ». Le choix d'un symbole unique, en l'occurrence R , afin de désigner ce médium de stockage externe est ici parfaitement justifié en même temps qu'il s'avère au final quelque peu trompeur ou tout au moins légèrement équivoque. En effet, les plans de l'E.D.V.A.C. ne prévoyaient pas un mais deux dispositifs de ce genre. En quoi, alors, l'utilisation d'un seul littéral pour les symboliser l'un et l'autre constitue-t-elle une option légitime mais susceptible toutefois d'induire en erreur si l'on n'y prend garde ? Fondamentalement, et selon Von Neumann, rien ne s'oppose en fait à ce que ces dispositifs externes de stockage soient de même nature ou au contraire qu'ils diffèrent sur ce plan (de toute façon il s'agira toujours d'instruments mécaniques ou électromécaniques). On pourra donc tout aussi bien utiliser une bobine de fil magnétique en amont et en aval de l'ordinateur tout comme on pourra employer une machine à cartes perforées en entrée et une bande de télétype en sortie (ou inversement, peu importe). Même s'il est évident qu'en pratique on aura très vraisemblablement tendance à privilégier les systèmes présentant les meilleures garanties de rapidité et de fiabilité et donc peut-être une certaine homogénéité technologique, en droit toutes les combinaisons « binaires » possibles demeureront également envisageables. En fait, ce n'est pas tant en s'attachant à la considération de leur type technique – lequel est indifférent sur le plan purement théorique – mais plutôt à celle de la situation qui est la leur au sein du système dans son ensemble qu'il devient véritablement possible de les différencier. Le premier dispositif de stockage, que nous nommerons R_i pour souligner le fait qu'il s'agit d'un instrument d'enregistrement externe placé en entrée de l'ordinateur, sert à supporter de manière *permanente* les programmes et les données qui seront utilisés ensuite par la machine (ils devront tout d'abord être transférés de R_i vers M via le canal I avant de pouvoir faire l'objet d'une exploitation par CC et CA). Il semble alors patent que la quantité de cartons perforés, la longueur du fil magnétique, de la bande de télétype ou encore celle du film cinématographique destinés à cela devra être suffisamment importante pour autoriser à la fois le stockage des algorithmes de contrôle de la machine (ceux-là mêmes requis par le *central control* et spécifiant le problème à traiter), mais aussi celui des données qui lui sont nécessaires pour opérer. Inversement, le système d'enregistrement installé en sortie de l'ordinateur (soit R_o selon notre propre terminologie), n'a nullement besoin de disposer d'une

telle capacité de stockage. On peut rendre raison de ceci assez aisément : une grande partie du matériau numérique traité par la machine est en fait constituée par les séquences de contrôle du *CC*, le programme proprement dit et les données qui lui sont immédiatement liées, en d'autres termes par toutes les informations codées qui se trouvent à l'origine stockées sur R_i (d'où sa capacité non négligeable), avant qu'elles ne se voient automatiquement transférées dans *M* au tout début de la procédure. Tout le reste, à savoir principalement des résultats intermédiaires générés au cours des multiples étapes que peut comprendre un processus de calcul donné devra être conservé *temporairement* en mémoire interne. Ces très nombreuses phases de calcul, auxquelles, encore une fois, l'opérateur n'a pas directement accès, ne sont pas considérées comme pertinentes de son point de vue. En tant que telles, elles peuvent être parfaitement ignorées et il n'est donc pas nécessaire d'en conserver une trace permanente. Seul le résultat final de la computation en cours – la solution du problème spécifié par le programme et les données de départ - devra impérativement faire l'objet d'un enregistrement sur R_o (Von Neumann propose par ailleurs que ce résultat soit systématiquement transféré de *CC* vers *M*, puis de *M* vers R_o via *O*, jamais directement de *CC* vers R_o). Or il apparaît évident que le volume d'information numérique nécessaire à la représentation codée de ce résultat terminal sera dans tous les cas très inférieur à celui requis pour représenter à la fois les algorithmes de contrôle, le problème à traiter et l'ensemble des données de départ (sans même parler de la quantité généralement conséquente d'information correspondant à la représentation des résultats intermédiaires produits en cours de calcul par *CA* et qui doivent momentanément être stockés dans *M*). On peut à partir de là comprendre pourquoi le médium d'enregistrement externe destiné à recueillir les résultats finaux des calculs réalisés par la machine n'a pas besoin de disposer d'une très grande capacité de stockage⁶⁰⁴. Ceux-ci constituent en effet la portion congrue – mais en dernier lieu la fraction la plus significative - de la totalité du matériau numérique qu'elle est appelée à manipuler lorsqu'elle fonctionne. La différence essentielle qui peut alors être repérée entre R_i et R_o réside uniquement en cela : le

⁶⁰⁴ Ainsi que le remarque fort à propos Gérard Chazal dans son introduction à l'édition française de la *Théorie générale et logique des automates* (cf. p. 28), la mémoire externe de l'ordinateur décrit par Von Neumann dans le *First Draft* est « théoriquement infinie ». Sur le plan purement logique, il ne s'agit donc ni plus ni moins que du ruban sans fin qui caractérise les machines universelles de Turing. La prétention à cette infinitude théorique, bien évidemment, doit être abandonnée incontinent dès lors que l'on s'intéresse exclusivement au versant pratique ou technique du problème (ne serait-ce que pour de « simples » raisons d'ordre physique). En même temps, on aura bien soin de noter que l'ensemble des instruments proposés par Von Neumann pour remplir cette fonction offrent un accès sériel à l'information qu'ils permettent de stocker (et pour cause : les dispositifs à accès aléatoire ne seront inventés que plus tard). Etant donné que ce type particulier d'accès implique que l'on fasse défiler tout ou partie du médium sur lequel sont enregistrées les données avant que l'on parvienne enfin à découvrir la séquence d'information spécifiquement recherchée, il y a tout intérêt à ajuster au mieux la longueur de ce dernier en fonction de l'objectif poursuivi afin de réduire au maximum le temps consacré à cette exploration et donc celui où la machine se trouve éventuellement immobilisée.

premier système, du fait de la position particulière qui est la sienne au sein du dispositif, doit être capable de stocker beaucoup d'information, le second, toujours pour le même motif, très peu. Ceci mis à part, il s'agit de deux dispositifs externes (technologiquement identiques ou non), remplissant exactement la même fonction, c'est-à-dire celle consistant à stocker de l'information de façon permanente. En raison même de cela, Von Neumann ne juge pas réellement nécessaire de procéder à leur séparation explicite. C'est pourquoi il les désigne l'un et l'autre en usant d'un seul et unique symbole : *R*.

Tout ceci ayant été clairement précisé, nous pouvons à présent nous intéresser à la mémoire interne du système, autrement dit à cette troisième partie spécifique de l'ordinateur (*third specific part of the device*), qui, dans le texte, est représentée par la lettre *M*. Comment Von Neumann justifie-t-il la présence d'un tel organe au sein de la machine ? En quoi son existence est-elle vraiment nécessaire ? Les réponses à ces interrogations assurément essentielles, et les conséquences qu'il faut nécessairement en tirer, se trouvent respectivement exposées dans le corps des sections 2.4. et 2.5. du *First Draft*. Le mathématicien débute le paragraphe 2.4. en soutenant la chose suivante: « *Any device which is to carry out long and complicated sequences of operations (specifically of calculations) must have a considerable memory* ». Affirmation préliminaire que nous pouvons traduire ainsi : « Tout dispositif appelé à effectuer des séquences d'opérations longues et compliquées (expressément lorsqu'il s'agit de calculs), doit posséder une mémoire [de capacité] considérable ». Notons au passage que dans cette assertion, Von Neumann opère une distinction tout à fait nette entre les séquences d'opérations (longues et compliquées), qu'est capable de réaliser en général la machine dont il est en train de définir les grandes lignes théoriques et une sous catégorie particulière de ces opérations, à savoir celle à laquelle ressortissent les calculs mathématiques. Ainsi se trouve encore attestée la généricité extraordinaire de ce dispositif fort original qu'est l'ordinateur : c'est aussi – mais pas seulement - un calculateur parce que, fondamentalement, il s'agit d'une machine dédiée au traitement de *symboles codés numériquement*. Or il s'avère que ces derniers peuvent effectivement, mais occasionnellement, servir à la spécification de problèmes mathématiques particuliers (sous forme de suites d'instructions constituant des programmes), ainsi qu'à la représentation des quantités qui entrent dès lors en ligne de compte dans les calculs proprement dits (les données). En réalité, toute l'argumentation déployée ensuite par Von Neumann afin de rendre compte de la nécessité pour la machine de disposer d'une mémoire interne « considérable » trouve son point d'appui exclusif dans le champ de la mécanisation des procédures mathématiques et des difficultés notoires que leur exécution ne manque pas de soulever. Qu'il s'agisse de la réalisation des opérations arithmétiques

élémentaires (sous-section *a* de 2.4.), des séquences d'instructions qui servent à gouverner l'effectuation d'un problème compliqué (*b*), de l'emploi de méthodes d'interpolation pour parvenir à une solution (*c*), de la résolution d'équations différentielles partielles de type hyperbolique, parabolique ou total (*e* et *f*), de problèmes traités par approximations successives ou encore de problèmes de triage ou de nature statistique (*g* et *h*), le traitement automatisé de ces différentes questions de complexité variable par l'E.D.V.A.C. implique systématiquement la vérification de l'un ou l'autre, voire des deux éléments suivants. D'une part, la quantité de matériau numérique qu'il est nécessaire de fournir initialement à la machine pour définir le problème en cours et permettre ensuite son exécution est souvent très élevée. Ce matériau devra en effet comprendre, nous l'avons déjà dit, les algorithmes nécessaires au pilotage automatique du système mais aussi l'ensemble des données dont il a besoin pour fonctionner. En conséquence, il apparaît d'emblée que la mémoire interne du dispositif devra être suffisamment vaste pour stocker l'ensemble de ces informations initiales (puisque à l'origine celles-ci doivent être enregistrées sur R_i , la capacité totale offerte par M devra au minimum être strictement égale à celle de R_i). D'autre part, et quelles que puissent être par ailleurs leurs dissemblances de fait, les différents types de problèmes mathématiques énumérés par Von Neumann possèdent ceci en commun qu'ils tendent fréquemment à générer une somme importante de résultats partiels, lesquels constituent autant d'étapes successives sur la voie qui mène à la conclusion du calcul. Or pour parvenir à l'obtention de ce résultat terminal, ces nombreuses solutions intermédiaires forcément produites par le système lorsqu'il travaille doivent pouvoir être stockées quelque part *tant qu'elles lui sont nécessaires pour avancer dans le processus de calcul*. Etant donné que ces séquences d'informations ne sont pas considérées comme pertinentes et qu'en outre leur raison d'être n'a qu'une dimension transitoire, elles pourront donc être automatiquement effacées, écrasées ou réactualisées au fur et à mesure de l'état de progression de la computation. De la sorte il devient possible de libérer au moment opportun de précieux emplacements mémoire qui pourront éventuellement être réutilisés dans la foulée afin de poursuivre le calcul. Ceci signifie que leur enregistrement n'a nullement besoin d'être de nature permanente. Il doit au contraire être provisoire et par conséquent se voir confié à M , c'est-à-dire à la mémoire interne de la machine laquelle, à l'inverse des dispositifs de stockage externes qui sont lents et statiques, possède conjointement les propriétés d'être rapide et dynamique (ainsi son contenu peut-il être automatiquement lu, remis à jour ou supprimé à « volonté » le tout à une vitesse extrêmement élevée). Parvenu à ce stade de l'analyse (2.5. *Third : (Cont.) Memory : M*), Von Neumann énonce une conclusion provisoire mais qui revêt une importance considérable:

« The device requires a considerable memory. While it appeared, that various part of this memory have to perform functions which differ somewhat in their nature and considerably in their purpose, it is nevertheless tempting to treat the entire memory as one organ, and to have its parts as interchangeable as possible for the various functions enumerated above... ».

Le système, répète-t-il encore, nécessite une mémoire (interne) considérable. Cela, il s'est longuement appliqué à le démontrer en faisant appel à différentes classes de problèmes mathématiques tout en expliquant de façon circonstanciée qu'en général ces derniers, lorsqu'ils faisaient l'objet d'un traitement machine, réclamaient et généraient une importante quantité de matériau numérique pour être spécifiés et solutionnés. Ces problèmes, ou plutôt ces fonctions, comme Von Neumann les nomme, diffèrent considérablement les unes des autres à la fois en nature et en finalité. S'il l'on prend par exemple les quelques cas de figure exposés dans la sous-section *a* du paragraphe 2.4. – où il est tour à tour question de faire exécuter à la machine une multiplication, une division, une addition, une soustraction ou l'extraction d'une racine carrée – il est évident que la somme d'informations requise pour spécifier l'un ou l'autre de ces problèmes mathématiques élémentaires apparaîtra forcément moindre si on la compare à celle indispensable à la définition du programme et des données codant pour l'exécution d'une équation différentielle partielle (les conditions initiales et limites de ce genre d'équations représentent déjà à elles seules un volume important de matériau numérique obligatoirement appelé à être conservé en mémoire pendant tout le temps que dure le calcul). Pour poursuivre plus avant avec cette illustration particulière, on remarquera encore que le nombre de résultats partiels produits lors de l'effectuation de n'importe quelle opération arithmétique élémentaire - tout au plus quelques retenues propagées sur plusieurs positions - sera assurément mineur au regard de celui qui sera à coup sûr engendré dans le second cas. En fonction de la complexité du problème devant être traité par le système, laquelle paraît déterminer à la fois la quantité d'informations numériques initiale et celle, supplémentaire et provisoire, créée pendant la réalisation du calcul, il est donc envisageable d'établir une sorte de classification croissante qui partirait des fonctions mathématiques les plus simples, donc de celles qui sont les moins exigeantes en terme d'espace mémoire, pour aboutir finalement aux tâches qui le sont le plus. A partir de là il ne semble pas interdit d'imaginer une mémoire interne fortement compartimentée dont chaque partie individuelle et séparée hériterait ses propriétés dimensionnelles du type spécifique de problèmes dont elle se verrait octroyé la charge (ceci n'excluant pas le respect d'une totale homogénéité technologique). Ceci reviendrait donc à doter le système d'autant de modules de mémoire interne – chacun possédant sa propre taille – qu'il existe de sortes différentes de

fonctions mathématiques. Si sur les plans théorique et technique cette solution pour ainsi dire « bijective » est parfaitement concevable, il ne fait cependant aucun doute quant au fait qu'elle conduirait très probablement à une complexification exagérée de l'architecture de la machine et, corollairement, à l'accroissement de la fréquence des périodes de ralentissement dues à la multiplication des requêtes d'accès croisées. L'objectif poursuivi ici par Von Neumann visant au contraire à simplifier sa structure tout en privilégiant sa généricité et l'optimisation de sa vitesse d'opération, il propose plutôt que la pluralité de dispositifs qui constitue la mémoire interne du système⁶⁰⁵ soit considérée comme un organe unique, une entité complètement intégrée, capable de prendre indifféremment en charge, c'est-à-dire de mémoriser provisoirement, *tous* les programmes et *toutes* les données – celles fournies au départ et celles produites pendant la computation - servant à spécifier et à exécuter *tous* les types de fonctions mathématiques qu'il est effectivement susceptible de pouvoir calculer. Il n'y aura donc pas de lien de détermination directe entre le genre mathématique auquel peuvent appartenir ces problèmes et les attributs des différentes parties de *M* : sur le plan fonctionnel, elles seront complètement interchangeables. Cette proposition théorique originale permet de gagner non seulement en simplicité structurale (on limite considérablement le nombre des constituants de la machine, notamment celui des voies de communication), en vitesse de fonctionnement (on réduit le nombre d'échanges entre les différentes unités de l'ensemble et donc les temps de latence occasionnés lors des transferts d'information), et en universalité (il n'existe en tout et pour tout qu'une seule mémoire interne pour toutes les sortes de problèmes, y compris ceux qui ne relèvent pas de l'ordre mathématique). Afin de mesurer pleinement la portée réellement extraordinaire de cette innovation, peut-être convient-il maintenant de rappeler qu'un calculateur comme l'E.N.I.A.C. était déjà pourvu de registres de faible capacité (donc de petites mémoires électroniques internes). Cependant, et à la différence de la mémoire principale de l'E.D.V.A.C., ces dispositifs faisaient partie intégrante de systèmes distribués, les vingt accumulateurs, qui faisaient à la fois office de mémoires à court terme (pour filer la métaphore cérébrale), *et* d'unités de calcul. Sur l'E.N.I.A.C., la fonction mémorielle et la fonction computationnelle n'étaient donc pas à proprement parler séparées mais plutôt unifiées au sein d'un seul et même élément actif et composite : l'accumulateur. Etant donné cela, le seul matériau numérique que ce calculateur pourtant révolutionnaire se trouvait à même de manipuler à un instant précis était exclusivement constitué par les données courantes mémorisées dans chacun des registres de

⁶⁰⁵ Sur l'E.D.V.A.C. ce seront les 32 lignes acoustiques d'une capacité individuelle de 32 mots.

ses accumulateurs (celles-ci, composées uniquement des valeurs initiales du problème ou de résultats intermédiaires, pouvait être transférées de l'une à l'autre de ces unités en vue d'être additionnées ou soustraites à leur contenu actuel puis se voir ensuite momentanément stockées *in situ* ou bien redirigées vers un autre emplacement mémoire). Quant au « programme » gouvernant le déroulement des opérations de calcul et aux tables de fonctions éventuellement requises pour sa réalisation, ils étaient littéralement construits en « dur » : dans le premier cas il s'agissait comme nous l'avons vu de câbles reliant selon une configuration *ad hoc* la quarantaine d'unités que comptait la machine, dans le second, de boîtiers électroniques spécialisés eux aussi connectés au reste du système par ces lignes électriques. Dans ces conditions, inutile bien entendu de préciser qu'il était tout à fait hors de question d'imaginer charger quoi que soit d'autre dans les petits registres du calculateur que les très brèves séquences de données numériques enregistrées sur des cartons perforés et qui devaient être appelées au fur et à mesure que s'exécutaient la suite ordonnée d'instructions littéralement inscrite dans la disposition particulière de son câblage. D'une certaine façon, la géométrie circonstancielle de la machine représentait donc son programme, autrement dit les différentes opérations qu'elle devait accomplir pour exécuter telle ou telle tâche. Une fois le calculateur configuré pour effectuer un certain calcul – un acte de préparation qui déjà était très loin d'aller de soi – il devenait impossible d'en différer l'exécution. La computation ainsi définie devait être impérativement lancée et poursuivie jusqu'à son issue avant que l'on ne puisse envisager de passer à autre chose, c'est-à-dire à un autre calcul, à un autre programme et, par nécessaire voie de conséquence, à un autre câblage. Le *First Draft of a Report on the EDVAC* institue une rupture véritablement spectaculaire avec ce mode opératoire tout à la fois malcommode et excessivement restrictif. L'organisation logique qui s'y trouve détaillée distingue au total cinq parties ou modules dont la fonction et la position qu'ils occupent au sein du système sont parfaitement identifiées et séparées: 1) l'unité centrale arithmétique (CA); 2) le contrôle central (CC); 3) la mémoire interne (M); 4) le médium externe d'enregistrement du dispositif (R, c'est-à-dire R_i et R_o); 5) les canaux d'entrée et de sortie (I et O). Sur le plan structurel, nous le savons, l'idée d'une complète dissociation entre l'unité arithmétique et les dispositifs de stockage internes de la machine (ici des axes numériques), remonte à Babbage et à son *Analytical Engine*. De même avec celle qui consiste à enregistrer une suite d'instructions de contrôle et des ensembles de données sur des cartes perforées (ou tout autre support remplissant la même fonction de stockage permanent). En cela il nous faut à nouveau rendre un hommage bien légitime à l'intelligence et à la clairvoyance remarquables de ce génie magnifique et infortuné que fut sans contredit possible Charles Babbage.

Cependant, et une fois reconnues la provenance lointaine tout de même que l'importance avérée de cet héritage conceptuel, la comparaison entre le projet inachevé du mathématicien britannique et celui, lourd d'incroyables promesses, de Von Neumann, doit prendre fin. Le principe fondamental qui régit toute l'économie organisationnelle de l'ordinateur – et d'une manière plus générale celle de la plupart des machines de type digital⁶⁰⁶ – est d'une désarmante simplicité (comme toujours, encore fallait-il y penser !). Von Neumann en fait d'ailleurs l'intitulé de la douzième section de la première partie de son ouvrage *Le cerveau et l'ordinateur*. « Un seul organe pour chaque opération de base » : tel est un des axiomes majeurs qui conduiront l'ensemble des réflexions du théoricien concernant le calcul digital automatique.

Là où, avec l'architecture Von Neumann, les choses diffèrent radicalement de tout ce qui avait pu être réalisé auparavant c'est que désormais le contrôle de la machine numérique ne se verra plus directement confié à un câblage électrique ou à un ruban supportant les instructions et les données – toutes sortes de dispositifs de stockage et de pilotage externes donc – mais que celles-ci devront être au contraire *emmagasinées simultanément dans une mémoire interne vaste et rapide puis automatiquement prélevées et exécutées par l'unité de contrôle central de l'ordinateur à partir de ce même emplacement*. Il va de soi que l'introduction de cette nouveauté structurelle cruciale n'entraînera pas l'élimination des lecteurs de cartes perforées et autres unités périphériques d'enregistrement. Mais ces dernières, en lieu et place de contrôler totalement les opérations de la machine comme c'était effectivement le cas autrefois seront à l'avenir seulement employées pour stocker durablement programmes et données et les communiquer à sa mémoire interne (si le dispositif est installé en sortie de la machine, il servira alors à enregistrer les résultats des calculs). En même temps que s'instaure ici une véritable pensée hiérarchique des différentes mémoires du système (élaborée sur la base de leur vitesse d'accès), on assiste donc à un déplacement fonctionnel de tout premier ordre. *Primo*, l'administration de la machine n'est plus du ressort des unités de stockage extérieures mais revient intégralement à l'organe de contrôle central (CC). *Secundo*, la mémoire interne de l'ordinateur est conçue comme ce médium ultrarapide destiné à recevoir provisoirement aussi bien l'algorithme de traitement correspondant au problème considéré que les données sur lesquelles il doit effectuer des transformations. L'importance du rôle imparti aux organes de stockage externes, qui de fait constituent les mémoires les plus lentes de l'ordinateur, s'en trouve alors d'autant diminuée : ils ne servent plus qu'à

⁶⁰⁶ Par opposition avec la structure des dispositifs analogiques où il doit y avoir autant d'organes effecteurs que d'opérations de base définissant le problème mathématique spécifiquement considéré.

l'archivage des programmes et représentent la source fixe à partir de laquelle l'ensemble des informations nécessaires à la machine sera transféré d'un bloc dans sa mémoire principale pour y être ensuite traité. Cette internalisation de la séquence de contrôle du système s'articule fondamentalement autour de la notion de *code* en ceci que c'est l'intuition qu'il est possible de représenter numériquement les données chiffrées ou symboliques du problème *et* la suite structurée d'ordres en définissant le strict déroulement qui, foncièrement, la rend réalisable. Le programme, ou plutôt la série d'instructions qui le composent, se présenteront dorénavant sous la forme d'une séquence ordonnée de *nombres* codant explicitement pour la « signification machine » de celles-ci. Chacun de ces nombres, puisqu'il doit servir à la représentation d'une instruction particulière, devra alors comprendre les différents éléments suivants dans son développement (pour permettre cela, celui-ci se verra organisé sous la forme d'une suite de champs individuels de longueur variable): 1) le code numérique de l'opération élémentaire dont il commande précisément l'effectuation ; 2) le numéro de l'emplacement mémoire spécifique à partir duquel les données sur lesquelles cette instruction doit opérer peuvent être récupérées pour traitement (la mémoire centrale de l'ordinateur, bien que pensée à la manière d'un organe complètement intégré, se trouve ainsi subdivisée de façon sérielle en autant de sous-sections adressables, les registres) ; 3) le numéro de l'emplacement mémoire (registre), où le résultat de cette opération – également un nombre - doit finalement être stocké ; 4) le numéro indiquant l'adresse du registre où le successeur de l'instruction en cours peut être trouvé. Ce schème théorique de base sera bien entendu susceptible de subir certaines variations plus ou moins mineures quant à sa réalisation effective (un nombre, en fonction de sa longueur standard, pourra par exemple autoriser la représentation d'une ou de plusieurs instructions en même temps). Mais l'essentiel est là : les ordres, tout comme les données, seront désormais représentés par des nombres et ces nombres stockés dans des cellules mémorielles individuelles – toutes constituantes homogènes de la mémoire interne de l'ordinateur - spécifiquement identifiables au moyen d'une adresse numérique unique. Ce *modus operandi* totalement inédit, nous allons le voir, entraîne immédiatement deux conséquences pour le moins décisives. Premièrement, et étant donné que la mémoire centrale de la machine est en réalité composée d'un ensemble de registres structuré de manière linéaire (il se « suivent » les uns les autres et leur schéma d'indexage numérique s'organise précisément en fonction de cela), deux types fondamentaux d'adressage sont possibles. Pour commencer, un ordre quelconque stocké à l'adresse de numéro X, une fois son exécution achevée, peut indiquer que son successeur se trouve à l'adresse de numéro X+1 (les entités numériques qui codent pour les instructions comportent toutes un champ

exclusivement réservé à cet usage). Ce déplacement par incrémentation d'une unité de l'adresse de l'instruction en cours de traitement constitue en réalité le cas de figure le plus simple et le plus direct d'adressage puisqu'il procède pour ainsi dire naturellement de la manière dont est organisée la mémoire. Ensuite, il est un autre type d'adressage, nettement plus élaboré que celui que nous d'évoquer, que Von Neumann, dans *Le cerveau et l'ordinateur*, nomme « transfert conditionnel ». Ce dernier consiste en ceci que si certaines conditions numériques se trouvent effectivement satisfaites au moment requis (tel résultat obtenu précédemment est négatif ou bien strictement supérieur à telle valeur préfixée à un instant donné du processus de calcul, etc.), alors le successeur de l'instruction actuellement traitée ne se sera pas localisé à l'adresse $X+1$, comme dans l'exemple précédent, mais à l'adresse Y (la valeur de cette adresse pourra par exemple être égale à $X+3$). Une fois exécutée l'instruction stockée à l'adresse Y , il sera alors parfaitement possible de revenir en arrière pour effectuer l'ordre d'adresse $X+1$ (soit $Y-2$), ou au contraire de poursuivre directement la procédure de calcul à partir de Y (le nombre indiquant l'emplacement de l'ordre suivant sera alors égal à $Y+1$ ou éventuellement à $Y+n$ si le champ adresse de cette instruction comprend un nouveau branchement conditionnel). Il va de soi que dans l'hypothèse où une condition spécifique de branchement ne se trouverait pas remplie (e.g. le résultat qui détermine précisément la réalisation de cette bifurcation est positif en lieu et place d'être négatif), l'adresse du successeur de l'instruction stockée à l'emplacement de numéro X sera bien $X+1$ et non Y . Cette approche fort singulière du contrôle automatique de la machine autorise on le voit la construction de structures programmatiques incomparablement plus puissantes et plus souples que les simples schèmes itératifs que supportaient habituellement les diverses modalités de pilotage par séquence qui l'avaient précédée. En favorisant ainsi les renvois alternés, les références entrecroisées, les imbrications conditionnelles, les transferts discontinus, elle ouvre sur la multiplication des combinaisons relationnelles dynamiques au sein même de la suite d'instructions codées qui détermine pourtant strictement le comportement finalisé de la machine. Mais l'extraordinaire gain de flexibilité réalisé au moyen de cette méthode de contrôle si révolutionnaire ne se résume pas à cela seul. Puisqu'à l'instar des données sur lesquelles ils doivent opérer les ordres qui composent le programme de la machine sont représentés sous forme numérique, ces derniers pourront subir le cas échéant les mêmes transformations mathématiques que celles qu'ils permettent d'effectuer sur les données. En d'autres termes, et avec cela, *l'ordinateur devient capable de modifier automatiquement ses propres instructions* – son propre programme – étant donné qu'il s'agit également d'une série de nombres contenus dans certains des registres de sa mémoire interne.

A la pesanteur et la fixité imposées naguère par la nature concrète des anciennes modalités de contrôle par séquence succèdent donc la flexibilité et l'universalité offertes par l'immatérialité d'un code intégralement numérique qui autorise tout à la fois la représentation de l'algorithme de traitement de la machine et celle de ses données. Il résulte de cela que dans la mémoire de l'ordinateur tout n'est plus que nombres et que ce « tout » peut par conséquent être traité, manipulé et transformé comme tel.

Revenons à présent à l'étude du *First Draft of a Report on the EDVAC*. Dans la section 2.6. de ce document (2.6 *CC, CA (together : C), M are together the associative parts...*), Von Neumann établit une correspondance directe entre les trois parties de la machine qui viennent d'être spécifiées – soit *CA*, *CC* et *M* – et les neurones du système nerveux humain pour aussitôt s'interroger sur ce que devront être alors les « neurones » afférents et efférents (équivalents d'une part aux neurones sensoriels et d'autre part aux motoneurones du cerveau), qui en définitive permettront au système de communiquer en permanence avec son environnement extérieur immédiat. Ainsi écrit-il: « *The three specific parts CA, CC (together C) and M correspond to the associative neurons in the human nervous system. It remains to discuss the equivalents of the sensory or afferent and the motor of efferent neurons* ».

Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point déterminant un peu plus tard mais à ce stade, il est déjà permis de voir combien l'analogie avec les composants élémentaires des systèmes nerveux central et périphérique humains (S.N.C. et S.N.P.), joue un rôle directeur absolument fondamental dans le processus intellectuel qui conduit tout à la fois à la définition fonctionnelle des différentes parties de la machine ainsi qu'à la détermination de leur organisation et de leurs schémas d'interaction. Le fait que l'ordinateur soit un dispositif polyvalent capable de manipuler automatiquement des symboles et qu'il se trouve en outre doté d'un organe appelé « mémoire » contribue déjà largement à sanctionner cette analogie fondatrice avec l'encéphale et ses propriétés supérieures⁶⁰⁷. Mais comme nous ne tarderons pas à le voir, celle-ci se trouvera encore plus solidement affirmée par la suite (plus particulièrement dans la quatrième partie du texte qui fort explicitement s'intitule « *Elements, Synchronism Neuron Analogy* »).

⁶⁰⁷ Si tant est bien entendu que l'on s'accorde à reconnaître l'hypothèse générale qui postule que cette entité quelque peu « vaporeuse » que l'on nomme « esprit » ou « pensée » résulte en réalité de l'activité dynamique d'un cerveau vivant placé en interaction avec ses environnements interne (le corps et le cerveau lui-même), et externe (le milieu naturel dans lequel l'organisme se trouve de fait placé et dans lequel il doit en permanence œuvrer pour préserver son intégrité, c'est-à-dire maintenir ou augmenter ses chances de survie).

Maintenant, on peut légitimement s'interroger sur ce qui permet de fonder un pareil rapprochement entre ce que Von Neumann nomme neurones associatifs du système nerveux humain et les différentes parties de l'ordinateur dont nous venons de faire mention un peu plus haut. En réalité, et quant on y regarde de plus près, cette mise en relation ne manque pas de surprendre. Les neurones, quel que puisse être par ailleurs le type cytomorphologique particulier auquel ils appartiennent (fusiforme, conique, polyédrique, sphérique, pyramidal, étoilé, à arborescence isodendritique, allodendritique ou idiodendritique, etc.), sont on le sait les composants cellulaires élémentaires du névraxe et du système nerveux périphérique. A moins bien entendu que l'on ne décide de les considérer à la manière du chimiste ou du biologiste moléculaire pour lesquels ils constituent autant de systèmes individuels de macromolécules placées en interaction permanente, les neurones représentent donc les unités de base à partir desquelles l'organe cérébral se construit génétiquement et épigénétiquement (c'est là le point de vue qu'adoptent en général le neurobiologiste et l'embryologiste). De ce fait, n'est-il donc pas étrange de vouloir procéder à l'instauration d'une correspondance analogique entre ces constituants organiques élémentaires extrêmement différenciés et trois des parties principales de l'ordinateur sachant que ces dernières sont en réalité des unités hautement intégrées - elles sont toutes composées de multiples éléments actifs - et non des composants ultimes de la machine ? De prime abord, il y a tout lieu de subodorer une certaine confusion catégorielle puisque ce qui se trouve mis en rapport ici c'est *l'élément de base* du cerveau (un neurone est un simple biologique qui relève de l'ordre microscopique), et trois des principaux *centres fonctionnels* de la machine (lesquels appartiennent au champ du macroscopique). Une telle analogie aurait sans doute paru moins discutable s'il avait été question de conjoindre le *central arithmetical*, le *central control* ou la mémoire interne de l'ordinateur avec l'une ou l'autre des différentes *aires* corticales ou subcorticales que compte effectivement l'encéphale humain. Se peut-il alors vraiment que Von Neumann se soit laissé aller à commettre une pareille erreur ? N'a-t-il pas vu qu'il existait un différentiel de complexité considérable entre les cellules du cerveau et les différentes unités de la machine révolutionnaire dont il décrit l'organisation dans le *First Draft* ? Il va sans dire que la réponse que nous nous devons d'apporter immédiatement à ces deux interrogations doit revêtir forme négative (on sait bien par ailleurs que Von Neumann était très fin connaisseur de la neurologie de son époque, ce qui d'emblée permet de rejeter sans appel l'hypothèse d'une méprise involontaire). L'analogie ou le schéma d'équivalence que se propose de mettre en place le mathématicien à ce stade de l'analyse n'a en fait rien à voir avec la complexion intime (élémentaire ou modulaire, simple ou composée), qui peut être celle des neurones et

des différentes parties de l'ordinateur. En réalité, elle fait pleinement sens dès lors que l'on s'intéresse au versant purement fonctionnel du problème. Qu'est-ce donc à dire ? En simplifiant à outrance, notamment en taisant volontairement la multiplicité de processus chimiques sur lesquels repose l'économie intracellulaire, il est possible de décrire le neurone comme une cellule composée de deux éléments distincts : le pérykarion ou soma (c'est-à-dire le corps cellulaire principal délimité par une membrane plasmique), et les neurites. Ces neurites, qui constituent les prolongements du pérykarion, peuvent appartenir à deux catégories différentes : les axones et les dendrites. Il existe de nombreuses dissimilarités entre axones et dendrites dont certaines sont frappantes – entendre immédiatement perceptibles si l'on utilise par exemple un quelconque procédé de microscopie optique pour visualiser les cellules - et d'autres le sont moins. Un neurone ne possède par exemple qu'un seul axone alors que ses dendrites sont habituellement multiples. Par ailleurs ces dendrites sont en général très courts alors que dans certains cas la longueur de l'axone peut atteindre un mètre (c'est ce qui advient par exemple avec les neurones de projection, encore appelés neurones de Golgi type I). En tant qu'individu cellulaire, le neurone possède trois propriétés ou aptitudes distinctives : 1) il est capable de *répondre* à une excitation entrante par la formation d'un influx nerveux ; 2) il est capable de *propager* cet influx le long de ses prolongements (dendrites et axone); 3) en dépit de la distance qui est susceptible de les séparer, il peut *transmettre* cet état d'excitation (cet influx), à d'autres cellules (celles-ci ne sont pas forcément nerveuses, elles peuvent aussi être musculaires, glandulaires ou sensorielles). La transmission de cette excitation entre deux cellules nerveuses s'effectue par l'intermédiaire de mécanismes électrochimiques ou électrotoniques extrêmement complexes survenant dans des zones de jonction respectivement appelées synapses et éphapses (le substantif « synapse », introduit en 1897 par le physiologiste britannique Sherrington, est dérivé du grec συναπτω qui signifie « j'attache », « je lie »). La qualité la plus fondamentale de ces structures de liaison très spécialisées est qu'elles ne peuvent transmettre l'excitation que dans un sens, ce qui implique que les divers prolongements nerveux qui naissent à la périphérie du pérykarion subissent une polarisation dynamique. C'est cette propriété qui, fondamentalement, permet de faire définitivement le départ entre les deux types de neurites qui partent du soma neuronal. Les dendrites *reçoivent* ainsi le signal excitateur d'autres fibres nerveuses et le transmettent uniquement en direction du corps du neurone. Ce sont donc des voies afférentes (ou entrantes) qui ont pour fonction essentielle de conduire l'influx nerveux dans le sens cellulipète. A l'inverse, l'axone propage cet influx dans le sens cellulifuge, autrement dit il le communique, via synapses et/ou éphapses, en direction d'une autre cellule.

Il s'agit par conséquent d'une voie de communication efférente ou sortante. Encore une fois, les quelques explications que nous venons tout juste de donner ne constituent qu'un reflet excessivement simplifié de la structure et du fonctionnement réels du neurone. C'est un peu comme si, pour expliquer la structure de l'atome, nous choissions de nous en remettre au modèle de Bohr en lieu et place de nous référer au modèle quantique, nettement plus complexe et contre intuitif – donc sûrement plus fidèle à la « réalité » atomique – que ne saurait jamais l'être le paradigme planétaire conçu en 1913 par le physicien danois. Le modèle de Bohr possède nombre de vertus – notamment pédagogiques - ce qui explique en grande partie pourquoi il se trouve encore à ce jour si largement affectonné par le grand public. En contrepartie bien évidemment, il travestit si outrageusement – et à vrai dire si tôt dans le parcours éducatif des individus qui le reçoivent- ce qu'il prétend expliquer qu'il tend nécessairement à institutionnaliser dans le champ des non spécialistes certaines idées tenaces qui, sur le plan explicatif, ne correspondent en rien à ce qu'est réellement la structure de l'atome. Il va de soi que nous ne prétendons pas que la compréhension du modèle atomique quantique est chose aisée. En fait c'est tout le contraire. Mais cela ne signifie pas non plus qu'il faille se contenter de voir dans le modèle de Bohr une véritable fin en soi. Tout au plus s'agit-il d'une étape préliminaire, d'une sorte de prolégomènes destinée à de jeunes esprits ou plus généralement à des néophytes en la matière, (éventuellement) appelées à être dépassées lorsque ces derniers auront acquis la maturité intellectuelle et l'appareillage conceptuel impérativement requis pour cela. Rien, bien sûr, n'interdit que l'on conçoive l'atome à la manière d'un petit système solaire où les électrons (les « planètes ») tourbillonneraient autour du noyau (le « soleil ») en changeant de temps à autre de trajectoire orbitale. Rien... à condition de ne pas en rester là, ou tout au moins de ne pas tenir cette modélisation réductrice comme un outil scientifique solide traduisant fidèlement la vérité du phénomène naturel dont il est censé rendre compte (c'est malheureusement ce qui se produit parfois). Sa fonction didactique actuelle consiste à ouvrir sur une réalité microscopique qui ne saurait être qualifiée autrement que de vertigineuse tant elle va à l'encontre de nos habituels repères macroscopiques et nous mène aux confins d'une étrangeté constitutive qui se refuse obstinément à une saisie opérable par nos concepts courants. Elle ne consiste pas à se refermer sur elle-même en obturant du même coup l'accès privilégié qui conduit à cet univers fascinant. Ici comme ailleurs, il convient donc de ne pas confondre le début du voyage avec son terme, même si en l'occurrence celui-ci demeure particulièrement incertain et troublant. Il en va (presque) de même avec le neurone. Comme nous l'avons fait nous-mêmes, on le présente souvent à la façon d'une structure tripartite intégrée – dendrites (D) → soma (S) →

axone (A) - capable d'établir, par l'entremise de ses neurites (D et A), un certain nombre de connexions avec d'autres cellules nerveuses voisines ou éloignées. Le schéma habituellement retenu est alors le suivant : (... → S → A) → (D → S → A) → (D → S → ...). Hors les choses sont loin d'être aussi simples. Qu'il nous soit permis ici, avant de poursuivre le fil de notre réflexion, de donner un très léger aperçu de cela. Tout d'abord un neurone unique est en moyenne capable d'établir entre 10^3 et 10^4 connexions avec d'autres cellules (comme précisé plus haut, celles-ci ne sont pas forcément nerveuses). Le type structurel qui préside à l'organisation du système nerveux, de ce fait, est massivement réticulaire, non pas « sagement » linéaire. Sachant que le nombre de neurones compris dans le cerveau humain est généralement évalué à 10^{11} et que celui des connexions synaptiques s'établit dans un intervalle allant de 10^{14} à 10^{15} (soit $10^{11} \times 10^3$ ou $10^{11} \times 10^4$), il est permis de saisir au moins intuitivement le caractère proprement inextricable de l'enchevêtrement de fibres liantes et de cellules qui composent névraxe et S.N.P. (dans l'*Homme neuronal*, Jean-Pierre Changeux indique que si nous pouvions dénombrer un millier de synapses par seconde il s'écoulerait de trois à trente mille ans avant que nous ne les ayons toutes comptées !). Mais ce n'est pas tout. A tort, on présente quasi systématiquement les liaisons interneuronales comme participant d'un type unique : un axone se voit ainsi associé à une ramification dendritique qui conduit au pérykarion d'un autre neurone duquel part un nouvel axone et ainsi de suite... Or les connexions axono-dendritiques ne sont pas les seules qui soient susceptibles d'être repérées dans la structure fine du cerveau. Entre autres arrangements associatifs possibles, il existe également des jonctions axono-axonales, des liaisons axono-somatiques ou dendrito-somatiques ainsi que des rattachements dendrito-dendritiques. L'éventail des potentialités combinatoires neuronales, on le voit, est donc loin de se réduire à l'association axono-dendritique si ordinairement mise en avant dans bien des textes et articles (à décharge, il est vrai aussi qu'elle est la plus fréquente). Nous n'examinerons pas en détail les processus électrochimiques compliqués grâce auxquels l'influx nerveux passe d'un pôle à l'autre du neurone avant qu'il ne se trouve en mesure d'en exciter un autre via les jonctions synaptiques (ces processus seront mis en lumière par Hodgkin et Huxley en 1952, c'est-à-dire à peu près au moment où fut introduite la microscopie électronique). Disons seulement qu'au repos (lorsque aucune excitation ne se produit), il existe une différence naturelle de potentiel électrique (le potentiel de repos qui se mesure en millivolts), entre la paroi interne et la paroi externe de la membrane neuronale (au niveau de ce « barrage » se forme donc une sorte de « pile » énergétique). Ce différentiel est provoqué par l'écart de concentrations ioniques qui existe entre le milieu intracellulaire (où la teneur en ions K^+ est extrêmement élevée) et le

milieu extracellulaire (où la proportion d'ions Na^+ et Cl^- est jusqu'à 30 fois plus élevée que celle décelable dans le cytoplasme). Lorsque le neurone se trouve soumis à une excitation électrique provoquée (naturellement ou artificiellement), son potentiel membranaire commence par subir des affaiblissements légers et passagers. Quand cette stimulation entrante parvient à abaisser suffisamment le potentiel de repos du neurone, c'est-à-dire quand, sous son action, celui chute en deçà d'un certain seuil critique (celui-ci dépend étroitement de la nature de la préparation cellulaire spécifiquement étudiée), ce potentiel subit alors une brutale inversion de polarité. Il passe ainsi du signe moins au signe plus en à peine un dixième de milliseconde, d'où le caractère binaire, « tout ou rien », si souvent prêté à l'économie du neurone. Ce phénomène fulgurant, qui permet donc de rendre compte de l'apparition explosive puis de la diffusion autoentretenu de la réponse neuronale, se nomme « potentiel d'action ». Extrêmement bref – sa durée peut être de l'ordre d'une milliseconde - il survient en une zone ponctuelle des extrémités fibreuses ou du soma du neurone et se propage sur toute la longueur de ce dernier jusqu'à atteindre finalement les secteurs synaptiques de son axone, lesquels, une fois « activés », permettront par voie chimique ou électrotonique la transmission de l'excitation sortante aux dendrites ou au péricaryon des neurones auxquels il est connecté. Notons que ces soudaines modifications de potentiel s'accompagnent toujours de divers phénomènes synchrones parmi lesquels figurent des variations de perméabilité membranaire, une augmentation ponctuelle de la conductance de la surface cellulaire ainsi que l'apparition de processus autocatalytiques. Le retour progressif à l'équilibre ionique normal et le maintien du potentiel de repos ainsi restauré après la phase d'excitation neuronique sont ensuite favorisés par l'action conjuguée de pompes enzymatiques (ATPase) et la respiration cellulaire (laquelle produit l'adénosine triphosphate, sorte de « monnaie d'échange énergétique » pour reprendre ici la formule de J.-P. Changeux, que dégradent précisément les pompes ATPase). Là où les choses tendent à se compliquer nettement, c'est qu'étant donné que chaque neurone peut être simultanément connecté à plusieurs milliers d'autres cellules, un signal entrant – qui en outre peut être *excitateur* ou *inhibiteur* - n'arrive pour ainsi dire jamais seul. La situation ou l'état du neurone, à un moment particulier, dépend par conséquent de la sommation de ces multiples stimulations afférentes de nature « antinomique ». Le secteur où s'effectue leur intégration – lequel déterminera au final si oui ou non et quand le neurone doit faire « feu » - correspond au cône d'émergence de l'axone, zone qui possède la propriété de présenter un seuil critique d'excitation légèrement inférieur à celui de la membrane cellulaire. Les quelques éléments de neurologie fondamentale que nous nous sommes permis de rappeler ici, malheureusement, ne rendent que très partiellement

raison de la complexité réelle qui est celle à la fois de la structure et du *modus functionale* du neurone. A dire vrai, mais on s'en doute sûrement, notre prétention initiale n'était pas autre. En optant volontairement pour ce niveau de résolution explicative « médian », il s'agissait pour nous d'exposer un certain nombre de points – quelques-uns d'ordre général, d'autres moins – dont nous jugions la présentation ou le rappel nécessaires à la compréhension de certains des développements qui seront faits ultérieurement dans le *First Draft*, rien de plus.

Quand Von Neumann, justement, affirme de trois des parties de l'ordinateur – *CA*, *CC* et *M* – qu'elles correspondent aux *neurones associatifs* du système nerveux humain, il est fort loin de prétendre qu'il s'agit de cellules nerveuses pas plus, bien entendu, qu'il ne soutient que ces dernières participent du même niveau de complexité que celui qui caractérise précisément ces entités organiques. L'analogie, en réalité, joue ailleurs. Ainsi que nous l'avons vu, les neurones possèdent cette étonnante propriété plastique qui consiste à pouvoir établir de très nombreuses liaisons dynamiques afférentes et efférentes avec d'autres cellules voisines ou éloignées. Cette connectivité incroyablement massive - est-il seulement besoin de le préciser - revêt une importance considérable, à vrai dire cruciale car proprement vitale, puisque c'est elle qui fonde et autorise, en tout cas avons-nous la faiblesse de le croire, la totalité de nos activités cognitives (que celles-ci soient conscientes ou infra-conscientes, supérieures ou inférieures). Nous connaissons fort bien la réticence viscérale dont certains font immanquablement montre dès lors qu'il s'agit d'envisager l'idée (pour eux abominablement hérétique) que l'esprit – la sacro-sainte conscience qu'ils n'ont de cesse de célébrer en des manières parfois bien irrationnelles – ne constitue rien d'autre que la résultante prodigieusement élaborée de cette activité cérébrale que, pour les plus immodérés d'entre eux, ils se plaisent à abhorrer ou à savamment ignorer⁶⁰⁸. Mais laissons là de côté de tels extrêmes, ils ne nous intéressent pas directement...

⁶⁰⁸ A une époque, Ere du Verseau nous dit-on, où l'astrologie et les autres inepties de même acabit se découvrent une nouvelle vigueur, à une époque, disions-nous, où les prêtres autoproclamés et les bigots crédules de ces néocultes vaporeux ne rechignent même plus à s'approprier certains des concepts les plus élaborés de la science moderne - grâce à l'action inlassable de ces esprits éclairés il existe désormais une psychologie quantique (*sic*), une morale quantique (*sic*), une théologie et une immortalité quantique – la vigilance et l'espoir que nous plaçons en la science sont plus que jamais de mise. En fait, les choses prêteraient presque à rire si elles ne prenaient parfois une tournure aussi pathétique (au mieux), ou bien dramatique (au pire)... Que l'on s'évertue à vouloir réenchanter un monde dont on estime que sa « magie » ou sa « poésie tellurique » se sont épuisées jusqu'à l'intolérable, soit. Après tout, dit-on, la nature a horreur du « vide ». Que l'on vilipende et incrimine la science pour cela, c'est un autre problème. Nous croyons au contraire que les mystères d'autrefois et les anciennes constructions intellectuelles qui prétendaient expliquer l'inexplicable, s'ils ont effectivement volé en éclats sous les coups de boutoir patients de l'expérimentation et de la théorisation physico-mathématique, ont fait place à des merveilles dont l'élégance et la pureté sont propres à conduire à leurs confins les imaginations et les entendements les plus fertiles. Il va sans dire que nous tenons la réémergence et la montée en puissance de ces spiritualismes dogmatiques – voire sectaires – comme des manifestations extrêmement alarmantes de la récession de la science et de la rationalité dans nos sociétés occidentales (laquelle est d'ailleurs largement

L'analogie neurones associatifs/parties de l'ordinateur à laquelle recourt Von Neumann au début de la section 2.6. du *First Draft* impose que nous nous représentions l'organisation générale de la machine à la manière de celle dont est *globalement* structuré le cerveau humain. Ainsi le *trium* formé par le centre arithmétique, le centre de contrôle et l'organe de mémoire constituerait-il une sorte de névraxe – un système nerveux central - extrêmement simplifié dont chacune des parties individuelles, *CA*, *CC* et *M*, serait alors équivalente à un neurone. A l'instar de leurs analogues organiques qui tendent à s'associer massivement, mais toutes proportions gardées s'entend, ces modules fonctionnels sont interconnectés les uns aux autres par l'entremise d'un certain nombre de voies de communication dédiées (la spécification de la géométrie de l'ensemble de ces liaisons fixes demeurant bien évidemment le seul fait de l'homme). Comme les cellules nerveuses auxquelles, selon Von Neumann, ils correspondent, le centre arithmétique, le centre de contrôle et la mémoire de l'ordinateur sont donc appelés à échanger en permanence de l'information entre eux (telle est précisément la fonction que sont appelés à remplir ces divers canaux de communication). Or, ainsi que le précise l'auteur: « *All transfers of numerical (or other) information between parts C [i.e. CA et CC] and M of the device must be effected by the mechanisms contained in these parts* ». En d'autres termes, chacune des trois parties principales que compte l'ordinateur – lesquelles constituent pour ainsi dire son « milieu interne » - dispose tout comme les neurones biologiques de mécanismes propres qui lui permettent au moment voulu de recevoir ou d'émettre automatiquement des signaux informationnels à partir de ou bien en direction des deux autres modules (sous contrôle permanent du *CC*, il pourra par exemple s'agir de transférer certaines données numériques stockées dans *M* vers *CA* puis, une fois celles-ci traitées, de router le résultat de cette opération contenu dans *CA* vers un nouvel emplacement de *M*). Condition *sine qua non* – tout à la fois nécessaire et évidente – pour que de tels échanges puissent effectivement avoir lieu entre *CC*, *CA* et *M*, de l'information doit impérativement être présente *dans* la machine qui puisse faire l'objet de ces transferts. Or justement, lors de sa mise en opération, aucune des trois parties de l'ordinateur, et tout particulièrement sa mémoire, ne contient quoi que ce soit de cette nature: à ce stade c'est donc un instrument « vide » incapable d'effectuer une quelconque opération, s'agirait-il même de la plus simple. Là encore, l'analogie avec le

encouragée par les médias). En même temps il est vrai que le marché du paranormal, qui lui n'a rien de « quantique », semble représenter une manne financière quasi inexhaustible. *Naturam expelles furca, tamen usque recurret...*

cerveau et son fonctionnement se doit d'être convoquée. Lorsque Von Neumann évoque les dispositifs grâce auxquels cette information est susceptible d'être fournie à l'ordinateur depuis *l'extérieur*, soit ses organes d'entrée (*input organs of the device*), ou bien au contraire d'être restituée par la machine une fois traitée, soit ses organes de sortie (*output organs of the device*), il les compare respectivement à des neurones sensoriels (ou neurones afférents) et à des motoneurones (ou neurones efférents). Au « système nerveux central » déjà constitué par le centre de contrôle, le centre arithmétique, la mémoire interne et les différentes voies de communication qui les relient vient donc s'adjoindre un deuxième ensemble de dispositifs – *R*, *I* et *O* formeront ainsi le « milieu externe » de la machine – dont la fonction est cette fois comparable à celle du système nerveux périphérique du cerveau humain. Chacun, même s'il peut tout à fait légitimement se refuser à accepter le modèle théorique qui définit l'activité cérébrale comme une sorte de traitement informationnel (au schéma « input → traitement → output » qui caractérise le mode de fonctionnement des ordinateurs correspondrait ainsi le schéma « sensations → pensée → action » chez les agents intelligents), s'accordera sans nul doute à reconnaître que le cerveau ne saurait être raisonnablement considéré à la manière d'un organe existant et « agissant » de façon absolument autarcique. Le cerveau, en effet, est en permanence soumis à des ensembles de stimuli endogènes et exogènes. Dans son ouvrage *Comprendre notre cerveau*, Jacques-Michel Robert nomme « information intéroceptive » le premier type de stimuli, « information extéroceptive » le second. Appartiennent notamment au premier genre les complexes mécanismes nerveux et musculaires infracérébraux (ou inconscients) qui entrent en jeu lorsque l'on marche ou que l'on adopte la station verticale.

« *Par la voie de la sensibilité dite « profonde » écrit J.-M. Robert, nous sommes informés de la position de nos membres ou segments de membres. C'est cette voie qu'attaquait la syphilis dans le tabès... Par la régulation fine et inconsciente du tonus et le jeu de contractions adaptées des muscles striés, aisé de la vue et des organes de l'équilibre, nous restons debout, inconsciemment, dans un véhicule cahotant*⁶⁰⁹ ». Un autre exemple de ce type est le mécanisme de la soif – le mot n'est pas trop fort - que Jean-Pierre Changeux présente dans l'*Homme neuronal* :

« *On se met à boire à la suite d'une perte d'eau, par exemple après un effort. Cette perte d'eau entraîne une diminution du volume du sang, dont le contenu en sels change. Cette variation de propriétés physico-chimiques va déclencher, au niveau du système nerveux, la*

⁶⁰⁹ In [Robert, 1982], pp. 23-24.

prise de boisson. Seuls quelques neurones y participent. Ils sont localisés dans une région précise de l'encéphale, l'hypothalamus, situé, comme son nom l'indique, au dessous du thalamus. Stimulons électriquement, chez le rat, ce groupe de neurones : celui-ci boit sans s'arrêter. Enlevons ce centre : l'animal ne boit plus... Enregistrons maintenant leur activité afin d'identifier une substance qui les active : un « hypothétique médiateur » de la soif. Celui-ci a été identifié. Il fait partie de ces nombreux peptides que l'on retrouve servant ici d'hormone, là de neurotransmetteur. Il se compose de l'enchaînement de huit acides aminés et son nom est l'angiotensine II. Injectons-là dans le sang ou appliquons-là directement au niveau des neurones « spécialisés » de l'hypothalamus. Des rafales d'impulsions apparaissent... L'angiotensine II déclenche la mise en marche des « horloges » à impulsions présentes dans l'hypothalamus. Lorsque la concentration d'angiotensine II dépasse un seuil, l'animal ne tarde pas à boire. Dans le système étudié, l'angiotensine II n'est pas à proprement parler un neurotransmetteur, car elle n'est pas libérée par des terminaisons nerveuses. Elle informe néanmoins le système nerveux de l'état de crise provoqué par le manque d'eau. Le rein qui, comme on le sait, assure l'élimination d'eau par l'urine, joue le rôle d'informateur. Le volume du sang baisse-t-il à la suite d'une perte d'eau ? Le rein réagit par la production d'une enzyme qui, indirectement, provoque l'apparition d'angiotensine II dans le sang. Sa concentration circulante monte et suffit pour exciter les neurones du centre de la soif⁶¹⁰ ».

Quant ils fonctionnent normalement, les organes et les glandes (par exemple le système cardio-vasculaire, l'appareil urinaire, le tube digestif, le système broncho-pulmonaire, les glandes salivaires, le foie, le pancréas), ne se manifestent jamais à la conscience (sauf à éprouver de la douleur, nous ne sommes jamais conscients de l'état actuel de nos viscères). L'équilibre interne de l'organisme, gage de son intégrité, est en permanence assuré par de complexes mécanismes chimiques d'autorégulation. Lorsque des écarts physiologiques viennent à se produire dans le corps - dans le cas de la soif le volume du sang baisse et sa teneur en sels diminue, dans celui de la faim on enregistre notamment un phénomène de glucoprivation cellulaire, ou glycopénie – des chimiorécepteurs spécialisés (localisés sur le rein, le foie), détectent ces variations (en l'occurrence ces déficits), et conduisent les organes concernés à sécréter des substances chimiques médiatrices spécifiques (comme l'angiotensine II) qui, une fois qu'elles parviennent en certaines zones du système nerveux central par voie

⁶¹⁰ In [Changeux, 1983], pp. 133-134.

hormonale, sanguine, ou nerveuse, autant de circuits afférents donc, les « renseignent » sur cet état de manque et les amènent à provoquer rapidement une réponse appropriée: ce seront alors la sensation de faim et la sensation de soif qui, éprouvées de façon consciente par l'organisme, détermineront l'apparition d'une conduite comportementale spécifiquement adaptée à la situation physiologique courante. La sensation de faim commandera le comportement moteur de recherche, de sélection et de prise alimentaire afin d'assurer la restauration de l'équilibre initial du bilan énergétique et de matière de l'organisme. *Ibidem* bien sûr avec la soif.

Ce ne sont là que deux exemples parmi bien d'autres possibles et il est clairement évident que la manière dont nous les avons présentés ne prétend en aucun cas rendre véritablement justice à la complexité et à la finesse des mécanismes biologiques qu'ils impliquent. Reste que de pareils phénomènes d'autorégulation se produisent en permanence dans le corps sans que nous le sachions – nous savons effectivement que nous avons soif mais ce n'est pas pour autant que nous avons « vu ou senti » notre volume sanguin diminuer ; cela, et à condition seulement de disposer de quelques connaissances en la matière, nous le pouvons inférer *a posteriori* quand nous éprouvons effectivement le désir de boire - et que le cerveau ne cesse de jouer ici un rôle absolument prépondérant. Dans tous les cas, les stimuli intéroceptifs provoqués par les éventuelles variations de l'équilibre interne de l'organisme empruntent des canaux afférents, parviennent en des régions spécifiques du névraxe où elles provoquent l'apparition d'une sensation particulière (la faim, la soif), laquelle déclenche en retour des stimuli « centrifuges » qui, se propageant via des voies nerveuses efférentes induisent finalement une réponse motrice ajustée : par exemple se diriger vers le robinet, se servir un verre d'eau et boire. Cela pour les processus endogènes ou, pour reprendre la terminologie de M. J.-M. Robert, l'information intéroceptive.

En ce qui concerne les stimuli exogènes (ou l'information extéroceptive), les choses sont quelque peu différentes. Ceux-ci impliquent en effet que l'organisme se trouve placé en interaction – passive ou active – avec un environnement extérieur (mais peut-il en être autrement de toute façon ?). Sa survie, sans pour autant que ce terme ne revête obligatoirement une quelconque connotation dramatique, nécessite alors en permanence qu'il s'adapte à la spécificité du milieu dans lequel il évolue ainsi qu'aux modifications locales et/ou générales qui y peuvent survenir. Les êtres vivants sont dotés de différents types de « capteurs » - la peau, l'œil, l'oreille, le nez, la langue - dont la fonction consiste précisément à permettre cette adaptation et cette survie. Ainsi le revêtement cutané, qui constitue une interface privilégiée avec le monde, est-il littéralement truffé de fibres sensibles (si l'on songe à la seule pulpe digitale, il s'agira des corpuscules de Pacini, de Meissner, de Krause et

de Ruffini). Chez les vertébrés supérieurs, le message recueilli par un senseur tactile est adressé au système nerveux central via la voie lemniscale (un circuit neural sériel donc rapide), ou la voie réticulaire (la plus lente des deux puisque, comme son nom l'indique, il s'agit un réseau). Une fois parvenu au cerveau, ce stimuli centripète peut être interprété et une réponse motrice (éventuellement) déclenchée. Il est évident que toutes les informations extéroceptives qu'il est susceptible de recevoir ne possèdent pas le même niveau de pertinence pour l'organisme: il est ainsi fort probable qu'une légère augmentation de la température ambiante suffira à peine à encourager l'apparition d'un phénomène de sudation – une gêne passagère que l'on fera peut-être cesser en s'humidifiant le visage - tandis qu'une brûlure directe aura à coup sûr pour résultat la production immédiate d'une conduite réflexe. Mais l'essentiel est là : des stimuli environnementaux sont recueillis par des capteurs sensoriels, acheminés vers des centres spécialisés du névraxe via certaines des fibres afférentes du système nerveux périphérique, là ils sont interprétés puis une réponse adaptée est générée qui emprunte en retour des canaux efférents afin de produire tel ou tel effet dans l'organisme ou l'environnement. La neurobiologie de la vision, comme on le sait, engage des processus neuraux autrement plus complexes. Toute l'information visuelle est capturée par la tapisserie cellulaire rétinienne avant de se trouver distribuée à des structures cérébrales spécialisées qui en effectueront finalement l'interprétation. La rétine est un tissu nerveux extrêmement fin qui comprend quelque 160 millions de cellules organisées en trois strates ténues connectées entre elles verticalement et horizontalement. On distinguera une couche de cellules photoréceptrices (formée de bâtonnets et de cônes), et deux couches distinctes de neurones (composées respectivement par des neurones bipolaires et des neurones ganglionnaires). Au regard des connaissances actuelles, et d'un point de vue qui demeurera seulement très général, que se passe-t-il alors lorsque nous voyons ? Quant elles se trouvent excitées par la lumière, les cellules photoréceptrices produisent une réponse électrique proportionnelle à l'intensité de la stimulation électromagnétique qu'elles reçoivent. Cet influx nerveux est alors transmis aux neurones bipolaires qui élaborent à leur tour une nouvelle réponse électrique émise cette fois en direction des neurones ganglionnaires. Les axones des neurones ganglionnaires constituent le nerf optique (il en est deux, à raison d'un par globe oculaire). C'est par cette voie afférente centralisatrice que transite en fait tout l'influx nerveux (l'information visuelle codée sous forme électrique), qui se forme dans la zone rétinienne. Toutefois les faisceaux visuels qui partent depuis la tâche aveugle de la rétine ne gagnent pas directement le cerveau. Avant cela ils se seront croisés dans le chiasma optique. La moitié gauche du champ visuel se trouvera alors analysée par l'hémisphère cérébral droit et sa moitié

droite par l'hémisphère gauche. Plus exactement, et puisque chez les mammifères chaque œil perçoit la totalité du champ visuel, c'est seulement la moitié des fibres du nerf optique qui croisera de la sorte tandis que le reste demeurera localisé du même côté du cerveau (ainsi, et pour l'œil droit, les fibres nerveuses issues de la rétine nasale seront dirigées vers l'hémisphère cérébral gauche tandis que celles issues de la rétine temporale le seront vers l'hémisphère droit). Une fois ce croisement réalisé, et en fonction d'une distribution topographique spécifique qui dépend intégralement de l'œil dont ils procèdent, les faisceaux visuels gagnent l'une ou l'autre des six couches parvocellulaires ou magnocellulaires qui composent le corps genouillé latéral. Au sein de cette structure relais, ils innervent des neurones dont les prolongements axonaux se projettent dans l'aire 17 du cortex visuel primaire. Là, le message nerveux subit une première interprétation avant de gagner les aires visuelles secondaires 18 et 19 du lobe occipital ainsi que d'autres centres cérébraux - *e.g.* les aires visuelles secondaires 20 et 21 du lobe temporal - où son traitement sera enfin finalisé et pourra, le cas échéant, servir à déclencher une réponse (interne ou externe) adaptée au stimulus qui vient d'être reçu et traité.

A nouveau, la perspective à la fois macroscopique et simplificatrice pour laquelle nous avons délibérément opté ici est loin de rendre raison de la complexité réelle du phénomène que nous nous sommes efforcés de décrire. Cependant, et pour notre présent propos, il s'avère en fait qu'elle est largement suffisante. Ainsi, et comme cela aurait pu le cas avec les sensations de soif ou de faim (leur genèse, leur « venue » à la conscience et le mouvement qui tend à leur satisfaction), il est possible de dégager un schéma fondamental qui permet de résumer le déroulement du processus dont nous venons de faire globalement état. On peut alors lui donner la structure suivante : lumière (stimuli exogènes) → rétine (transduction → influx nerveux afférent ou I.N.A.) → nerf optique (I.N.A.) → C.G.L. (I.N.A.) → aires visuelles primaires et secondaires (I.N.A.) → réponse (influx nerveux efférent). Ici, mais *mutatis mutandis* il se produirait la « même » chose avec le goût, l'ouïe ou l'olfaction, des informations extéroceptives sont recueillies par des capteurs cellulaires, transformées en impulsions électriques, lesquelles sont ensuite acheminées vers des centres cérébraux spécialisés par l'entremise de certaines des voies entrantes qui constituent le système nerveux périphérique. Au sein de ces structures encéphaliques, l'influx nerveux afférent est traité puis une réponse électrique est diffusée vers d'autres centres cérébraux et/ou certaines zones sensori-motrices périphériques au travers de faisceaux neuraux efférents.

Même en faisant à dessein l'économie de l'architecture et du fonctionnement fins de la machinerie cérébrale, on est alors en droit de s'interroger sur la parenté que tout ceci peut bien

entretenir avec les plans logiques de l'ordinateur que Von Neumann détaille dans le *First Draft*. En réalité, et tout comme le cerveau, le « système nerveux central » que forment les « trois neurones associatifs » de la machine – *CC*, *CA* et *M* – et leurs interconnexions ne saurait fonctionner à la manière d'un dispositif autosuffisant, pour ainsi dire complètement refermé sur lui-même. Afin qu'il se trouve en mesure d'exécuter les tâches extrêmement variées pour lesquelles il a été conçu, il est en fait impératif que l'ordinateur dispose au préalable d'une information spécifiant à la fois le problème particulier qui doit être traité ainsi que les données sur lesquelles il doit intervenir. Cette information, justement, il ne pourra la trouver à l'intérieur de lui-même. Au départ, et étant donné que sa mémoire interne est vide, il n'est donc aucune information « intéroceptive » dans la machine. La conséquence de cela est qu'elle doit nécessairement provenir de l'*extérieur*. Cette extériorité de l'ordinateur, dont on pourra dire qu'elle constitue en quelque sorte son « environnement », n'est nullement formée par la pièce du bâtiment dans lequel il se trouve installé ni non plus par les personnes, techniciens ou opérateurs, appelées à le servir. Cet environnement est en fait constitué par deux dispositifs séparés que Von Neumann désigne de façon générique en usant du symbole alphabétique *R* (le premier, *R_i*, devra être installé en entrée de la machine, le second, *R_o*, en sortie). Comme nous l'avons vu auparavant, il peut indifféremment s'agir de l'un ou l'autre des systèmes d'enregistrement externes que le mathématicien a brièvement passés en revue dans le cadre de la section 1.2. du texte. S'il est exact que les performances respectives de ces appareils peuvent varier à la fois en terme de vitesse d'opération, de capacité de stockage et de fiabilité, leur fonction, elle, demeure strictement la même dans tous les cas de figure envisageables: elle consiste en l'enregistrement, en la conservation et en la restitution d'informations numériques codées sous une modalité ou une autre (magnétique, optique, etc.). En bref, ce sont des mémoires. Ces informations - à proprement parler le programme et ses données - constituent une expression formelle et encodée de l'intention initiale de l'utilisateur, de ce qu'il entend exactement que la machine fasse pour lui. Formulées et organisées de façon particulièrement rigoureuse - encore une fois il n'est ici nulle place pour l'ambiguïté et encore moins pour l'erreur ou l'omission tandis que l'exhaustivité et l'exactitude priment par dessus tout - elles serviront non seulement à conduire pas à pas son opération mais également à représenter la totalité du matériau numérique dont elle aura besoin afin de parvenir au résultat attendu. Le dispositif d'enregistrement extérieur sur lequel instructions et données doivent être conservées tout de même que le système qui autorise le stockage du résultat terminal obtenu à l'issue des computations forment alors l'environnement de l'ordinateur, c'est-à-dire le milieu externe à partir duquel il pourra les acquérir, les « capter », les « sentir »

ou encore vers lequel il pourra les transférer si le sens du flux informationnel, au lieu d'être centripète, est au contraire centrifuge. Pour être en mesure d'interagir avec ce qui constitue son « monde », l'ordinateur, précise Von Neumann, devra être pourvu de voies de communication spéciales : « *The device must be endowed with the ability to maintain the input and output (sensory and motor) contact with some specific medium of this type (cf. 1.2.)* ». Si, ainsi que l'auteur nous y invite, nous considérons ses organes internes CC , CA et M comme des neurones associatifs, donc à la manière d'un système nerveux central, alors ces voies, selon qu'elles permettent de transférer les informations dans le sens $R \rightarrow M$ ou $M \rightarrow R$ ⁶¹¹ devront être regardées soit comme des neurones sensoriels (ou des neurones afférents), soit comme des neurones moteurs (ou des neurones efférents), c'est-à-dire finalement comme un système nerveux périphérique. Von Neumann nomme organe d'entrée (*input organ*) la voie de communication qui permet à la machine d'acquérir les informations dont elle a impérativement besoin pour opérer. La fonction de ce dispositif spécial, que l'auteur symbolise dans le texte au moyen de la lettre I , est en fait *analogue* à celle que remplissent les fibres nerveuses entrantes dans un organisme vivant : de façon générale, il s'agit de recevoir des stimuli externes (les instructions et les données importées à partir de R_i), puis d'assurer leur propagation vers le névraxe (l'ensemble formé par les neurones associatifs $CC-CA-M$ et leurs mécanismes de transfert propres) où elles pourront faire l'objet d'une interprétation (subir un certain nombre de transformations mathématiques). La fonction de l'organe de sortie de l'ordinateur (*output organ* ou O) correspond à celle des fibres nerveuses efférentes d'un organisme vivant: des trains d'impulsions neurales (les instructions et les données) ayant été reçus puis traités par le névraxe ($CC-CA-M$ et leurs jonctions propres), une réponse électrochimique ajustée est émise par celui-ci en retour (la séquence d'informations correspondant au résultat terminal des calculs), qui, empruntant les voies nerveuses efférentes (O), va alors conduire certains actuateurs corporels à réaliser un comportement moteur spécifique (ici, il s'agira uniquement d'enregistrer ce résultat sur R_o).

Au vu de ces développements théoriques supplémentaires (introduits en 2.6., 2.7., et 2.8.), on se trouve parfaitement en mesure d'apprécier le caractère absolument principal ainsi que le pouvoir séminal extraordinaire qui sont ceux de l'analogie cerveau/ordinateur. S'inscrivant en droite ligne dans la continuité du paradigme ouvert quelques années auparavant par les travaux fondateurs de Norbert Wiener, Julian Bigelow et Arturo

⁶¹¹ Sachant que dans le texte le symbole C équivaut à CC et/ou CA , nous aurions tout aussi bien pu écrire $R \rightarrow C$ et $C \rightarrow R$ mais Von Neumann stipule bien qu'en pratique – nous verrons pourquoi sous peu – il est néanmoins préférable de ne pas recourir à ce type de transferts et de leur préférer ceux qui font systématiquement intervenir la mémoire interne (M).

Rosenblueth ⁶¹² - ce schème interprétatif instaurant comme on le sait un principe d'équivalence générale entre les êtres dont le comportement informationnel se situe au même niveau de complexité et ce indépendamment de leur substrat matériel particulier - la description que fait Von Neumann de l'architecture de l'ordinateur est de part en part commandée par sa propre représentation de la structure logique et du fonctionnement logico-mathématique de la machinerie cérébrale humaine. Si pour lui le cerveau peut et doit constituer le modèle idéal de l'ordinateur, servir d'archétype pour la définition de sa cartographie organisationnelle et de son schéma d'opération, c'est parce dès l'origine il pense la structure logique et l'économie intime de cette nouvelle machine qu'il veut universelle à la lumière de celles qu'il prête au cerveau. A cette époque, comme nombre de ses confrères scientifiques (et bien d'autres avant lui, à commencer bien entendu par Leibniz, Hobbes et Boole), Von Neumann semble convaincu de la justesse de l'hypothèse qui postule l'identité de la pensée et du calcul et qui fait de ce dernier le langage ultime autorisant son expression. Puisque alors « penser c'est calculer » et que, réciproquement, le calcul est la langue qui porte la pensée, concevoir une machine – fondamentalement un calculateur - capable à la fois d'une très grande généralité et d'une très grande autonomie (elle est programmable et possède une mémoire interne), une machine, en outre, dont l'architecture logique emprunte par analogie à celle du cerveau humain, c'est s'engager directement sur la voie de la construction d'un *cerveau artificiel*. Le cerveau et l'ordinateur, envisagés au niveau du *substratum*, ne sauraient certes pas être confondus tout de go. Ils diffèrent même l'un de l'autre en de nombreuses façons. Mais sur le plan à la fois plus abstrait et plus fondamental de l'essence, de l'être logique, il s'agit pour Von Neumann de deux « incarnations » accidentelles, la première biologique, la seconde artefactuelle, d'une seule et même entité mathématique: une machine universelle de Turing. Ici, le rôle qu'il convient d'accorder à la matière, au *hardware*, bref aux aspects physiques ou factuels de ces deux objets, n'est que parfaitement secondaire (abstraction faite bien sûr des considérations pratiques liées à la vitesse d'opération que doit impérativement atteindre la machine pour qu'elle soit considérée comme exploitable dans un cadre scientifique). Pourvu que les pièces qui la composent soient choisies et agencées adéquatement, et quel que puisse être par ailleurs le type technique auquel elles appartiennent (mécanique, électromécanique, électronique, etc.), la machine fonctionnera convenablement. Ce qui compte donc réellement, c'est que le cerveau et l'ordinateur, ontologiquement, ne diffèrent pas : ils ont en partage le même être logique, la même essence, et c'est autour de

⁶¹² Nous pensons ici en tout premier lieu à l'article « Behavior, Purpose and Teleology » paru pour la première en 1943 dans la revue américaine *Philosophy of Science*.

celle-ci que s'articule l'intégralité de leurs rapports. En cela, précisément, le cerveau et la manière dont il est organisé pourront servir de modèle général et privilégié pour engendrer les plans de l'ordinateur.

A ce point du *First Draft*, les six⁶¹³ unités principales de l'ordinateur, à savoir *CC*, *CA*, *M*, *R*, *I* et *O*, ont été introduites et leurs rôles respectifs clairement définis. Avant de procéder à l'examen circonstancié de leurs éléments constitutifs (section 4.0) ainsi qu'à celui des principes généraux appelés à gouverner les diverses opérations arithmétiques que sera capable de réaliser la machine (section 5.0), Von Neumann formule une interrogation – comme pour la prévenir – qu'il qualifie « d'importante ». En effet, et pour peu que l'on y regarde d'un peu plus près, il apparaît bien vite que *R* et *M* remplissent exactement la même fonction : à la base, nous avons déjà souligné ceci, ce sont des mémoires. Bien entendu *R* (*R_i* et *R_o*) possède certaines propriétés auxquelles *M* ne saurait prétendre. Etant donné qu'il s'agit d'une mémoire externe destinée au stockage à long terme des programmes, des données ou des résultats, *R* offre aux opérateurs de l'ordinateur une accessibilité et une lisibilité directes que sa localisation interne, au moins en droit, interdit à *M*. La question que pose Von Neumann est alors la suivante : sachant que *M* et *R*, fondamentalement, ne diffèrent pas au niveau de la fonction qu'elles accomplissent, en quoi s'avère-t-il réellement nécessaire de doter la machine d'une mémoire supplémentaire, c'est-à-dire d'une mémoire interne ? La présence d'une mémoire externe n'est-elle pas déjà ici pleinement suffisante ? N'est-il pas au moins envisageable de confier certaines des fonctions propres à *M* – celles qui impliquent par exemple la manipulation de grandes quantités d'information – à *R* ? Comme le démontre par la suite Von Neumann en inspectant les différents types de calculs que peut accomplir l'ordinateur ainsi que leurs exigences respectives en terme d'espace mémoire, non seulement ceci se révèle concevable mais en plus, c'est parfaitement réalisable sur le plan pratique. En fait remarque l'auteur, pour l'exécution de la très grande majorité des computations de nature scientifique, le fonctionnement des calculateurs déjà existants, qu'ils soient automatiques ou semi-automatiques, repose essentiellement sur l'emploi de mémoires externes (sous la forme de paquets de cartes perforées ou de bandes de télétype). Cependant cet usage, pour répandu et éprouvé qu'il puisse être, n'apparaît pas souhaitable lorsqu'il est spécifiquement question de l'ordinateur. Dans la plupart des cas de figure en effet, et puisque les temps d'accès à la mémoire externe sont nettement plus importants que ceux de la mémoire interne (n'oublions pas que nombre des composants de *M* sont électroniques alors que ceux de *R* sont au mieux

⁶¹³ On en différenciera seulement cinq si, comme le fait parfois Von Neumann, *CA* et *CC* sont considérées comme une seule unité appelée *C*.

électromécaniques), s'en remettre exclusivement à R , ou encore à un emploi alternatif de M et R dans le cadre de l'exécution des calculs reviendrait fatalement à diminuer la vitesse moyenne d'opération de la machine. Dans ce cas, conclut Von Neumann, l'utilité d'un dispositif ultrarapide (« *a really high speed device* »), serait alors extrêmement limitée : quel bénéfice trouverait-on en effet à disposer d'un instrument d'architecture totalement inédite capable d'opérer aux vitesses formidables permises par la technologie électronique si, de façon systématique ou au moins intermittente, celui-ci devait émettre et recevoir des séquences d'information en direction ou en provenance de supports mémoires extrêmement lents ? Dans ces conditions particulières - les performances atteintes par l'ordinateur justifieraient à peine son coût de production colossal - la solution consistant à se satisfaire des instruments de calcul déjà disponibles se révélerait sûrement beaucoup plus sensée...

Afin d'éviter de pareils ralentissements, lesquels en arriveraient finalement à remettre en cause sa raison d'être, on voit donc qu'il est absolument indispensable que l'économie du nouveau système repose autant que faire se peut sur l'emploi de sa mémoire la plus rapide, c'est-à-dire M , plutôt que sur celui de sa mémoire la plus lente. En d'autres termes, on s'efforcera de limiter au strict nécessaire le nombre de phases opérationnelles où R doit être sollicitée - la mémoire externe servira alors essentiellement à charger le programme et les données en mémoire interne puis à récupérer les résultats finaux des calculs - tandis que M , avec CC et CA , sera systématiquement appelée à intervenir lors de la réalisation des processus survenant dans l'intervalle défini par ces deux opérations « limites ». Ainsi qu'en témoigne clairement ce court passage, l'optimisation de la vitesse de fonctionnement de la machine, avec sa simplicité et sa généralité, constitue un des enjeux cruciaux du projet de Von Neumann. Si l'on se souvient des graves difficultés qui furent rencontrées peu de temps auparavant avec l'E.N.I.A.C., force nous même est faite de constater qu'elle en fut un des facteurs déterminants. A dire vrai, mais nous aurons l'occasion de vérifier ce point en étudiant quelques-unes des machines qui succédèrent à l'E.D.V.A.C., cette préoccupation centrale que représente la constante amélioration de la vitesse d'opération de l'ordinateur - donc celle de ses performances - n'a jamais cessé d'habiter la sphère informatique dans son ensemble, y compris bien sûr à ce jour...

Toutes les pièces du « puzzle » étant désormais en place - « *the classification of 2.0. being completed* » écrit Von Neumann en débutant la section 3.1. - il nous est maintenant possible de présenter l'architecture qui porte son nom sous forme diagrammatique en prenant la précaution de préciser à nouveau qu'aucun schéma de ce genre n'a jamais figuré dans le texte original du *First Draft of a Report on the EDVAC*.

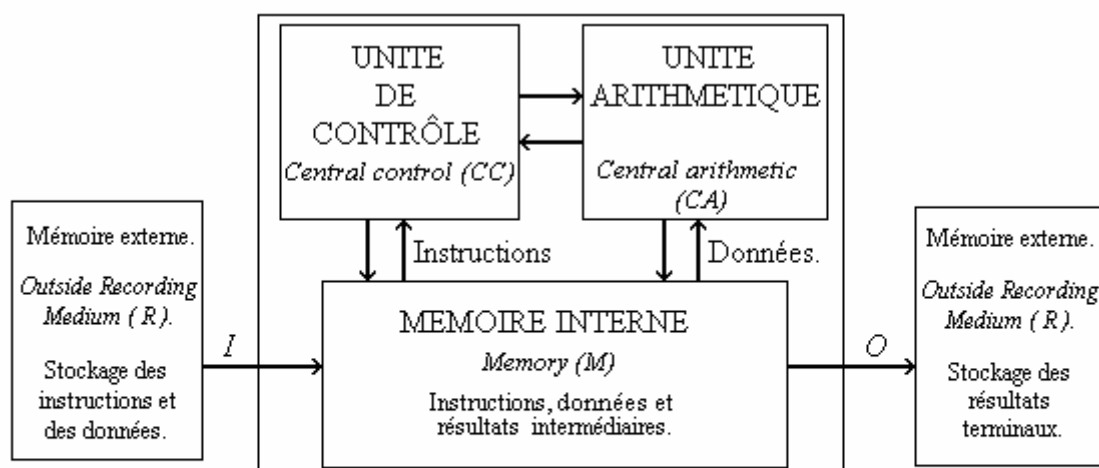


Fig. 17: organisation logique du calculateur à programme interne (ordinateur) telle que définie par John von Neumann dans le *First Draft of a Report on the EDVAC* (30 juin 1945). Sous la désignation de chacune des unités, nous avons fait figurer la terminologie et les abréviations employées par von Neumann dans le texte original (e.g. *Central control* = *CA*).

Dans la troisième partie du texte (3.0. *Procedure of discussion*), Von Neumann formule quelques remarques d'ordre méthodologique quant à la manière dont il entend mener la discussion qui va suivre (sections 4.0. et 5.0.). Il s'agira de prendre chacune des cinq parties qui composent la machine puis de les examiner une à une («... *to take up the five specific parts into which the device was seen to be subdivided and to discuss them one by one* »). En les appréhendant tout d'abord de manière individuelle puis au sein du système, c'est-à-dire lorsqu'elles se trouvent placées en interaction dynamique avec les autres unités de l'ordinateur, il sera ainsi possible de faire ressortir explicitement les caractéristiques ou les propriétés spécifiques qui doivent être les leurs afin qu'elles puissent fonctionner convenablement, seules et en synergie. Il sera également question: 1) de déterminer les procédures spécifiques que l'ordinateur doit utiliser pour manipuler les nombres et exécuter les opérations arithmétiques ; 2) d'examiner les questions relatives au timing et à la vitesse d'opération de la machine ; 3) de reconsidérer les problèmes – sans pour autant prétendre les résoudre complètement - liés à la détection, à la localisation, et, sous certaines conditions, à la correction des éventuels dysfonctionnements du système. Il s'avère par ailleurs extrêmement intéressant d'accorder quelque attention à la *forme* que Von Neumann ambitionne de donner initialement à cette discussion. Qualifiée par l'auteur de « procédure idéale », elle consisterait à prendre les cinq parties de l'ordinateur une à une et dans un ordre parfaitement défini, à étudier chacune d'entre elles séparément et de façon exhaustive puis, une fois ceci accompli, de poursuivre avec l'unité suivante en réitérant cet examen détaillé jusqu'à ce qu'enfin il ne

reste plus rien à « traiter ». Le caractère foncièrement algorithmique de cette démarche explicative ne saurait bien entendu échapper à la vigilance de l'observateur attentif. En effet, la structure du raisonnement auquel Von Neumann envisage ici de recourir n'est autre que celle qui caractérise spécifiquement le mode opératoire d'une machine de Turing, laquelle, comme on le sait, procède par changements successifs d'états discrets et intégralement déterminés. Or puisque l'ordinateur, par essence, *est* une machine universelle de Turing, quelle méthode peut paraître plus appropriée pour étudier ses parties et le système intégré qu'elles forment que celle consistant justement à conférer au discours qui vise à les analyser la forme d'une procédure effective, d'un programme ? Afin de comprendre parfaitement l'ordinateur, la place et le rôle spécifiques qui reviennent à chacune de ses unités constitutives, le raisonnement qu'il convient idéalement d'appliquer semble donc être celui qui obéit très exactement aux règles gouvernant le fonctionnement d'un automate turingien.

Pour Von Neumann, connaître l'ordinateur dans ses moindres détails réclame par conséquent que l'esprit opère très exactement comme lui, c'est-à-dire à la manière d'une machine universelle de Turing. Il n'y a là rien de véritablement surprenant si l'on se souvient que le puissant automate décrit par le mathématicien britannique dans son célèbre article de 1936, « On Computable Numbers with an Application to the *Entscheidungsproblem* », n'est à l'origine qu'une pure entité logico-mathématique. Complètement dissociable de ses supports physiques contingents et capable de manipuler des symboles (ainsi que l'a indirectement démontré Kurt Gödel en arithmétisant la logique au moyen de la méthode de numérotation qui porte son nom), elle représente en fait le modèle parfait du raisonnement symbolique. En principe, c'est cet idéal intellectuel que l'esprit devra pour ainsi dire mettre en œuvre en vue de parvenir à la pleine compréhension de cet autre avatar concret de la machine universelle de Turing qu'est l'ordinateur. Dans les faits cependant, Von Neumann estime qu'une telle approche n'est que très difficilement réalisable. L'ordinateur ayant été conçu et présenté comme un système fortement intégré, la détermination des caractéristiques propres de chacune de ses parties ne pourra alors s'élaborer qu'au prix d'un va-et-vient ininterrompu entre des séquences explicatives inachevées appelées à se compléter progressivement les unes les autres. Ce n'est donc que graduellement, au gré des détours et des entrelacs dessinés par cette investigation « zigzagante » - le terme est de Von Neumann - que les propriétés de ces unités et de ce qui se révélera être en définitive leur arrangement optimal finiront par émerger et se cristalliser. Pour conclure provisoirement, on remarquera qu'en certains de ses aspects, cette modalité discursive ne s'éloigne guère du modèle algorithmique idéal que visait primitivement le mathématicien : il n'est pas rare en effet que des programmes informatiques

comportent des sous procédures auxquelles ils font appel à un moment donné ou un autre de leur traitement. Une fois ces routines exécutées, le contrôle est alors systématiquement restitué au programme principal. Un peu à la manière de ce qui se passe effectivement dans les sections 4.0. et 5.0. du *First Draft*, le résultat final des opérations effectuées par la machine se construit donc au fur et à mesure, dans une succession d'allers et retours, de renvois mutuels réalisés entre les différents modules constitutifs du programme.

Le concept clef des parties 4.0. et 5.0. du texte, respectivement intitulées *Elements*, *Synchronism Neuron Analogy* et *Principles Governing the Arithmetical Operations*, est celui d'« *element* ». Quelle signification l'auteur confère-t-il ici à cette notion centrale ? Que recouvre-t-elle donc exactement ? Et quel est son rôle ? Intuitivement tout au moins, on pressent bien que le concept d'« *element* » renvoie à celui de composant fondamental d'un ensemble ou, ce qui revient au même, à celui de partie élémentaire d'un tout. Mais pour juste que puisse être cette dernière assertion, la première section de la quatrième partie du *First Draft of a Report on the EDVAC* s'ouvre en fait sur quelques remarques d'ordre général. Toutes les machines à calculer digitales, écrit Von Neumann, comportent des composants de base – des « *elements* » - dont la particularité essentielle consiste dans le fait qu'ils sont capables d'adopter *l'un ou l'autre* de deux ou plusieurs *états* distincts dans lequel ils sont alors susceptibles de demeurer indéfiniment sous condition de ne recevoir aucun « soutien » (*support*) en provenance de l'extérieur. Ces états, précise l'auteur, correspondent en fait à des équilibres discrets, c'est-à-dire à des situations de stabilité durable totalement exclusives les unes des autres. Ces quelques précisions nous permettent d'emblée de saisir que les « *elements* » dont parle Von Neumann, fondamentalement, ne sont rien d'autre que des *relais*. Dans ces conditions, une alternative se présente alors immédiatement. Pour commencer, il se peut que ces différents états représentent autant de situations de parfait équilibre. En supposant alors qu'un relais R puisse adopter l'une ou l'autre de deux configurations spécifiques - nommons-les E_1 et E_2 - et qu'à un quelconque instant t cet élément se trouve dans l'état E_1 , il demeurera dans cette position particulière jusqu'à ce qu'éventuellement des « stimuli extérieurs appropriés » (*appropriate outside stimuli*), le forcent à basculer dans l'état E_2 . Inversement, c'est-à-dire si le relais se trouve initialement dans l'état E_2 , il ne pourra passer à l'état E_1 que si des stimuli extérieurs l'y « obligent ». De façon générale, c'est-à-dire quel que soit le nombre d'états que peut effectivement prendre un tel composant élémentaire, il est donc possible de rendre compte exhaustivement de son mode opératoire de la façon suivante : pour une configuration actuelle donnée – dans notre exemple ce sera soit E_1 , soit E_2 – il ne surviendra un changement d'état que s'il y a présence de stimuli. Dans le cas contraire,

autrement dit en l'absence d'un signal déclencheur, rien ne se produira et la situation courante ne sera pas altérée. En supposant maintenant que l'on ait spécifiquement affaire à un dispositif bipositionnel, et puisque nous évoquions tout à l'heure une alternative, il existe encore une autre façon de procéder. L'un des deux états, ou, si l'on préfère, l'un des deux équilibres dans lequel est capable de se trouver ce genre de relais ne sera actualisé que si aucun signal afférent n'est reçu. On peut par conséquent affirmer de la réalisation ou de l'existence de cet équilibre qu'elles dépendent d'une totale absence d'évènements. A l'inverse, c'est-à-dire si un stimulus parvient au relais, c'est alors l'autre état qui sera activé sachant que si cette « excitation » en vient à être soudainement interrompue, le relais basculera à nouveau dans l'état dans lequel il était précédemment positionné. L'absence de stimulation, qui tout à l'heure était synonyme de *statu quo*, d'immobilisme, revêt donc ici une portée assurément positive. Elle possède même une valeur opérationnelle avérée: lorsque rien n'advient, quelque chose est néanmoins susceptible de se produire et/ou de persister. On dit de tels dispositifs qu'ils fonctionnent sur le mode « *all or none* », c'est-à-dire sur le mode du « tout ou rien ». C'est vers ce type de composants élémentaires – nous verrons pour quelles raisons incessamment – que le choix de Von Neumann se portera pour la construction de la nouvelle machine. Reste maintenant à tenter de cerner un peu mieux cette notion d'« *element* » et à comprendre de quelle nature sont les stimuli dont a parlé l'auteur. Il s'en explique dans les premier et deuxième paragraphes de la section 4.1. du texte :

« Dans les calculateurs digitaux existants, écrit Von Neumann, divers dispositifs mécaniques ou électriques ont été employés comme éléments : des roues, lesquelles peuvent être positionnées sur n'importe lequel des dix (ou plus) emplacements significatifs qu'elles comportent et qui, en passant d'une position à une autre, transmettent des impulsions électriques susceptibles de conduire d'autres agencements similaires à se mouvoir ; des relais télégraphiques simples ou combinés, qui, activés par un électroaimant, permettent de commander l'ouverture ou la fermeture de circuits électriques ; des systèmes composites alliant ces deux types d'éléments ; - et finalement, il existe la possibilité à la fois plausible et tentante consistant à utiliser des tubes à vide, la grille du tube agissant alors comme une valve pour le circuit cathodique⁶¹⁴ ... ».

Il ressort immédiatement de l'examen de ce court passage que l'« *element* » ne saurait être entièrement défini par son appartenance à telle ou telle famille technologique. Ainsi, il

⁶¹⁴ Nous traduisons ici la première partie du premier paragraphe de la section 4.1. du *First Draft*.

pourra indifféremment être de type électromécanique (dans le cas des roues), électromagnétique (dans celui des relais télégraphiques ou téléphoniques), ou électronique (si des tubes à vide ou des C.R.T. sont employés). De la même manière qu'une machine universelle de Turing peut en principe se voir réalisée de diverses façons (abstraction faite des performances, on parviendra au « même » résultat en fabriquant un ordinateur ou en utilisant une bande de papier, un tableau et un crayon par exemple), un « *element* » peut donc être construit en ayant recours à différentes technologies (voire même en mêlant ces technologies). Selon la nature des matériaux spécifiquement sélectionnés pour sa confection, il est évident que les performances et la fiabilité de l'élément varieront très certainement, mais ce qu'il accomplit, à savoir une commutation entre deux ou plusieurs états distincts et exclusifs, demeurera strictement identique dans tous les cas de figure envisageables. La compréhension de ce que Von Neumann nomme « *element* » doit donc se faire en termes fonctionnels et négliger complètement les propriétés qui, dans l'objet, procèdent de l'accidentel, du contingent. En d'autres termes, les questions relevant de l'ordre matériel et structurel sont ici complètement accessoires. Ce qui prévaut fondamentalement, c'est ce que fait l'élément, non pas ce en quoi il est fait ni non plus la façon, ou plutôt les façons, dont il peut se voir façonné et organisé au gré des technologies disponibles à telle ou telle époque. Dans un premier temps tout au moins, il est donc possible de définir l'« *element* » comme un composant élémentaire actif dont la nature concrète, la réalisation matérielle, est en droit indifférente. Mais si la mention de cette détermination s'avère bel et bien nécessaire afin de préciser cette notion, elle échoue cependant à en rendre compte pleinement. En effet, les différents dispositifs évoqués tour à tour par Von Neumann dans le fragment présenté *infra* – et qui sont tous donnés comme étant des éléments – possèdent ceci en commun que sous certaines conditions très particulières, ils sont conduits à produire une action spécifique laquelle entraîne alors d'autres dispositifs – qui peuvent être ou non de même type que les précédents – à modifier automatiquement leur état courant (selon le cas une roue numérique entraînera une roue numérique contiguë, un relais ouvrira ou fermera un circuit électrique, etc.). Puisque l'état actuel de l'« *element* » se trouve constamment déterminé par la présence ou l'absence de stimuli afférents et qu'il possède en outre le pouvoir d'influencer à son tour celui d'autres objets éventuellement similaires (par l'entremise de l'émission de nouveaux stimuli), il ressort clairement que pour être appréhendé adéquatement, il ne doit pas être considéré isolément. Au contraire de cela, nous croyons que son entente passe impérativement par sa « recontextualisation ». Comprendre qu'il doit être envisagé comme une des parties constitutives d'un tout intégré, comme l'un des composants fondamentaux d'un système

formé d'autres objets actifs élémentaires avec lesquels il se trouve placé en interaction permanente et dont il ne saurait être réellement séparé étant donné qu'en certaines occasions son comportement dynamique est à même de conditionner leur état tout autant que son état est susceptible d'être déterminé par leur comportement dynamique. L'« *element* » étant par définition un relais, ou plutôt convient-il mieux de dire une *sorte* de relais, Von Neumann appelle alors « *relay action* » le type d'opérations que ces dispositifs peuvent effectivement réaliser. Cette « *action relais* » note l'auteur :

« ...se manifeste dans l'émission de stimuli par l'élément lorsque celui-ci a lui-même reçu des excitations en provenance de l'extérieur... Les stimuli ainsi propagés par l'élément doivent être du même genre que ceux qui ont été préalablement reçus, c'est-à-dire qu'ils doivent être capables d'influencer à leur tour d'autres éléments. Par conséquent, il ne doit exister aucune forme de relation énergétique entre les excitations afférentes et les excitations efférentes, c'est-à-dire qu'un élément, quant il a reçu un stimulus, doit se trouver en mesure d'en émettre plusieurs autres d'intensité équivalente. En d'autres termes : étant un relais, l'élément doit recevoir sa provision énergétique d'une source différant des stimuli entrants.⁶¹⁵ ».

Une première remarque de portée générale doit être formulée concernant la manière dont Von Neumann s'attache à rendre compte ici de l'« action relais » dont sont capables ordinairement les composants élémentaires des calculateurs digitaux. La façon dont le mathématicien appréhende précisément ces objets, leur comportement et leurs manifestations emprunte en effet largement à la « méthode comportementale d'étude » proposée par A. Rosenblueth, N. Wiener et J. Bigelow dans leur célèbre article de 1943 : « Behavior, Purpose and Teleology ». Rappelons que cette méthode générale d'investigation vise à permettre l'étude d'un objet qu'à cette fin on a commencé par « relativement abstraire » de son environnement. D'après la définition originale qu'en donnent les trois cybernéticiens, l'approche comportementale :

« ...consiste à considérer l'action en sortie de l'objet et les relations de cette sortie avec l'entrée. Par sortie, nous signifions tout changement produit dans l'environnement par l'objet. Par entrée, inversement, nous signifions tout événement externe qui modifie cet objet

⁶¹⁵ Nous traduisons ici la seconde partie du premier paragraphe de la section 4.1. du texte.

d'une certaine façon... Il s'ensuit que toute modification d'un objet détectable de l'extérieur peut être désignée par le terme de comportement⁶¹⁶».

Il semble aller de soi que cette façon de définir le comportement, parce qu'extrêmement générique, ôte au final tout intérêt théorique de même que toute portée pratique à ce concept. En effet, et dès lors que tout ou presque est susceptible d'être dit comportement, on est en droit de se demander en quoi résident encore véritablement la pertinence et l'utilité d'une pareille notion. Cependant, poursuivent les trois auteurs, « *ce terme... peut être restreint par l'apposition d'adjectifs – i.e. le comportement peut être assigné à une classe* ». Les « adjectifs » dont il est question ici correspondent en réalité à autant de déterminants limitatifs et discriminants ouvrant sur la possibilité d'une différenciation et d'une classification – et par là même d'une comparaison et d'une hiérarchisation – de la totalité des comportements possiblement observables dans telles ou telles catégories d'objets. En restreignant sa compréhension de la sorte, en instaurant des classes comportementales et des subdivisions au sein même de ces délimitations conceptuelles, il devient alors possible de restituer à la notion de comportement le caractère opérationnel qu'une interprétation initiale trop large lui interdisait d'emblée. Parmi tous les opérateurs de classification envisageables, Rosenblueth, Wiener et J. Bigelow proposent tout d'abord de prendre en considération les changements « *d'énergie impliqués dans le comportement [de l'objet étudié]* ». Pourra alors être qualifié d'actif un comportement « *dans lequel l'objet est la source de l'énergie en sortie impliquée dans une réaction spécifique donnée.* ». Au contraire de cela, un comportement sera dit passif si « *l'objet n'est pas une source d'énergie* ». Dans ce cas précis, toute l'énergie émise en sortie de l'objet pourra être reliée à son entrée immédiate. Pour l'exprimer encore autrement, et pour reprendre les termes mêmes employés par Von Neumann, il existera ici une « relation énergétique » entre les stimuli reçus par l'objet, et qui

⁶¹⁶ A. Rosenblueth, N. Wiener et J. Bigelow, « Behavior, Purpose and Teleology », *Philosophy of Science*, Baltimore, Williams & Wilkins, 1943, vol. X, pp. 18-24; trad. Fr. par J. Piquemal, « Comportement, intention et téléologie », *Les études philosophiques*, avril-juin 1961, n°2. Cet article fondateur a depuis lors fait l'objet de plusieurs réimpressions et commentaires (notamment dans J.-P. Dupuy, « L'essor de la cybernétique », *Cahiers du CREA*, n°7, novembre 1985, p.101. Précisons que ce travail fut par la suite repris et augmenté par le même J.-P. Dupuy dans *Aux origines des sciences cognitives* (Paris, Editions La Découverte, coll. « Sciences cognitives », 1994). La première traduction de ce texte s'avéra assez malheureuse puisque le terme anglo-américain « *purpose* » fut tout d'abord rendu en français par le mot « intention » ce qui d'emblée laissait supposer que le type de comportement dont il pouvait être question ici était bel et bien de nature intentionnelle ou volontariste. Afin d'évacuer cette composante mentaliste ou « biocentriste », laquelle n'avait aucunement lieu d'être dans ce contexte précis (les objets étudiés n'étant pas nécessairement des êtres vivants), il fut ensuite proposé de traduire « *purpose* » par « but » ou encore « dirigé vers un but ». Concernant cette citation et celles qui suivent, nous nous sommes appuyés sur la traduction et les analyses faites par Aline Pélissier et Alain Tête dans [Pélissier et Tête, 1995], pp. 39-55.

le modifient d'une façon ou d'une autre, et les stimuli émis par l'objet, lesquels produisent un certain changement dans son environnement immédiat. Si maintenant on examine les propos de Von Neumann à la lumière de ce qui vient d'être tout juste d'être exposé, la parenté de sa réflexion avec la méthode comportementale d'étude, autrement dit avec la pensée cybernétique, ressort tout à fait explicitement. La classe d'objets qu'il étudie dans la quatrième partie du *First Draft of a Report on the EDVAC* est composée par des entités qu'il désigne en usant de l'appellation générique d'« *elements* ». Ces « *elements* », ainsi que nous l'avons vu, correspondent en tout premier lieu – mais pas uniquement - aux composants premiers des machines à calculer digitales, quelle que soit par ailleurs leur nature matérielle et, mais c'est étroitement lié, l'époque à laquelle elles ont pu être construites. Fondamentalement, ces objets sont des relais, c'est-à-dire des dispositifs élémentaires capables de changer d'état sous l'action de stimuli reçus à partir de l'extérieur, depuis l'environnement. Ces stimuli entrants – dans la très grande majorité des cas il s'agit en fait de signaux électriques - représentent des événements externes aptes à modifier l'objet d'une certaine façon. Ici, s'il y a excitation, et en supposant comme Von Neumann le suggère pour des raisons pratiques que le relais ne possède seulement que deux états distincts, on passera d'une situation d'équilibre discret à une autre (ou inversement). Un tel changement d'état interne du composant est ce que Von Neumann nomme « *relay action* ». La réalisation de cette action relais – chose qui au demeurant est fort fréquente dans les calculateurs digitaux – signifie que l'élément change quasi instantanément d'état, de comportement, lorsqu'il est ainsi déterminé à le faire par la présence d'une stimulation afférente. Cette modification interne se manifeste alors directement à l'extérieur, dans l'environnement de l'objet, en ceci qu'influencé de la sorte, ce dernier se trouve aussitôt conduit à émettre des stimuli sortants à leur tour capables d'exciter d'autres composants du même type (bien qu'il se peut que ce ne soit pas le cas). Puisque, précise Von Neumann, les stimuli propagés par l'élément doivent être de même intensité que ceux antérieurement reçus (de façon à ce qu'il puisse lui-même en stimuler d'autres), il apparaît clairement que les excitations entrantes ne peuvent constituer la source énergétique à partir de laquelle l'action relais peut se voir effectivement exécutée. S'il en était autrement, il est plus que probable qu'une très grande partie de la quantité d'énergie reçue par l'objet en entrée devrait être immédiatement dissipée afin de provoquer une modification de son état interne. Le reste, en supposant même qu'il en soit un, ne pourrait alors servir à stimuler d'autres relais (en passant d'élément en élément, l'intensité des signaux émis et reçus finirait de toute façon par décroître jusqu'à atteindre une valeur critique où plus rien, dès lors, ne pourrait advenir). Selon la terminologie propre à la cybernétique, et en regard de ce qui vient

d'être énoncé, l'élément devra donc être qualifié d'*actif* car même si c'est de manière indirecte, l'énergie nécessaire aux modifications de son état interne provient bien de lui et non pas des stimuli environnementaux afférents (dans ce dernier cas on dira qu'il est *passif*). Cette lecture « wienerienne » du texte de Von Neumann s'avère intéressante en ceci qu'elle permet de qualifier la notion d'« élément » - il s'agit en l'espèce d'un relais de type actif – sans pour autant la spécifier sur le plan matériel: la nature concrète de ces objets, et c'est là un point absolument essentiel, continue ainsi d'être totalement négligée.

Le mathématicien poursuit ensuite le fil de ses réflexions en s'intéressant aux différentes solutions techniques qui permettraient de scander le rythme d'exécution des diverses opérations qu'est normalement capable de réaliser n'importe quel calculateur élaboré à partir de ce genre d'éléments. En vue d'imprimer au dispositif cette cadence fondamentale, laquelle commande la mise en synergie de ses différentes unités fonctionnelles et correspond finalement à sa vitesse de travail, il envisage alors deux possibilités. Le *timing* d'une telle machine – terme que l'on rend habituellement en français par les mots « minutage » ou « chronométrage » - pourrait tout d'abord avoir pour base fondamentale le temps de réaction de ses éléments. Cette réaction – la modification de l'état interne des relais - étant justement déclenchée par l'arrivée de signaux sur leur entrée, leur *input*, le cadencement de la machine trouverait donc son origine ultime dans la fréquence d'apparition de ces stimuli afférents. Puisqu'à un instant donné, tous les constituants du calculateur ne peuvent être actifs (si un relais vient de changer d'état, un autre se trouve sûrement sur le point de le faire), un timing de cette sorte sera dit *asynchrone*. La deuxième solution immédiatement considérée par Von Neumann consiste à conférer son rythme de travail à la machine en recourant à un dispositif spécial, une unité centralisée, qu'il nomme « horloge fixe » (*fixed clock*). La fonction de cette horloge est de fournir à la machine les impulsions nécessaires à son fonctionnement à des moments parfaitement déterminés. Dans ce cas de figure précis, et puisque ces signaux coordinateurs sont générés puis diffusés selon des intervalles de temps uniformes et récurrents, le cadencement appelé à gouverner toute l'économie intime du calculateur se trouve donc être de type constant et monotone. Un telle machine, étant donné qu'il existe un certain rapport entre la fréquence d'apparition des stimuli régulateurs produits par l'horloge interne et sa vitesse propre d'opération devra alors être appelée *synchrone*. Parvenu à ce stade de l'explication, on remarque que l'auteur ne se prononce pas quant au choix qui sera le sien concernant le mode de timing de l'ordinateur : on ne sait donc pas encore si l'E.D.V.A.C. sera une machine asynchrone ou bien synchrone.

Von Neumann débute la section 4.2. (*Neurons, synapses, excitatory and inhibitory types*) en affirmant qu'il vaut assurément la peine d'être noté (*it is worth mentioning*) que les neurones des animaux supérieurs – y compris ceux de l'homme - sont sans aucun doute (*definitely*) des « *elements* » au sens qu'il a préalablement conféré à cette notion. En d'autres termes, les cellules cérébrales sont selon lui des relais à deux états exclusifs fonctionnant sur la modalité du « tout ou rien » ou plutôt, vu leur nature particulière, sur celle de « l'excitation ou du repos ». Les neurones se comportant presque⁶¹⁷ exactement comme des tubes à vides ou, plus généralement, comme des relais multipositionnels, il apparaît que les uns et les autres, en dépit de leurs profondes dissemblances physiques, participent donc de la même classe d'objets. Le rôle joué ici par la catégorie générique d'« *element* », et dont on se rend compte au passage qu'elle ne concerne pas seulement quelques dispositifs artificiels mais également une certaine sorte d'entités biologiques, est assurément capital puisque c'est elle qui va en définitive permettre à Von Neumann de les comparer dans la section 4.3. du *First Draft*. Suivant en cela les idées développées par Warren S. McCulloch et Walter Pitts dans leur article de 1943, « A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity⁶¹⁸ », le mathématicien, non sans d'abord avoir fait référence à ce travail essentiel, choisit délibérément d'ignorer les aspects les plus complexes de la physiologie du neurone à commencer par les phénomènes de seuillage, de sommation temporelle, d'inhibition relative et de modification de seuil survenant à la suite d'une stimulation qui s'est produite au-delà du délai synaptique (il procèdera du reste de la même manière quelques cinq années plus tard dans *La théorie générale et logique des automates* en décidant de négliger la dimension humorale de la transmission de l'influx nerveux). A partir de là, on comprend que le discours de Von Neumann s'installe dans l'ordre du *modèle* pour des motifs qui sont à la fois théoriques et pratiques (n'oublions pas qu'il s'agit toujours de présenter les « plans » de l'ordinateur). Cependant, il n'est pas question ici de tenter de reproduire plus ou moins

⁶¹⁷ Von Neumann ne manque cependant pas de remarquer qu'il existe certaines différences à la fois notables et intéressantes entre les relais à deux états et les neurones. Un neurone, via ses lignes de sortie (les axones), peut être connecté à une cellule voisine ou éloignée de deux façons distinctes. La connexion synaptique peut ainsi être de nature excitatrice, et alors le stimulus transmis par le neurone source contribuera à l'excitation du neurone cible, ou bien de type inhibiteur. Dans ce dernier cas, l'impulsion émise par le neurone source préviendra l'excitation du neurone cible. En outre, la cellule neuronale possède un temps de réaction défini, le délai synaptique, qui survient entre la réception d'une stimulation excitatrice et l'émission de celle qu'elle a précisément occasionné. Un peu plus loin, Von Neumann précise également que le fonctionnement du système nerveux est très certainement de type asynchrone (pour les délais synaptiques). L'ensemble de ces propriétés biologiques, de façon tout à fait intentionnelle, ne seront pas prises en compte ici par l'auteur. Elles seront par contre appelées à jouer un rôle crucial dans le domaine des réseaux neuronaux artificiels (*Artificial Neural Networks* ou A.N.N.).

⁶¹⁸ Cet article fut pour la première fois publié dans le *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Oxford, Elsevier Sciences, Vol. 5, 1943, pp. 115-133. Il a été traduit, réimprimé et commenté en France notamment dans [Pélissier et Tête, 1995], pp. 57-91.

parfaitement l'objet étudié. Ainsi, on ne cherche pas à construire une réplique exacte du neurone biologique. Ce qui est spécifiquement visé ici est le fonctionnement de ce type de cellules (plus exactement une version simplifiée de leur fonctionnement). Or puisque McCulloch et Pitts ont mathématiquement démontré que celui-ci était de nature calculatoire et qu'en outre il était descriptible dans les termes d'une logique formelle garantie par la loi du « tout ou rien », il s'ensuit que tout dispositif capable de prendre successivement l'un ou l'autre de deux états discrets mutuellement exclusifs – et par suite tout « *element* » susceptible de faire l'objet d'une description opérée au moyen d'un langage formel bivalent – remplit exactement la même fonction que le neurone. Cette profonde identité fonctionnelle – que traduit une appartenance à une même classe d'objets - mais aussi les différences matérielles qui existent entre de tels éléments et qui impliquent de fait certains écarts dans leurs performances respectives (vitesse, fiabilité), constitueront alors les deux axes fondamentaux autour desquels pourra se déployer un discours visant à les comparer les uns aux autres. Von Neumann conclut alors cette section 4.2. en proposant de considérer spécifiquement un certain type de neurones simplifiés : ces derniers, précise-t-il, ne devront posséder que des seuils fixes et ne pourront recevoir sur leurs entrées synaptiques (au nombre de 2 ou 3), que des stimuli excitateurs et aucun stimulus inhibiteur. Finalement, il assure que l'on peut aisément vérifier que les fonctions accomplies par cette sorte de cellules cérébrales idéalisées sont imitables en construisant des montages réalisés à base de relais télégraphiques ou bien encore de tubes à vide.

Sans surprise, la dernière division de la quatrième partie du *First Draft* (4.3 *Desirability of using vacuum tubes of the conventional radio tube type*), prend la forme d'une comparaison quantitative des propriétés des objets qui participent de la classe des « *elements* ». La figure *n*, ci-dessous, présente en les récapitulant les différentes familles d'individus - artificiels ou naturels – que le mathématicien a rangées jusqu'ici sous cette catégorie hyperonyme.

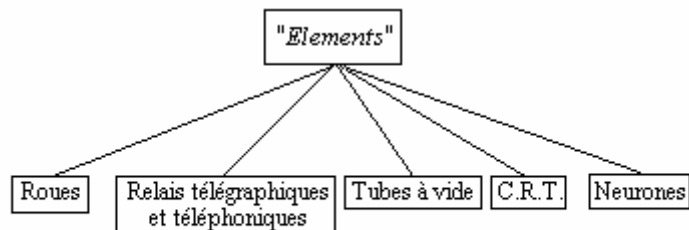


Fig. 18: portée générale de la notion d'« Elements »

Les éléments que compare maintenant Von Neumann sont: les tubes à vide, les dispositifs mécaniques, les relais télégraphiques ainsi que les neurones. La fonction qu'ils accomplissent étant strictement la même dans tous les cas de figure (ils commutent sur le mode « *all or none* »), le critère de différenciation retenu alors par l'auteur afin de discriminer entre ces différents types d'objets est constitué par leurs performances respectives exprimées en terme de temps de réaction (ce qu'il nomme par ailleurs « délai synaptique » et qui correspond en fait à la vitesse à laquelle ils sont capables de passer d'un état d'équilibre discret à un autre). Cette façon d'opérer permet, pour un ensemble de composants fondamentaux fonctionnellement identiques et exhibant toujours un taux de fiabilité considéré comme acceptable, d'ordonner ce dernier suivant une modalité distributive de type hiérarchique. Une fois cette classification établie, il devient alors possible de procéder à une sélection (c'est-à-dire de s'engager dans une démarche élective). Nous reprenons les observations successivement consignées par Von Neumann dans le tableau suivant :

Type d'élément.	Temps de réaction (délai synaptique).
Tubes à vide.	10^{-6} seconde (une microseconde).
Neurones.	Autour de 10^{-3} seconde (une milliseconde).
Relais télégraphiques	10^{-2} seconde (dix millisecondes).
Dispositifs mécaniques.	Supérieur à 10^{-2} secondes.

Le fait qu'il soit ici question de définir les fondements conceptuels et pratiques qui à terme autoriseront la construction d'une machine totalement inédite représente sur ces deux plans une très forte contrainte discriminante. Contrainte absolument prépondérante en ce sens que puisque cet instrument doit être « *a very high speed computing device* », elle implique d'emblée l'exclusion de toute solution technique qui consisterait à employer pour sa fabrication des composants élémentaires dont le temps de réaction serait estimé par trop insuffisant. Attendu que le « délai synaptique » des relais télégraphiques est de l'ordre de 10 millisecondes et que celui des dispositifs purement mécaniques (*e.g.* les roues digitales), atteint invariablement des valeurs supérieures à cela, il apparaît tout à fait explicitement que ces éléments ne peuvent en aucun cas prétendre au rang de candidats éventuels pour constituer les composants fondamentaux de l'ordinateur. C'est la raison pour laquelle Von Neumann décide de ne tenir compte ni des uns ni des autres. En réalité, il débute la section 4.3.

du texte en affirmant qu'il est « *clair qu'un dispositif de calcul extrêmement rapide devrait idéalement avoir pour éléments des tubes à vide* ». Cette prétention s'appuie essentiellement sur deux arguments : d'une part, ces composants électroniques avaient largement fait la preuve de leur fiabilité lorsque employés par exemple dans des instruments intégrés tels que les *counters* et les *scalers*⁶¹⁹ ; d'autre part, cette fiabilité avait pu être éprouvée à des vitesses de commutation aussi élevées que 10^{-6} seconde, des performances à l'époque stupéfiantes qu'aucun dispositif équivalent ne pouvait raisonnablement prétendre égaler ni même approcher. On remarquera en outre que le temps de réaction des neurones biologiques (à peu près une milliseconde), se trouve également rapporté. Il va bien entendu de soi que Von Neumann n'envisage pas un instant de construire l'ordinateur à l'aide de ceux-ci (l'idée consistant à calculer en utilisant des cellules cérébrales vivantes est un fait scientifique assez nouveau⁶²⁰). En faisant état de cette performance, il s'agit plutôt pour lui de produire une valeur de référence (laquelle correspond donc à la vitesse de commutation des éléments du cerveau), et de souligner le fait que sur ce plan au moins, les tubes à vide se montrent largement supérieurs aux neurones (en moyenne ces derniers se révèlent mille fois moins rapides que les tubes). Dans le dernier paragraphe de la section 4.3., Von Neumann annonce les développements qui seront faits dans l'ultime partie du *First Draft of a Report on the EDVAC* (5.0). Trois choses, à partir de là, sont d'ores et déjà acquises : 1) les éléments de l'ordinateur seront des tubes à vide à deux états d'équilibre; 2) Ces tubes à vide devront être conventionnels, c'est-à-dire du type même de ceux qui sont proposés dans le commerce. Avant de songer à employer des tubes plus complexes, notamment des tubes capables de réaliser de nouvelles fonctions, il sera nécessaire d'analyser minutieusement le comportement des éléments électroniques déjà disponibles. En d'autres termes, ils serviront de banc d'essai pour d'éventuels développements futurs; 3) Le fonctionnement de la machine, pour des raisons qui seront exposées un peu plus loin, devra être synchrone.

Von Neumann entame la cinquième division du *First Draft* (5.0. *Principles Governing the Arithmetical Operations*), en proposant d'examiner certaines des fonctions exécutées par

⁶¹⁹ Jérôme Ramunni, dans [Ramunni, 1989], p. 49, fait allusion à ces appareils enregistreurs et compteurs d'événements qui furent mis au point et utilisés en physique subatomique dans les années trente. Assez curieusement, Von Neumann n'évoque ici ni l'E.N.I.A.C., ni le domaine de la radiophonie (grand « consommateur » de tubes à vide).

⁶²⁰ On citera notamment le professeur William Ditto qui, avec son équipe du *Georgia Institute of Technology*, est récemment parvenu à construire un calculateur biologique rudimentaire en utilisant des neurones de sangsue (*Hirundinea Medicinalis*). En connectant ces cellules vivantes avec des microélectrodes puis en reliant l'ensemble ainsi obtenu à un ordinateur, ces chercheurs sont parvenus à réaliser, avec des stimulations appropriées commandées par machine, des opérations arithmétiques élémentaires telles que l'addition de deux nombres.

la première partie de l'ordinateur, c'est-à-dire le *central arithmetical part* (CA). Les composants élémentaires de la machine, poursuit-il en rappelant ce qui a été arrêté préalablement, seront donc des tubes à vide. Ces derniers, ainsi que nous l'avons vu, sont des dispositifs électroniques à deux états d'équilibre qui opèrent sur le mode « *all or none* ». L'auteur envisage alors la possibilité de leur mise en œuvre concrète de deux manières différentes. Un tube à vide individuel, rappelle-t-il, agit fondamentalement comme une valve à courant (*current valve*) ou, si l'on préfère, comme une porte (*gate*). Dans le cas d'un constituant élémentaire tel que la triode par exemple, la cathode, une fois chauffée, diffuse en permanence des électrons par émission thermoïonique (ou thermoélectronique), tandis que l'anode (également appelée « plaque ») capte ceux-ci à condition que sa charge électrique soit positive par rapport à celle de la cathode. Entre ces deux électrodes s'en trouve une troisième, la grille (*grid*), dont la fonction consiste précisément à contrôler le passage de ce flux électronique. Si le potentiel négatif de la grille atteint une certaine valeur, celle-ci repousse les électrons et dès lors plus rien ou presque ne peut passer entre cathode et anode (la porte est ainsi « fermée »). Si au contraire la valeur du potentiel de grille demeure inférieure à ce seuil critique, le flux électronique (ou tout au moins une partie de ce flux), peut alors librement circuler (la porte est « ouverte »). Pareil *modus operandi* suppose cependant que l'intensité des différents potentiels électriques appliqués à chacune des électrodes que comprend le tube à vide soit à la fois parfaitement définie et constante afin de permettre la conservation dans le temps de l'un ou l'autre des deux états discrets que celui-ci est capable de prendre. A tout moment donc, un apport énergétique provenant de l'extérieur se trouve impérativement requis afin d'assurer le maintien d'un de ces équilibres. A côté de cela, Von Neumann précise qu'il existe également des *combinaisons* de tubes à vide possédant plusieurs équilibres parfaits et dont le fonctionnement ne nécessite aucun support électrique externe de ce genre : ce sont les *trigger circuits* (circuits déclencheurs). Les plus rudimentaires de ces *triggers circuits* possèdent en fait deux états d'équilibres parfaits (des impulsions électriques extérieures sont bien utilisées ici mais pour provoquer le passage de l'un à l'autre de ces états, non pour les entretenir), et peuvent être construits à partir de deux triodes (tube à trois électrodes) ou d'une pentode (tube à cinq électrodes dont trois sont des grilles de contrôle). Que l'on décide alors d'employer les tubes à vide comme des portes élémentaires ou que l'on choisisse de les intégrer dans des ensembles plus complexes tels que les circuits déclencheurs, il ressort de toute façon que les dispositifs privilégiant des équilibres à deux états – donc les systèmes de type « *all or none* » - sont les plus élémentaires qui soient effectivement concevables. En conséquence, et puisque la nouvelle machine doit être aussi simple que

possible, ce sont donc ces éléments qui seront en tout premier lieu retenus pour sa fabrication. Ceci étant définitivement posé, Von Neumann poursuit en formulant la proposition essentielle suivante: « *Since these tube arrangements are to handle numbers by means of their digits, it is natural to use a system of arithmetic in which the digit are also two valued. This suggest the use of the binary system.* ».

L'idée consistant à faire usage du système binaire afin de représenter les nombres en machine – puisque c'est bien de cela dont il s'agit ici - n'était pas à proprement parler quelque chose de nouveau. En 1936, l'allemand Konrad Zuse avait déjà expérimenté ce principe en construisant la mémoire mécanique de ce qui allait devenir sous peu le calculateur digital électromécanique Z1 tandis que de l'autre côté de l'atlantique, et sans avoir jamais eu aucun écho des travaux de recherche conduits dans le même temps par l'ingénieur berlinois, John V. Atanasoff avait dès 1937 jeté les bases théoriques fondamentales sur lesquelles allait être développé quelques années plus tard l'Atanasoff-Berry Computer, le premier calculateur électronique binaire de l'histoire⁶²¹. Il est évident que Konrad Zuse, en raison même de sa nationalité, ne devait jamais exercer aucune espèce d'influence sur l'équipe de la *Moore School*. Mais il en allait bien sûr tout autrement de John V. Atanasoff dont sait à quel point ses idées eurent un impact particulièrement important sur les recherches de John W. Mauchly (et par nécessaire voie de conséquence sur celles de ses compagnons de travail). En dépit du succès rencontré par ces deux tentatives relativement précoces, et tout spécialement par celle d'Atanasoff, on se souvient pourtant que l'E.N.I.A.C., le premier grand calculateur électronique à avoir jamais été fabriqué dans le monde, était une machine opérant en base décimale et non pas en base dyadique. Comme nous nous sommes attachés à le démontrer plus haut, la décision d'utiliser la base décimale pour l'E.N.I.A.C. avait été essentiellement motivée par le fait que son architecture – déterminée dans l'urgence imposée par la deuxième guerre mondiale - ne différait guère de celle des grands calculateurs à relais de la période, lesquels, à l'instar des anciennes machines à calculer mécaniques de Pascal ou de Babbage, travaillaient tous en base dix. Cette solution, avec le confortable recul que nous autorise aujourd'hui la possibilité d'une considération rétrospective de l'histoire de l'informatique, ne manque pas de nous paraître quelque peu surprenante, comme si, avec le formidable calculateur électronique de la *Moore School*, une dimension primordiale de l'héritage d'Atanasoff avait été inexplicablement manquée. Mais, et il en est souvent ainsi, il ne faut

⁶²¹ Il faudrait ici aussi mentionner le *Complex Relay Calculator* et le *Relay Interpolator* de George Stibitz (*Bell Labs*), respectivement opérationnels en 1940 et 1943. Pour représenter les nombres décimaux, la première de ces machines utilisait le schème de codage dit « forme décimale codée en binaire plus trois », la seconde, la représentation biquinaire.

surtout pas omettre le fait que ce qui nous semble être d'une évidence confondante aujourd'hui – *i.e.* le recours à la numération binaire – ne l'était pas du tout à l'époque. Il fallut en réalité attendre que l'E.N.I.A.C. soit partiellement opérationnel pour que ses nombreux défauts commencent à se faire jour véritablement. C'est alors de l'intense travail de réflexion qui fut conduit par Von Neumann, mais aussi par Eckert et Mauchly, sur la base de la constatation de ces imperfections et incommodités multiples que se dessina progressivement l'idée de l'ordinateur. Dans la cinquième partie du *First Draft*, le mathématicien de Princeton suggère donc l'utilisation du système binaire pour l'E.D.V.A.C. La mise en lumière des motifs qui sont à l'origine de l'introduction de ce principe presque inédit impose que nous retracions brièvement la chaîne de son raisonnement et que nous prenions ensuite la pleine mesure des conséquences que cela entraîne pour la nouvelle machine. Von Neumann a démontré que les tubes à vide appelés à constituer les composants élémentaires de l'ordinateur, de la même manière par exemple que les relais électromagnétiques, les neurones biologiques et les neurones formels de McCulloch et Pitts, appartenaient à la classe des « *elements* ». Ces objets, nous l'avons vu, se caractérisent essentiellement par le fait qu'ils possèdent deux états stables (quelquefois plus), et qu'ils fonctionnent sur le mode du « tout ou rien », ce qui revient à affirmer que quant un de ces états est actualisé, l'autre ne l'est jamais et inversement. De façon générale, on peut dire que le passage d'un état d'équilibre à l'autre est provoqué par la présence d'une stimulation – dans le cas des tubes il s'agit d'impulsions électriques – provenant de l'extérieur du dispositif et se propageant à l'intérieur via sa ou ses lignes afférentes. Lorsqu'un pareil changement de disposition interne se produit, l'élément émet plus ou moins instantanément sur sa ou ses lignes efférentes un signal d'intensité égale à celui qu'il vient de recevoir. Cette impulsion sortante va alors servir à déclencher une action (possiblement une commutation), dans le ou les constituants qui se trouvent directement reliés à ce composant particulier. Au sein de l'ordinateur, le rôle de cette espèce d'« *elements* » que sont les tubes à vide consiste fondamentalement à permettre la représentation et la manipulation de nombres sous forme électronique (répétons encore à propos de ce qui est représenté qu'il peut s'agir de données numériques ou bien de valeurs codant pour des instructions ou des symboles). Grâce à ces constituants, il est possible de stocker les différents chiffres qui composent ces nombres, d'effectuer sur eux certaines transformations (par l'entremise de circuits arithmétiques spécialisés), et de les transférer d'un point à l'autre de la machine en fonction des besoins spécifiquement définis par la procédure en cours. Bref, il est possible de calculer. Etant donné cela, il apparaît alors tout à fait naturel à Von Neumann de songer à recourir pour cette représentation à un système arithmétique dans lequel les nombres

devant être traités par l'ordinateur se trouveraient exprimés avec deux valeurs seulement, c'est-à-dire à un langage mathématique dont les termes se révéleraient être en parfaite adéquation avec le fonctionnement « *all or none* » des tubes à vide qui le composent (et, plus généralement, avec celui des « *elements* »). En procédant de la sorte, on supprime ainsi le décalage ou l'hétérogénéité qui autrement existerait entre la manière dont les nombres sont fournis à la machine et le mode opératoire des dispositifs élémentaires au moyen desquels celle-ci peut tout à la fois les représenter et opérer sur eux. Le système binaire, qui, rappelons-le, ne fait appel qu'au 1 et au 0 – donc au « tout » et au « rien », à la présence et à l'absence – semble alors s'imposer de la façon la plus naturelle qui soit à l'auteur : puisque, tout comme les tubes à vide, cette sorte de numération ne possède en tout et pour tout que deux « états » possibles - comprendre deux valeurs exclusives – elle se pose par conséquent en candidat idéal pour devenir le langage spécifique de l'ordinateur.

L'élection du système dyadique afin de représenter les nombres en machine et de calculer, on le devine, ne se fait pas sans entraîner un certain nombre de conséquences théoriques et pratiques très importantes pour la suite du projet de Von Neumann. L'arithmétique binaire, écrit-il, possède en effet une structure logique beaucoup plus simple et « unifiée » (*a simpler and a more one piece logical structure*), que tous les autres systèmes, à commencer par celui qui, *de facto*, nous est le plus naturel, c'est-à-dire le système décimal. La première de ces conséquences, que l'auteur examine dans la section 5.2. du texte (*Binary vs. decimal system*), concerne l'extrême simplification des opérations de multiplication et de division qu'un usage cohérent (*consistent use*) de cette solution mathématique est susceptible d'autoriser. Avant cela, et sur la plupart des grandes machines à calculer digitales - lesquelles opéraient toutes en base décimale - un certain nombre de dispositifs techniques avaient été conçus en vue d'accélérer l'effectuation de la division et de la multiplication, de loin les opérations arithmétiques élémentaires les plus coûteuses à réaliser en termes de temps d'exécution. L'I.B.M. A.S.C.C. / Harvard Mark I et l'E.N.I.A.C. par exemple étaient tous deux pourvus d'unités arithmétiques étroitement spécialisées qui permettaient d'effectuer ces deux opérations en réduisant assez considérablement le temps moyen requis pour leur réalisation. En ce qui concerne la multiplication, et à côté des tables construites en « dur », la méthode généralement implémentée par ces modules électromécaniques ou électroniques consistait tout d'abord à former les produits partiels puis à les additionner les uns aux autres afin d'obtenir le résultat final, exactement comme lorsque l'on effectue ce genre d'opération à la main ou que l'on utilise un ensemble de réglettes de Napier (ou Neper) pour calculer. Selon les estimations de Michael R. Williams, cette procédure assez onéreuse – étant bien entendu

qu'elle impliquait tout à la fois la conception, la fabrication et l'intégration de modules spécifiquement dédiés – était 4,5 fois plus rapide que la méthode consistant à réaliser une multiplication par addition réitérée. En dépit de cette amélioration notable – tout de même acquise au prix d'une augmentation significative de la complexité structurelle déjà immense de ces gros calculateurs - la durée nécessaire pour exécuter une multiplication et, plus encore, celle exigée pour effectuer une division par soustraction répétée étaient toujours trop importantes en ceci que, malgré l'investissement matériel spécialement consenti afin de les réduire, elles continuaient à grever lourdement la vitesse d'opération générale de la machine. Or il s'avère que la numération à base deux dont Von Neumann propose ici l'emploi pour le prototype de l'ordinateur, parce que foncièrement plus simple que le système décimal utilisé jusque-là dans le domaine de la computation automatique, permet de se passer totalement de ces différentes méthodes de calcul avec cette conséquence évidente qu'en procédant de la sorte, il n'est désormais plus du tout nécessaire d'adjoindre à la machine les unités spécialisées accélérant leur exécution. En d'autres termes, ceci revient à affirmer que l'adoption du système binaire ouvre sur la possibilité d'une diminution considérable de la complexité du dispositif à construire. En optant ainsi pour une économie mathématique ultra condensée facilitant « naturellement » l'effectuation des opérations arithmétiques les plus élémentaires, en l'occurrence celle qui correspond idéalement au fonctionnement de ses constituants fondamentaux, on se trouve donc en mesure de simplifier grandement l'architecture de la machine sans pour autant que sa puissance de calcul ne s'en trouve le moins du monde amoindrie. Cependant, remarque immédiatement l'auteur, un recours « excessif » au système binaire risquerait de causer de sérieux problèmes aux futurs utilisateurs de l'ordinateur. En effet, on n'est pas sans savoir que l'être humain, dès son plus jeune âge, est en général habitué à travailler en numération décimale. Le binaire, même s'il est de fait plus simple et plus économique que le système de numération en base dix, constitue donc pour l'homme quelque chose de particulièrement contre intuitif. En conséquence, il y a fort à parier qu'il risquerait d'éprouver d'énormes difficultés à élaborer, à manipuler et à interpréter les longues chaînes numériques intégralement formées de 0 et de 1 servant à représenter les instructions et les données nécessaires au fonctionnement de la machine mais aussi les résultats qu'elle produit après avoir effectué une quelconque procédure de calcul. Afin de prévenir l'apparition plus que probable de cette complication – à quoi bon en effet disposer de la machine à calculer la plus rapide et la plus puissante qui soit au monde si l'on doit systématiquement perdre un temps considérable pour concevoir ses programmes et déchiffrer ses sorties ? – Von Neumann préconise que l'ensemble du matériau numérique

devant être manipulé par les utilisateurs de l'ordinateur au cours des phases préparatoires et terminales de son opération soit exprimé en numération décimale. En revanche, note ensuite le mathématicien, il est impératif que ce *même* matériau soit exprimé en binaire quant il se trouve en machine afin d'y être traité. Pour le dire encore autrement, toutes les informations stockées sur R (les mémoires externes placées en entrée et en sortie du système), devront être représentées en base dix dans le but de faciliter le travail des opérateurs tandis que toutes celles qui sont dans l'ordinateur, c'est-à-dire dans CA , CC et M devront être représentées en binaire (étant donné que ces organes internes opèrent uniquement en base deux). Le problème auquel on se trouve donc confronté ici concerne la réalisation automatique d'une double conversion de base : il s'agit tout d'abord de passer de la numération décimale à la numération en base deux puis, une fois le traitement de ces quantités binaires effectué par l'ordinateur, d'accomplir l'opération inverse en vue d'obtenir des résultats immédiatement compréhensibles, ou presque, par l'être humain. La solution qui se présente de la façon la plus évidente en vue de résoudre cette difficulté consisterait à installer des dispositifs de conversion automatique décimal-binaire et binaire-décimal sur les lignes d'entrée et de sortie de l'ordinateur, c'est-à-dire I et O . Cependant, il est tout à fait clair que l'intégration de tels organes spécialisés au sein de l'ordinateur – et bien entendu celle des multiples circuits électroniques nécessaires à leur contrôle – aurait pour conséquence obligée d'en compliquer nettement l'architecture, chose que Von Neumann, depuis le tout début, s'efforce justement d'éviter à tout prix. Habitué en permanence par cette exigence de simplicité, et puisque l'ordinateur est fondamentalement une machine à calculer universelle, l'auteur, de manière remarquablement élégante, propose plutôt de confier la réalisation de ces différentes procédures de conversion mathématique à l'unité arithmétique de la machine (CA), les opérations de coordination spécifiquement requises ici pour piloter I et O devant alors échoir au *central control*. De la sorte, on voit bien que la simplicité de l'architecture de l'ordinateur se trouve préservée et l'objectif visé parfaitement atteint. Von Neumann, assez malheureusement, n'explique cependant pas comment il entend précisément faire exécuter ces deux sortes de transformations numériques par la machine. Certes, il invite bien son lecteur à consulter la section 11.4. du *First Draft* (11.4. *Complete list of operations : +, -, x, ÷, $\sqrt{\quad}$, i, j, s and conversions*), en vue d'obtenir plus de précisions concernant ce point particulier, mais après avoir fait état de la liste exhaustive des opérations élémentaires que le *central arithmetical* devra nécessairement pouvoir effectuer, à savoir +, -, x, ÷, $\sqrt{\quad}$, i, j et s^{622} , il se

⁶²² Dans la onzième partie du texte, Von Neumann indique que le *central arithmetical* (i.e. CA) possède deux

contente d'y adjoindre deux fonctions supplémentaires, db et bd , supposées réaliser automatiquement ces conversions. Leur examen détaillé, lui, est remis à plus tard et ne figure pas dans ce document.

Von Neumann consacre les cinq dernières sections de la cinquième partie du *First Draft* à la résolution de ce qu'il désigne comme étant une « question de principe ». Ici, il s'agit de savoir si, en vue d'améliorer les performances de la future machine binaire, il convient d'opter pour une architecture de type parallèle ou, au contraire, de se décider en faveur d'une architecture sérielle. Sachant que la quasi totalité des ordinateurs que nous utilisons aujourd'hui sont des machines à architecture Von Neumann, donc des machines fonctionnant selon la modalité sérielle, on ne peut que prendre la mesure du caractère absolument crucial de ce qui en train de se jouer en ce moment précis. Fort logiquement, les questions qui nous viennent immédiatement à l'esprit sont les suivantes : pour quelles raisons le mathématicien, en définitive, a-t-il choisi de privilégier l'approche sérielle ? Ou encore : qu'est-ce qui l'a conduit à rejeter la solution pourtant déjà parfaitement éprouvée du parallélisme ? Les motifs qui ont présidé à cette décision capitale, nous allons à présent le voir de manière détaillée, ne diffèrent pas des grands principes qui ont jusque-là déterminé les grandes orientations du *First Draft of a Report on the EDVAC* : 1) l'architecture de l'ordinateur doit être aussi simple que possible ; 2) la machine, étant électronique, est formidablement rapide, ce qui autorise certaines formes de compensations autrement impossibles.

Dès le départ, l'argumentation développée par Von Neumann prend une tournure à la fois comparative et quantitative. Il commence tout d'abord par formuler quelques brèves remarques d'ordre technique et méthodologique à propos du fonctionnement des machines à calculer digitales dont les éléments constitutifs ne sont pas électroniques. A dire vrai, et puisqu'il est ici spécifiquement question des systèmes dont les composants élémentaires ne sont pas des tubes à vide, ces quelques observations intéressent en réalité la totalité des

lignes d'entrée (respectivement dénotées par les symboles I_{ca} et J_{ca}), ainsi qu'une ligne de sortie (dénommée O_{ca}). Fondamentalement, ces lignes afférentes et efférentes internes sont destinées à permettre au CA de recevoir les informations émises par M ou, au contraire, de lui en renvoyer (le tout sous le contrôle permanent du CC). Les opérations i et j autorisent en fait l'effectuation de transferts directs de données entre I_{ca} ou J_{ca} et O_{ca} . Ainsi, en utilisant le CA comme une simple station de transit (dans ce cas précis aucune espèce de transformation n'est réalisée par l'unité arithmétique), il devient possible de déplacer facilement des données d'un emplacement de M à un autre, chose qui autrement aurait nécessité que l'on connecte directement et massivement toutes les parties de la mémoire principale les unes avec les autres (au prix d'un accroissement de la complexité de M). La fonction de l'opération s , quant à elle, consiste à effectuer un choix entre les deux termes d'une alternative : quatre nombres x , y , u et v , étant donnés, elle « choisira » u si et seulement $x \geq y$ et v dans le cas contraire. Une fois ce choix effectué, la procédure en cours pourra être poursuivie.

calculateurs digitaux ayant été construits avant que le *First Draft of a Report on the EDVAC* ne soit rédigé⁶²³:

« *In all existing devices where the element is not a vacuum tube the reaction time of the element is sufficiently long to make a certain telescoping of the steps involved in addition, subtraction, and still more in multiplication and division, desirable* ».

La notion qu'il convient de bien repérer ici est celle de « *telescoping* ». Nous y reviendrons sous peu. Afin de préciser un peu mieux le sens de sa pensée et de faciliter la compréhension des développements qui vont suivre, Von Neumann propose d'examiner un exemple concret : celui de la multiplication binaire (remarquons qu'il aurait tout aussi bien pu s'agir de la division, l'un des deux opérations arithmétiques élémentaires qui, avec la multiplication justement, est la plus longue à exécuter pour un calculateur). Le niveau de précision devant être atteint pour résoudre de façon satisfaisante de nombreux problèmes mathématiques impliquant des équations différentielles, note l'auteur, nécessite en général que l'on calcule au moins huit chiffres décimaux significatifs, c'est-à-dire que l'on s'efforce de maintenir les erreurs d'arrondi susceptibles de survenir au cours de la computation en deçà d'une valeur seuil correspondant à 10^8 . Exprimée en numération dyadique, cette quantité est égale à 2^{27} . En d'autres termes, parvenir à une pareille précision en binaire requiert impérativement que l'on calcule au moins 27 chiffres significatifs. En fonction de cette exigence particulière, mais dont le respect s'avère indispensable pour résoudre convenablement bon nombre de problèmes en mathématique et en physique, effectuer une multiplication en binaire revient donc à apparier un à un les 27 chiffres composant le multiplicande avec les 27 chiffres composant le multiplicateur. Pour obtenir le résultat final de cette multiplication, il suffit ensuite de former chacun de ces produits partiels (dont l'issue est toujours égale à 1 ou à 0), puis de les combiner et de les positionner. Von Neumann estime à 27^2 , soit 729, le nombre d'étapes (*steps*), requis pour réaliser une opération de ce type. En tenant compte maintenant des différents pas de calcul correspondant aux procédures de combinaison et de positionnement des produits intermédiaires, il suppose que ce nombre est en réalité très susceptible d'atteindre une valeur comprise entre 1000 et 1500. Immédiatement après, il remarque qu'en numération décimale, le calcul de la même multiplication, avec le même degré de précision, ne nécessite la réalisation que d'une centaine d'étapes, ce qui, dans

⁶²³ Incidemment, ces remarques concernent aussi l'Atanasoff Berry Computer et l'E.N.I.A.C. car bien que ces calculateurs aient été électroniques, ils fonctionnaient tous deux en parallèle.

le pire des cas (ou le meilleur, tout dépend), est 15 fois moins qu'en binaire. Présentées de la sorte, c'est-à-dire *a priori*, ces données numériques « brutes » semblent clairement démontrer que la numération décimale, parce plus économique que la numération binaire sur le plan du nombre de pas de calcul devant être effectué pour exécuter une opération aussi coûteuse en temps que l'est effectivement la multiplication, est de loin plus intéressante que cette dernière. Cependant, en considérant les choses de façon plus circonstanciée, on se rend compte assez rapidement que cette soi-disant supériorité du système décimal sur le binaire – et par voie de conséquence celle des machines opérant en base dix sur les machines travaillant en base deux – n'est qu'apparente. En effet, et même si le nombre d'étapes impliquées dans le calcul d'une multiplication réalisée en numération décimale se révèle être très peu important (entre 8^2 et 10^2 pas), il apparaît en définitive qu'une telle « performance » ne peut être acquise qu'au prix d'un accroissement inévitable de la complexité architecturale du calculateur : ainsi, pour parvenir à ce rendement, des unités de calcul spécialisées, ordinairement des tables de multiplication ou de division construites « en dur », devaient systématiquement être rattachées aux machines. Or, comme nous l'avons vu, c'est précisément l'utilisation de ce genre d'expédients matériels qu'un emploi cohérent du système binaire permet d'éviter : à ce prix, indique l'auteur, il est en effet possible d'abrégé le temps d'exécution des procédures de calcul en recourant à certains « artifices » binaires qui, étant directs, ne nécessitent aucunement l'adjonction de modules arithmétiques spéciaux au calculateur.

Poursuivant le cours de son raisonnement, Von Neumann s'emploie ensuite à démontrer que la vitesse d'un calculateur universel non électronique opérant en binaire et dépourvu de ces « artifices » – un instrument purement hypothétique donc – serait intolérablement lente. Le temps de réaction des relais ordinaires se situant généralement au-delà des 10 millisecondes, il estime qu'il faudrait au mieux entre 10 et 15 secondes à une machine digitale binaire construite avec des éléments de ce type – les plus rapides immédiatement après les tubes à vide – pour effectuer une multiplication (à 8 chiffres décimaux). A titre de comparaison, il fait mention des machines à calculer de bureau modernes et des multiplicateurs I.B.M. standards⁶²⁴ – des calculateurs digitaux décimaux à relais disponibles à l'époque dans le commerce – pour lesquels ce temps d'exécution, pour la même opération, s'élevait respectivement à 10 et 6 secondes (ce qui représentait tout de même un délai d'attente assez important). De façon manifeste, il ressort donc de cette brève démonstration qu'en l'état, on ne gagnerait strictement rien à construire un calculateur de ce

⁶²⁴ Comme les modèles I.B.M. 601, 602, 602A et 603.

genre. En vérité, et compte tenu du coût énorme, des performances extrêmement décevantes et du temps considérable qu'il faudrait consacrer à la conception et à la fabrication d'une telle machine, on serait même excessivement perdant. Dans ces conditions, mieux vaudrait alors se satisfaire des calculateurs déjà existants. Maintenant, révèle le mathématicien, il existe certaines procédures logiques – les « artifices » binaires dont il était question plus haut - qui permettent d'écourter énormément ces temps d'exécution. Ce sont les « *telescoping operations* ». Remarquons que le terme « *telescoping* », ici, est peut-être un peu trompeur. L'expression « *telescoping operations* », en effet, ne signifie pas que lorsque certaines opérations arithmétiques sont effectuées par la machine, elles sont amenées, d'une manière qu'honnêtement nous ne saurions ni concevoir ni justifier, à s'entrechoquer les unes avec les autres. Pour comprendre ce dont il s'agit en réalité, il nous semble que l'évocation d'une lunette télescopique, instrument d'observation astronomique dont les éléments *s'emboîtent* et *coulissent* les uns dans les autres, est appropriée. Lorsqu'il est complètement replié, on sait que, d'une certaine manière, un dispositif de ce genre « se contient lui-même » : par coulissements consécutifs, et selon un ordre hiérarchique, les parties tubulaires possédant le plus fort diamètre reçoivent ainsi intégralement celles dont le diamètre est moindre. Au final, un seul constituant – le cylindre le plus volumineux - renferme *concurrentement* tous les autres, ce qui autorise bien évidemment un gain spatial particulièrement appréciable quant on veut remiser ou plus simplement transporter la lunette. Le principe du « télescopage » des opérations, qui lui, on l'a bien compris, permet de réaliser une économie de temps, est également basé sur le concept de simultanéité. Il consiste, *dixit* Von Neumann, à « *exécuter simultanément autant d'opérations que possible* », autrement dit, à mener en *parallèle* plusieurs computations. Le problème, ici, est que le caractère complexe de certaines phases entrant dans la réalisation de la totalité des opérations arithmétiques élémentaires – nous songeons tout spécialement à la propagation des retenues – interdit d'emblée que celles-ci soient effectuées en une seule passe (ce qui bien entendu aurait représenté une situation idéale). Ce dernier point se vérifie non seulement pour les opérations les plus difficiles, c'est-à-dire la multiplication et la division, mais aussi pour l'addition et la soustraction, qui sont des opérations beaucoup plus simples que les deux premières. Nonobstant cette impossibilité de fait, la mise en œuvre de nombreuses procédures de type parallèle est encore envisageable. Dans les cas de l'addition et de la soustraction par exemple, il sera possible d'opérer comme suit : 1) au cours d'une première étape, combiner une à une *toutes* les unités constitutives des nombres à sommer ou à soustraire et mémoriser les retenues éventuellement engendrées lors de ce processus ; 2) effectuer le report de *l'ensemble* de ces retenues durant une deuxième

phase ; 3) poursuivre l'exécution du calcul en respectant ce schème alternatif avec les sommes intermédiaires jusqu'à obtention du résultat final. *Mutatis mutandis*, on pourra suivre une procédure similaire – ou une autre de même nature - afin d'exécuter une multiplication ou une division. Comme le fait remarquer immédiatement après Von Neumann, ces différentes méthodes de « télescopage » étaient en fait couramment utilisées sur les calculateurs digitaux décimaux et binaires des années 30 et 40. De fait, et que leurs composants élémentaires aient été mécaniques, électromécaniques, électromagnétiques ou électroniques, le fonctionnement de tous les calculateurs numériques fabriqués avant la rédaction du *First Draft* (on citera le Z1, le Z2, le Z3, l'A.B.C., le R.I., le C.N.C., les Bell Model III et IV, l'I.B.M. A.S.C.C. Harvard Mark I, l'E.N.I.A.C.), et même après (Harvard Mark II), était de type parallèle. Au regard des objectifs spécifiquement poursuivis par l'auteur, cette façon d'écourter le temps d'exécution des calculs, pourtant largement répandue et éprouvée à l'époque, possédait cependant un grave défaut : il existe en effet un rapport direct de proportion entre le temps que l'on est effectivement en mesure d'économiser en parallélisant les calculs et la quantité d'équipement qui est impérativement requise pour cela. Ainsi, et c'est l'exemple qu'il propose afin d'illustrer ce phénomène, diviser par deux la durée d'une computation en effectuant simultanément deux additions à l'aide d'un calculateur implique nécessairement que l'on double le nombre de ses unités additionneuses (et bien entendu celui des circuits de contrôle correspondant). En résumé, on perd donc d'un côté (matériel) ce que l'on gagne de l'autre (temps). De là, il est possible de conclure que l'approche paralléliste peut se voir globalement caractérisée au moyen de la règle générale suivante: le temps de calcul qu'elle permet d'épargner est strictement proportionnel à la complexité architecturale, ou, si l'on préfère, au nombre d'éléments, de la machine élaborée selon ce principe.

Von Neumann termine cette partie en affirmant que ce procédé – le parallélisme - se justifie pleinement dans le cas des dispositifs dont les éléments ne sont pas des tubes à vide (ce qui sous-entend évidemment qu'il n'en va pas du tout de même à partir du moment où l'on a affaire à des machines électroniques). Il étaye ce point de vue en avançant deux arguments principaux: d'une part, il affirme qu'ici, la priorité de toutes les priorités a toujours consisté à essayer de gagner du temps (« *gaining time is of the essence* » écrit-il). Si le délai de commutation des éléments considérés est médiocre (au regard de celui offert par les composants électroniques), le parallélisme apparaît donc comme la solution par excellence afin de compenser cette lenteur; d'autre part, il suppose que l'expérience présente des ingénieurs est désormais suffisante pour leur permettre « de s'occuper » - comprendre concevoir, fabriquer et faire la maintenance – d'un système parallèle, autrement dit d'une

machine comportant un très grand nombre d'éléments. Enfin, il estime à plus d'une dizaine de milliers le nombre de composants (très vraisemblablement des relais électromagnétiques), qui seraient nécessaires pour construire un « système de calcul automatique universel » suivant ces grandes lignes⁶²⁵. Faisant cela, Von Neumann accorde donc qu'en principe et en fait, la construction d'un ordinateur parallèle non électronique fonctionnant en binaire est chose tout à fait concevable (du reste, une telle machine contiendrait sûrement moins d'éléments que l'E.N.I.A.C. et, c'est certain, encore moins que l'I.B.M. A.S.C.C.). Toutefois, et puisqu'il est spécifiquement question ici de la conception d'un ordinateur électronique et non pas de celle d'un ordinateur à relais, il finit par écarter (momentanément et non définitivement), la possibilité qui consisterait dans cette perspective à user du principe du parallélisme. Reste alors à répondre à deux questions : qu'est-ce qui l'autorise à faire cela et comment entend-il maintenant procéder ?

La section 5.5. du *First Draft* (5.5. *Role of very high speed (vacuum tubes): Principle of successive operations*), débute comme suit: « *For a vacuum tube element device on the other hand, it would seem that the opposite procedure holds more promise* ». La procédure à laquelle Von Neumann fait ici référence en affirmant d'elle qu'elle paraît extrêmement prometteuse concernant les machines électroniques se situe en fait à l'exact opposé de ce que représente l'approche simultanéiste. En d'autres termes, et si, par essence, le parallélisme suppose que l'on effectue plusieurs opérations en même temps, cette autre façon de faire implique au contraire que chaque opération soit traitée individuellement et selon l'ordre de la successivité, c'est-à-dire de manière sérielle. Fort légitimement nous semble-t-il, on ne peut alors que s'interroger sur les motivations réelles qui ont pu conduire l'auteur à proposer l'emploi de la sérialité pour l'E.D.V.A.C., un principe opérationnel resté jusque-là complètement inédit dans le domaine du calcul automatique (les choses, on le sait, ont considérablement changé depuis). Après tout, nous l'avons déjà dit, tous les calculateurs digitaux construits avant 1945 fonctionnaient en parallèle et il est bien évident que si les concepteurs de ces machines s'étaient invariablement trouvés dans l'obligation de se tourner vers ce coûteux principe – puisqu'il entraîne obligatoirement un accroissement notable de leur complexité - ce n'était sûrement dans la perspective de relever à chaque fois un quelconque défi technologique: il s'agissait toujours de réduire les temps de réponse des calculateurs et ceci, par la force des choses, ne se pouvait faire qu'en recourant au parallélisme. Dans ces conditions, et *a priori*, il semble donc que la proposition formulée par Von Neumann –

⁶²⁵ Cette estimation se base sans doute principalement sur l'expérience qu'il a pu acquérir en travaillant sur l'E.N.I.A.C.

abandonner le parallélisme au profit de la sérialité – n'aille pas du tout de soi et que, de surcroît, elle mène à une forme d'impasse : une machine de cette sorte serait certes nettement plus simple qu'un dispositif opérant en parallèle mais, et ce serait là le prix à payer pour cette simplification, elle devrait être aussi beaucoup plus lente. Si la position de l'auteur est susceptible d'apparaître à ce stade comme quelque peu paradoxale, en réalité elle ne l'est pas car les éléments de la machine dont il a en tête la réalisation, rappelons-le, sont exclusivement des composants électroniques, c'est-à-dire des constituants élémentaires à deux états distincts dont le temps de commutation équivaut seulement à une ou deux microsecondes (contre cinq millisecondes pour les relais les plus performants !). Cette vitesse absolument extraordinaire, en tout cas pour l'époque, constituait en fait une des conditions de possibilité essentielles de l'ordinateur à architecture Von Neumann. Voyons exactement pour quelles raisons. Dans les sections 4.3. et 5.3. du document, il a été indiqué d'une part que le temps de réaction des tubes à vide du type le plus ordinaire était de 10^{-6} seconde et que, d'autre part, le nombre de pas de calcul *successifs* nécessaires pour effectuer la multiplication binaire de deux nombres à 27 chiffres *sans utiliser aucune procédure de télescopage* se situait dans une fourchette allant de 1000 à 1500. Selon que l'on se réfère ici à la limite inférieure ou à la limite supérieure de cette estimation, on peut donc déduire – tout comme le fait Von Neumann - que le calcul d'une telle multiplication réclamera entre 1 et 1,5 milliseconde à un ordinateur (c'est-à-dire à une machine universelle électronique, binaire et sérielle). Le mathématicien poursuit son propos en remarquant qu'il faudrait sensiblement le même délai pour calculer une division ou une racine carrée de cet ordre. Dans les mêmes conditions, et puisque ce sont des opérations arithmétiques beaucoup plus simples que la multiplication et la division (leur effectuation ne nécessite en effet la réalisation que d'une cinquantaine de pas de calcul, voire d'une trentaine seulement), il faudrait attendre entre 0.3 et 0.5 millisecondes pour voir achevée l'exécution d'une addition ou d'une soustraction. De là, Von Neumann conclut naturellement que l'architecture de la nouvelle machine n'a nullement besoin d'être de type parallèle. D'abord parce qu'il semble considérer que ces performances, dont l'appréciation a été faite exclusivement sur la base d'un fonctionnement sériel, répondent complètement à ses attentes. Ensuite, et c'est là grande prudence de sa part, parce qu'il estime nécessaire le fait de bien se familiariser avec ce genre d'instruments (et avec les méthodes de calcul numériques dont ils impliquent la définition), avant de s'aventurer à vouloir concevoir une machine plus complexe. Von Neumann ne rejette donc pas totalement l'idée d'un ordinateur électronique parallèle. Mais en attendant de voir réunie toute l'expérience nécessaire à son éventuelle concrétisation, il choisit de la mettre en suspens. En outre, il s'interroge sur le bénéfice réel qu'il y aurait à

tirer ici de l'emploi des méthodes de « télescope ». Le problème, pour l'exposer brièvement, est le suivant : fabriquer un ordinateur électronique parallèle reviendrait comme on l'a vu à construire une machine comportant un nombre extrêmement élevé d'éléments, en l'occurrence des tubes à vide. Or ceci ne peut se faire sans soulever un certain nombre de difficultés techniques à commencer bien entendu par celles que représentent la maintenance d'un système aussi complexe et la dissipation des radiations caloriques qu'émettent forcément les composants électroniques à partir du moment où ils sont mis sous tension. En vérité, et à eux seuls, ces deux facteurs contraignants nécessiteraient impérativement que l'on abaisse la fréquence d'opération des tubes (donc que l'on augmente leur seuil de tolérance ou, ce qui revient au même, que l'on diminue la vitesse à laquelle ils commutent), afin d'accroître leur fiabilité. Resterait alors à voir, et Von Neumann émet ici de sérieuses réserves, si le temps de calcul que l'on pourrait gagner en parallélisant les opérations serait véritablement à la hauteur de cette diminution fréquentielle... Un autre problème important, mais qui curieusement n'est pas abordé ici, est celui qu'aurait indubitablement posé à cette époque la mise au point d'une mémoire principale pour un ordinateur parallèle. L'ordinateur étant par définition une machine à mémoire interne, on sait qu'il lui faut disposer d'unités spéciales pour stocker ses programmes et ses données. Or en 1945, les seuls instruments à même de remplir cette fonction de manière satisfaisante étaient les lignes délai acoustiques au mercure, des dispositifs analogiques à la précision somme toute assez changeante et qui opéraient en mode sériel. Ceci étant rappelé, et dans le but de bien saisir la nature exacte de cette complication, on peut alors imaginer l'expérience suivante : admettons que l'on veuille fabriquer un ordinateur parallèle à tubes dont la longueur de mot serait de n bits et que l'on dispose pour réaliser sa mémoire centrale de lignes délai au mercure de capacité strictement équivalente. Le fonctionnement de ces lignes étant sériel, chacune d'entre elles pourra stocker et transmettre n bits à l'ordinateur, mais les uns à la suite des autres, non en même temps. Maintenant, et puisque la machine est supposée pouvoir traiter n bits simultanément, il faudra impérativement que tous ces éléments d'information lui parviennent au même instant (faute de quoi elle ne pourra travailler et l'on risquera en plus de perdre l'intégralité des données transmises). En raison de cette exigence, la possibilité d'employer une unique ligne mémoire se trouve donc d'emblée exclue. La seule solution envisageable ici consiste en réalité à utiliser n lignes délai couplées les unes aux autres de telle sorte que le premier bit de la première ligne soit transmis à la machine en même temps que le premier bit de la deuxième, que les premiers

bits de la première et de la deuxième ligne arrivent en même temps que le premier bit de la troisième, et ainsi de suite jusqu'au n -ième bit de la n -ième ligne mémoire⁶²⁶ (en d'autres termes il s'agit de rendre simultanée l'opération de n dispositifs sériels). Outre le fait évident que la mise en œuvre d'un pareil procédé aurait eu pour conséquence obligée de compliquer énormément la structure de la machine - et en se souvenant également que les propriétés physiques du mercure sont thermodépendantes - on se figure sans peine quel genre de cassette technique aurait à coup sûr représenté la synchronisation parfaite et la maintenance de ces mémoires (sans même parler de celles des circuits dédiés au *timing* des data path et des différentes unités fonctionnelles de l'ordinateur). Au regard de ce qui vient d'être exposé, on voit qu'en 1945 aucune impossibilité de principe ne s'opposait à ce que l'on conçoive un ordinateur parallèle électronique mais à côté de cela, force est aussi faite de constater que sur le plan de l'ingénierie, c'était une toute autre affaire...

Von Neumann termine cette section en formulant le principe fondamental suivant

« The device should be as simple as possible, that is, contain as few elements as possible. This can be achieved by never performing two operations simultaneously, if this would cause a significant increase in the number of elements required. The result will be that the device will work more reliably and the vacuum tubes can be driven to shorter reaction times than otherwise ».

Nul doute que cette décision cruciale – faire une machine qui soit aussi simple que possible et par conséquent préférer la sérialité au parallélisme – se trouvait essentiellement justifiée par des motifs d'ordre technique. L'alternative, ici, était relativement simple. D'une part s'offrait effectivement la possibilité de construire un ordinateur électronique à architecture parallèle mais cela signifiait : 1) augmenter le nombre des éléments de la machine – ce qui revenait à accroître d'autant sa complexité et son coût - tout en allongeant leur temps de réaction en vue de renforcer leur fiabilité ; 2) utiliser en guise de mémoire centrale plusieurs lignes délai mercure montées en parallèle ; 3) s'exposer, en raison même des points 1) et 2), à de très probables difficultés de mise au point et de maintenance du système sans être toutefois assuré que le lourd investissement humain, financier et matériel déjà consenti en amont autorise finalement une économie de temps de calcul qui soit réellement appréciable, c'est-à-dire qui soit proportionnelle à ces diverses « dépenses ». D'autre part était également

⁶²⁶ Le processus se répètera ensuite pour le deuxième bit de la première ligne, de la deuxième, etc.

envisageable la fabrication d'un ordinateur reposant sur le principe du traitement sériel des opérations lequel, tout en permettant d'atteindre des performances assez extraordinaires, ne nécessitait absolument rien de tout cela : en suivant cette voie, on se trouvait ainsi en mesure de réaliser une machine extrêmement rapide dotée en outre d'une architecture logique très simple. Dans ces conditions, et compte tenu du fait qu'il ne proposait ici rien de moins qu'un concept de « calculateur » totalement original au sortir même de la deuxième guerre mondiale (période caractérisée comme on l'a vu par l'expression d'une hostilité encore marquée vis-à-vis de l'emploi des composants électroniques et, situation conflictuelle généralisée oblige, par des temps de recherche et de développement extrêmement réduits dans le champ de la computation automatique), on comprend que Von Neumann ait choisi de se prononcer en faveur de la modalité architecturale qui lui semblait être alors la plus simple, la plus économique et, en même temps, la plus prometteuse. Concernant justement l'applicabilité future du principe de sérialité, il la fait étroitement dépendre des caractéristiques physiques – des performances – des tubes à vide disponibles : pour lui, il est évident que plus ces derniers seront capables de fonctionner rapidement tout en offrant un taux de fiabilité satisfaisant, moins nombreuses seront les raisons permettant de justifier une quelconque compromission de ce *modus operandi* (par exemple en recourant à nouveau au parallélisme ou encore à des solutions hybrides). Von Neumann clôt cette section en remarquant que, jusque-là, tous les efforts entrepris dans le domaine de la fabrication des machines à calculer digitales ultrarapides ont tendus dans la direction opposée à celle qu'il se propose maintenant de suivre : il n'y voit là en fait qu'un motif supplémentaire pour s'investir complètement dans la nouvelle voie de recherche dont il vient de tracer les grandes lignes.

Le *First Draft of a Report on the EDVAC* constitue l'acte de naissance de l'ordinateur, un dispositif qui, non content d'avoir été appelé dans un premier temps à bouleverser radicalement la sphère du calcul automatique (donc l'économie fondamentale des ordres scientifique et militaire), devait en quelques décennies à peine transfigurer aussi l'économie – toutes les économies - de nos sociétés post-industrielles en les faisant entrer dans l'ère de l'information. La profonde originalité de ce document en tous points séminal, outre bien sûr le fait qu'il contient les « plans » pour réaliser une machine à calculer universelle – une machine universelle de Turing concrète si l'on préfère - réside essentiellement dans la façon inédite dont John Von Neumann a appréhendé le problème qui consistait ici à concevoir le successeur de l'E.N.I.A.C. En s'inscrivant d'emblée dans une perspective purement logique, c'est-à-dire en choisissant de reléguer au second plan les questions liées à l'ingénierie et au matériel qui

jusqu'alors avaient été systématiquement considérées comme prioritaires dans le champ du calcul automatique, le mathématicien et physicien américain s'était trouvé à même de définir les principes fondamentaux d'une nouvelle machine dont la puissance, la flexibilité et la simplicité structurelle étaient sans aucune commune mesure avec celles qui pouvaient caractériser les instruments de calcul digitaux déjà existants. L'architecture logique de l'ordinateur telle qu'elle fut spécifiée par Von Neumann dans le *First Draft of a Report on the EDVAC* n'a subi que très peu de modifications entre la période à laquelle elle a été effectivement définie, c'est-à-dire 1945, et aujourd'hui. Le plus important de ces changements fut en fait rendu possible par la mise au point de nouveaux dispositifs de stockage autorisant désormais le transfert parallèle – et non plus séquentiel comme c'était le cas avec les lignes délai supersoniques – des informations contenues dans la mémoire principale du système vers ses autres unités fonctionnelles (et inversement). L'I.A.S. *Computer* de l'*Institute for Advanced Study* (I.A.S.C.), ordinateur construit à Princeton entre 1946 et 1952 sous la supervision de John Von Neumann, Herman H. Goldstine et Julian Bigelow, fut la toute première machine à se voir pourvue de ce nouveau genre de mémoire et, de ce fait, c'est à elle – plus qu'à l'E.D.V.A.C. – que l'on songe généralement lorsque l'on évoque « l'avatar type » de l'architecture Von Neumann. L'I.A.S.C. constitue ainsi le prototype de la très grande majorité de nos ordinateurs actuels⁶²⁷. A cause de cela justement, cette machine est éminemment représentative de la problématique fondamentale autour de laquelle s'est construite et déployée ce que nous avons choisi d'appeler plus haut « la première informatique ». Entre 1946 et 1952 en effet, la question absolument cruciale à laquelle tous les concepteurs d'ordinateurs durent s'efforcer d'apporter une réponse adéquate fut celle du support physique de la mémoire principale des ordinateurs. C'est cette période, et les enjeux

⁶²⁷ L'I.A.S.C. est souvent présenté comme un ordinateur à fonctionnement parallèle. Cette propriété, cependant, ne doit pas être comprise au sens que nous lui prêtons habituellement. L'ordinateur de Princeton, en effet, n'était ni un supercalculateur vectoriel, ni une machine multiprocesseur (et encore moins, on s'en doute, un multiordinateur). Tout comme l'E.D.V.A.C., il comportait *une* unité arithmétique et logique, *une* unité de contrôle, *une* mémoire centrale, une ligne d'entrée, une ligne de sortie ainsi que des périphériques externes de stockage (alors que les ordinateurs parallèles comportent typiquement plusieurs U.A.L., plusieurs mémoires qui peuvent être ou non partagées, etc.). La différence essentielle qui existait entre l'E.D.V.A.C. et l'I.A.S.C. tenait en réalité à la manière dont les informations stockées dans la mémoire principale de ce dernier étaient transférées vers chacune de ses unités fonctionnelles. Au lieu d'être expédié un par un vers l'U.C. ou l'U.A.L., comme c'était effectivement le cas sur l'E.D.V.A.C., chaque bit individuel contenu dans l'un des 40 tubes électrostatiques composant la mémoire interne de l'I.A.S.C. était expédié vers l'un ou l'autre de ces modules en même temps que les 39 autres (chose tout à fait impossible sur l'ordinateur de la *Moore School* puisque ses éléments mémoire étaient des lignes délai supersoniques). Si la transmission des informations d'un point à l'autre de la machine était ici réalisée en parallèle, leur traitement, lui, demeurait séquentiel. Il donc est important de noter qu'en ce qui concerne l'I.A.S.C., il n'existait qu'un seul flux d'instructions et qu'un seul flux de données et non plusieurs comme c'est aujourd'hui le cas sur les ordinateurs parallèles. L'ordinateur de l'*Institute for Advanced Study* était donc bien une machine à architecture Von Neumann.

fondamentaux qui la caractérisèrent sur les plans technologique, universitaire, militaire, industriel et commercial que nous nous proposons à présent d'étudier.

2.2.8. Les ordinateurs de la première informatique et le problème de la mémoire principale : fiabilité, rapidité, capacité et coût des dispositifs de stockage.

Entre 1946 et 1952, pas moins d'une cinquantaine d'ordinateurs furent fabriqués et placés en opération dans le monde. La plupart d'entre eux, mais ceci ne saurait réellement constituer un fait surprenant, ont vu le jour aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne. Au cours de ces quelques années un certain nombre de machines furent également conçues – ou se trouvaient en cours de réalisation - dans d'autres pays. C'était le cas par exemple en France (C.U.B.A.), en U.R.S.S. (M.E.S.M.), en Australie (C.S.I.R.A.C.), au Canada (U.T.E.C.), aux Pays-Bas (A.R.R.A.), en Pologne (E.M.A.L.), et au Japon (E.T.L. Mark I)⁶²⁸. Cette multiplicité naissante, qui ne fit que gagner en puissance dans les années subséquentes, ne doit cependant pas occulter une réalité absolument essentielle. *Toutes* ces machines – y compris, pensons-nous, les engins qui furent fabriqués en U.R.S.S. par Sergey Alekseevich Lebedev et son équipe de l'Académie des Sciences d'Ukraine à partir de 1949 - étaient des copies plus ou moins conformes de l'E.D.V.A.C. (l'ordinateur de la *Moore School of Electrical Engineering*) ou bien de l'I.A.S.C. (celui de l'*Institute for Advanced Study* de l'Université de Princeton). En d'autres termes, et nonobstant les différences *matérielles* mineures ou majeures qui pouvaient effectivement permettre de particulariser l'un ou l'autre de ces dispositifs par rapport aux deux prototypes américains que nous venons de mentionner, il s'agissait encore et toujours de machines à architecture Von Neumann. Il convient bien sûr de voir en ce stupéfiant accroissement du nombre de systèmes informatiques une conséquence directe de la volonté affichée très tôt par John Von Neumann de voir librement circuler les textes théoriques fondamentaux touchant à la conception des ordinateurs. En effet, et tout comme cela avait été le cas à partir du mois de juin 1945 pour le *First Draft of a Report on*

⁶²⁸ Le C.U.B.A. fut fabriqué par la Société d'Electronique et d'Automatisme (S.E.A.). Il était opérationnel en 1952 ; le M.E.S.M. fut construit à l'Académie des Sciences d'Ukraine et placé en opération en 1951 ; le C.S.I.R.A.C. australien, mis en service au cours du mois de juin 1951, fut l'œuvre du *Radiophysics Laboratory, Council for Scientific and Industrial Research* ; l'U.T.E.C., construit par l'Université de Toronto était opérationnel en octobre 1951 ; l'A.R.R.A. hollandais fut fabriqué par le *Mathematical Centre*. Il a été terminé en 1952 ; l'E.M.A.L. fut conçu par les membres du *Grupa Aparatów Matematycznych* de l'Institut des Mathématiques de Varsovie. Il a été achevé en 1952 ; enfin, l'E.T.L. Mark I fut développé par le *Japanese Electrotechnical Laboratory*. Il était opérationnel au mois de décembre 1952.

the EDVAC, les quatre documents capitaux qui, entre 1947 et 1949, devaient être coécrits par Von Neumann, Goldstine et Burks à la demande des autorités militaires américaines durant la construction de l'ordinateur de l'I.A.S. firent l'objet d'une très large diffusion tant au niveau national qu'international⁶²⁹. Par ailleurs, et ainsi que le rappelle Jérôme Ramunni : « ... *les rapports [sur l'I.A.S.C.] rédigés par Von Neumann et ses collaborateurs ont été envoyés dès leur rédaction (1947) à l'United States Patent Office et à la Bibliothèque du Congrès avec une mention explicite demandant qu'ils soient considérés comme relevant du domaine public.*⁶³⁰ ».

A l'orée de la guerre froide il est évident que, sur les plans tactique et stratégique, il était du plus grand intérêt pour les Etats-Unis de soutenir au mieux leurs alliés, particulièrement en Europe Occidentale... Assez rapidement donc, ceux-ci entrèrent en possession de duplicata de ces rapports de toute première importance et, tout comme les britanniques avaient pu développer l'E.D.S.A.C. quelques temps avant eux en s'appuyant sur les idées exposées dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*, ces derniers se trouvèrent alors en mesure de fabriquer leurs propres ordinateurs⁶³¹. Dans le cadre des sections précédentes, celles que nous avons consacrées aux *calculateurs* développés dans le courant des années 30 en Angleterre et aux Etats-Unis, nous avons vu que les machines à calculer analogiques et digitales, dispositifs initialement dédiés à l'effectuation de computations

⁶²⁹ Plusieurs copies de l'I.A.S.C. furent en effet réalisées à l'étranger. Parmi celles qui sont les plus connues, on mentionnera le S.I.L.L.I.A.C. (Australie), le B.E.S.K. (Suède) et le W.E.I.Z.A.C. (Israël).

⁶³⁰ In [Ramunni, 1989], p.53.

⁶³¹ En France, les choses, tout au moins au début, prirent d'ailleurs une bien étrange tournure. Après la guerre, le physicien Léon Brillouin – exilé aux Etats-Unis depuis 1941 – fit en effet jouer ses relations outre-atlantique afin que Louis Couffignal, le responsable du laboratoire de calcul mécanique à l'Institut Blaise Pascal., puisse visiter certains des laboratoires où les premiers ordinateurs américains étaient en cours de fabrication. Peu de temps après son retour en France, il fut décidé par la direction du C.N.R.S. de la construction d'une machine de ce genre. Couffignal, cependant, reprochait aux scientifiques américains l'importance – trop grande selon lui – qu'ils accordaient à la mémoire centrale des ordinateurs. En toute connaissance de cause, et soutenu par une hiérarchie apparemment très désireuse de préserver l'autonomie scientifique hexagonale, il se prononça donc en faveur d'un design qui prenait totalement à contre-pied les principes architecturaux énoncés dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*. Ainsi Couffignal décida-t-il que sa machine serait dépourvue de toute mémoire interne et que les données numériques nécessaires aux calculs devaient être entrées au fur et à mesure de leur réalisation (la vitesse d'opération de la machine devait donc être fonction de celle de ses dispositifs de stockage périphériques, c'est-à-dire de celle de ses organes les plus lents). Trop compliqué, trop ambitieux, répondant à une conception du calcul automatique qui était fort loin d'être la plus simple, cet « ordinateur » ne devait jamais voir le jour (la société Logabax, à laquelle fut confiée sa réalisation, fit d'ailleurs faillite). Comme l'a remarqué J. Ramunni, « L'échec de la machine de Couffignal a eu des conséquences fâcheuses ». Pendant quelques années, la France, ainsi privée d'ordinateur, ne put former de programmeurs. Pour la même raison, elle devait également accuser un certain retard dans le domaine du calcul scientifique électronique. Ceci est d'autant plus regrettable – voire stupide – qu'au sortir de la guerre, il est tout à fait clair que notre pays disposait de l'ensemble des ressources théoriques et technologiques nécessaires à la fabrication d'un ordinateur. Cette pénible leçon, toutefois, fut entendue et retenue. Pour construire le premier ordinateur français, le C.U.B.A. (Calculateur Universel Binaire de l'Armement), François Henri Raymond - l'ingénieur en charge de sa réalisation à la Société d'électronique et d'automatisme - s'inspira directement des travaux de Von Neumann. Par la suite, tous les ordinateurs fabriqués dans l'hexagone furent conçus selon ce modèle.

scientifiques relativement communes ou encore à celle de tâches calculatoires de nature administrative, se virent rapidement « adoptées » – pour ne pas dire purement et simplement mobilisées - par les forces armées. Poussés par la nécessité d'établir au plus vite de nouvelles tables de tir balistiques afin d'optimiser en toutes circonstances l'emploi de leurs pièces d'artillerie - un travail particulièrement répétitif autrefois accompli par des opérateurs humains - les militaires américains devaient ainsi se tourner vers une utilisation croissante de ces machines, lesquelles leur garantissaient à la fois rapidité d'exécution des calculs et fiabilité des résultats obtenus. Assez vite cependant, les capacités de calcul et la vitesse d'opération de ces dernières se révélèrent insuffisantes pour répondre aux exigences sans cesse grandissantes de l'armée. Bien évidemment, le déclenchement de la deuxième guerre mondiale ne contribua en rien à arranger cette situation déjà alarmante puisqu'il entraîna immédiatement un renforcement dramatique de cette demande, laquelle, pour une large part, demeurait toujours insatisfaite. L'introduction en grand nombre de nouveaux armements conventionnels, le recours systématique à des méthodes de cryptographie et de cryptanalyse extrêmement élaborées et le démarrage du projet Manhattan constituèrent alors autant de facteurs déterminants en faveur du perfectionnement et de l'accroissement de la production de ces instruments de calcul. Mais les énormes efforts consentis ici, s'ils furent très loin d'être vains, se révélèrent encore très insuffisants compte tenu de la conjoncture. Ainsi, en dépit de l'entrée en service de nouveaux calculateurs digitaux électromécaniques, plus gros et plus puissants que ceux qui les avaient précédés, de l'emploi de plusieurs analyseurs différentiels et aussi de la création de centres de calcul regroupant d'importants moyens mécaniques et humains, les besoins exprimés par les militaires ne purent encore être satisfaits. C'est durant le mois d'avril 1943, alors qu'ils se trouvaient confrontés à une situation qui de jour en jour se faisait de plus en plus préoccupante, que les responsables du *Ballistic Research Laboratory* prirent la décision – au demeurant toute aussi audacieuse que cruciale – d'accepter de financer la fabrication du calculateur que Presper J. Eckert, John W. Mauchly, Herman H. Goldstine et John Brainerd leur avaient présenté au cours d'une réunion pour le moins mémorable. Architecturalement, c'est là un fait établi, l'E.N.I.A.C. de la *Moore School of Electrical Engineering* ne devait pourtant se distinguer en rien de ses prédécesseurs : ainsi son organisation matérielle était-elle quasiment analogue à celle du premier grand calculateur d'Howard Aiken, l'I.B.M. *Automatic Sequence Controlled Calculator* (ou Harvard Mark I). Sur le plan logique – celui du *design* si l'on préfère – la machine imaginée par Eckert et Mauchly n'introduisait donc rien qui fut sérieusement susceptible de se voir qualifié de novateur. Ce qui, en revanche, lui permettait de s'inscrire en rupture totale par rapport à tout

ce qui avait été fait antérieurement était la nature de ses composants. Car en lieu et place des très nombreux relais électromécaniques « ordinairement » utilisés pour construire ces machines – lesquels offraient déjà des vitesses de commutation importantes – la plupart des constituants fondamentaux du calculateur de la *Moore School* étaient des tubes à vide. Nous avons déjà eu l'occasion de voir dans quelles circonstances le premier et unique grand calculateur électronique de l'histoire – ou plutôt les nombreux défauts inhérents à son *design* – conduisirent John Von Neumann, mais aussi Presper J. Eckert et John W. Mauchly, à imaginer immédiatement à sa suite une machine d'un genre totalement révolutionnaire: l'ordinateur. De fait, et hormis la technologie électronique sur laquelle tous deux reposaient effectivement, l'E.N.I.A.C. et le dispositif dont les grands principes architecturaux devaient se trouver exposés dès le mois de juin 1945 dans le *First Draft of a Report on the EDVAC* n'avaient plus guère de choses en commun l'un avec l'autre. Pourtant, les concernant, il est une chose absolument fondamentale qu'il s'avère impératif de rappeler ici. Bien que l'E.N.I.A.C. ait été entièrement conçu et fabriqué par des personnels civils de l'Université de Pennsylvanie, la totalité des capitaux qui permirent sa réalisation étaient d'origine *militaire* : l'objectif poursuivi ici par l'armée américaine – son seul et unique commanditaire - consistait nous l'avons vu à soutenir le développement d'une machine extrêmement rapide capable de calculer au plus vite et avec une certaine précision une très grande quantité de tables de tir balistique. La construction de l'E.N.I.A.C. prit fin alors que la deuxième guerre mondiale était terminée depuis quelques mois déjà. Toutefois, la reddition des forces de l'Axe et la cessation définitive des combats sur le théâtre européen et dans le Pacifique ne signifiaient pas pour autant l'affaiblissement ou encore la disparition du puissant faisceau de motivations qui s'était trouvé à l'origine du démarrage du projet PX. Bien au contraire. Au sortir de la guerre, l'Union Soviétique devait ainsi s'affirmer comme une superpuissance militaire particulièrement hostile à l'Occident. Bien qu'elle ait été laissée exsangue par le conflit et qu'elle ait de surcroît accumulé un retard industriel et technologique considérable sur ses anciens alliés⁶³², l'U.R.S.S. n'en représentait pas moins une menace extrêmement sérieuse – au moins aussi dangereuse qu'avait pu l'être avant elle l'Allemagne d'Hitler – pour l'ensemble des nations du monde libre. A cela, deux raisons au moins. Premièrement : depuis 1942, il existait dans ce pays un programme nucléaire militaire. Cependant, en raison de l'invasion des troupes nazies et de l'ouverture du front de l'Est, ce dernier n'avait cessé de prendre du retard sur le projet Manhattan. C'est en fait à la suite des bombardements de

⁶³² Y compris l'Allemagne nazie si l'on considère le pacte de non-agression germano-soviétique comme une forme particulière d'alliance.

Nagasaki et d'Hiroshima – le message délivré par les américains, même implicite, était très clair - que Staline prit la décision de faire de cette recherche une priorité nationale absolue. A partir de ce moment précis, il devint évident que l'Union Soviétique ne tarderait pas à posséder la bombe atomique. Tout était seulement affaire de temps... Deuxièmement : suite aux accords de partage territoriaux conclus avec les britanniques et les américains lors la conférence de Yalta (4-11 février 1945), l'U.R.S.S. s'était vue attribuer un quart du territoire allemand, la région Est plus exactement. Cela, avec l'annexion de la Pologne orientale, devait lui conférer un avantage stratégique indéniable pendant les quelques décennies que dura la Guerre Froide. Mais ce ne fut pas tout. Certaines des installations – et non des moindres - que les nazis avaient utilisées pour produire et/ou lancer leurs terribles bombes volantes sur l'Angleterre avaient été implantées dans ces zones relativement excentrées en vue de les préserver de la menace permanente que représentaient les bombardements alliés. Lorsque cessèrent enfin les hostilités, la quasi totalité de ces infrastructures militaro-scientifiques était donc toujours intacte. C'est ainsi qu'en 1945 les soviétiques, comme du reste les américains, se trouvèrent non seulement en mesure de faire main basse sur les « armes secrètes allemandes », pour reprendre ici une partie de l'intitulé de l'ouvrage écrit par Ian V. Hogg⁶³³, mais aussi, si l'on nous passe l'expression, sur la plupart des ingénieurs et scientifiques qui les avaient conçues. Parmi les nombreux projectiles militaires dont s'emparèrent alors les soldats de l'U.S. Army et de l'Armée Rouge, il en était un, en l'occurrence la fusée A4/V-2, qui allait rapidement revêtir une importance considérable pour les deux camps. Dans une très large mesure, c'est en effet cet engin offensif extrêmement perfectionné qui permit aux deux nations de développer la première génération de leurs missiles à courte, moyenne et longue portée. Quant aux premiers lanceurs spatiaux de l'histoire – en réalité des missiles balistiques intercontinentaux à peine modifiés – ils devaient eux aussi grandement bénéficier des apports de la précieuse technologie militaire allemande...

Le concept d'ordinateur – tout au moins en tant que dispositif matériel doté d'une architecture spécifique – vit le jour dans les toutes dernières années de la deuxième guerre mondiale sous la plume de John Von Neumann. Mais c'est au début des années cinquante, c'est-à-dire aux commencements de la Guerre Froide, que ce formidable instrument de traitement de l'information acquit pour ainsi dire ses quartiers de noblesse. La constitution des nouveaux arsenaux balistiques, le perfectionnement et la miniaturisation de la bombe

⁶³³ Ian V. Hogg, *German Secret Weapons of the Second World War : The Missiles, Rockets, Weapons and New Technology of the Third Reich*,

atomique, la conception de la bombe à hydrogène et des têtes nucléaires embarquées - bref, la course aux armements qui caractérisa cette période d'immenses tensions internationales - devaient ainsi réclamer une colossale puissance de calcul que seul l'ordinateur, en raison de son caractère universel et de sa prodigieuse rapidité, était à même de fournir. De fait, et mis à part l'UNIVAC I (le premier ordinateur américain spécifiquement destiné au marché civil), la presque totalité des machines fabriquées aux États-Unis⁶³⁴ et en U.R.S.S. au cours de cette période furent financées par l'armée puis essentiellement utilisées à des fins militaires (bien que leur construction, elle, ait presque toujours été confiée à des instituts universitaires ou à des entreprises privées). On aura donc compris que la première informatique, celle des pionniers, celle des prototypes, était indissociablement liée aux secteurs de la recherche en armement et en aérospatiale et, plus particulièrement, à la mise au point des bombes nucléaires et des missiles intercontinentaux (sur la base desquels, rappelons-le, les premiers lanceurs spatiaux furent conçus). Sans doute pourrait-on « faire » une histoire de l'informatique - la rétrodire, pour reprendre à notre compte le terme d'Ilya Prigogine - en se contentant d'évoquer sommairement ce versant pourtant essentiel des choses. Au reste, c'est d'ailleurs ce type d'approche que l'on rencontre dans quelques-uns des nombreux ouvrages⁶³⁵ - et pas forcément les plus infréquentables - qui ont déjà été consacrés à cette vaste thématique. Pour notre part, il nous est au contraire apparu nécessaire de nous intéresser de manière un peu plus détaillée à l'histoire des bombes nucléaires, des engins balistiques et des fusées spatiales en vue de mieux appréhender ensuite celle de l'informatique. En effet leur développement, s'il se trouva bien sûr largement favorisé par l'ordinateur, eut en retour de très importantes répercussions sur le secteur informatique dans son ensemble. Ainsi, non seulement les besoins toujours plus considérables de l'armée conduisirent ici à des progrès technologiques remarquables - que l'on songe par exemple au rôle que joua le programme des missiles intercontinentaux *Minuteman* et *Minuteman II* dans le domaine de la miniaturisation et de la production en série des composants électroniques - mais le marché militaire, bien après que les premières machines destinées aux entreprises civiles aient été

⁶³⁴ Avec l'U.N.I.V.A.C., le S.E.A.C. (*Standards Electronic Automatic Computer*), constituait une exception à cela. Destiné à l'*Applied Mathematics Laboratories* (lequel regroupait le *Computation Laboratory*, le *Machine Development Laboratory*, le *Statistical Engineering Laboratory* et l'*Institute for Numerical Analysis*), cet ordinateur de proportions modestes fut construit en attendant que l'I.A.S.C. ou l'U.N.I.V.A.C. soient terminés. Initialement, la désignation de cette machine était d'ailleurs *National Bureau of Standards Interim Computer*, ce qui révélait sa nature « provisoire ».

⁶³⁵ Bien qu'il ait une très fâcheuse tendance à réduire l'histoire de l'informatique aux empoignades commerciales d'Intel, de Microsoft et d'I.B.M., même François de Closets, coauteur, avec Bruno Lussato, de cet ouvrage fort discuté qu'est *L'imposture informatique*, s'est plié à cet exercice. C'est tout dire !

introduites, continua longtemps de représenter une niche économique particulièrement florissante pour les fabricants d'ordinateurs.

Bien évidemment, il ne nous sera pas possible ici d'étudier l'ensemble des ordinateurs – au total il y en eut plus d'une cinquantaine! - qui furent construits dans le monde entre 1946 et 1955 (période qui, *grosso modo*, correspond à ce que nous avons nommé plus haut « première informatique ». Dans une certaine mesure nous ne pouvons que sincèrement regretter cette situation car l'histoire individuelle de chacune de ces machines – qui les réalisa et pourquoi ? Quelles solutions technologiques particulières furent retenues ici ou là pour les fabriquer ? À quoi, exactement, devaient-elles servir ? – est à notre sens tout à fait digne d'intérêt. Maintenant, il est vrai aussi que tous ces ordinateurs, sans exception aucune, furent développés sur la base d'un seul et même schéma fondamental. En l'occurrence, il s'agissait bien sûr de l'organisation logique que John Von Neumann avait définie dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*. Compte tenu de cela, et si l'on s'en tient à cette seule et unique perspective, les examens détaillés de l'E.D.S.A.C. et de l'E.D.V.A.C., parangons matériels premiers, s'il en est, de l'ordinateur, devraient alors amplement suffire pour rendre compte de la totalité des autres machines conçues au même moment. Toutes ne constituaient en effet que des variations matérielles – des « harmoniques physiques » – réalisées à partir d'un même archétype logique – d'un même « fondamental théorique » – à savoir l'architecture Von Neumann. D'un autre côté cette façon tout à la fois originelle et englobante de considérer le problème, même si elle est sûrement légitime, ne permet en aucun cas d'appréhender les première, deuxième et troisième informatiques dans leurs dynamiques historiques et leurs spécificités respectives. Or tel est précisément l'objectif que nous souhaitons poursuivre à présent. Parce que l'architecture Von Neumann, par essence, est un modèle idéal, un pur schéma organisationnel, elle doit nécessairement se voir pensée indépendamment de toutes ses possibles interprétations concrètes (que celles-ci, du reste, soient passées, présentes, ou encore à venir). Dans tous les cas donc, si elle prescrit bien la mise en œuvre d'un ordonnancement très spécifique, elle ne présuppose *jamais* l'utilisation d'un certain type d'éléments matériels pour le réaliser. Pourvu qu'il s'agisse de composants capables de commuter très rapidement entre deux états exclusifs l'un de l'autre (on/off, 1 ou 0), ils feront alors parfaitement l'affaire. En raison de cette immuabilité, de cette « insensibilité » aux technologies pouvant caractériser telle ou telle époque, il est vrai que l'architecture Von Neumann représente en définitive cette certitude absolue, ce fond permanent, que l'historien de l'informatique est assuré de toujours rencontrer dans l'espace de recherches qui est le sien. En même temps, et pour les mêmes motifs, elle s'avère impropre à lui servir de guide :

puisque'elle ne change pas et constitue la base théorique commune à tous les ordinateurs (à l'exception bien sûr des machines à architecture parallèle), elle ne possède à leur égard aucun pouvoir discriminant, aucune espèce de valeur différenciatrice. Si nous souhaitons maintenant faire retour sur l'histoire des ordinateurs, il apparaît par conséquent indispensable que nous nous détournions de leur dimension purement logique pour nous intéresser dorénavant à leurs caractéristiques matérielles (seule source véritable d'évolutions et de transformations, voire de révolutions).

Le fait est qu'en 1946-47, l'architecture Von Neumann et les techniques de fabrication de dispositifs électroniques permettant la réalisation d'opérations arithmétiques élémentaires et le contrôle du flux des données dans la machine étaient somme toute choses assez bien connues. La très large diffusion du *First Draft of a Report on the EDVAC* et la série de conférences intitulée *Theory and Techniques for Design of Electronic Digital Computers* qui se tint au cours de l'été 1946 à la *Moore School of Electrical Engineering* devaient bien entendu jouer un rôle de tout premier ordre dans la propagation de ces méthodes et de ces idées. En revanche, ce qu'on était fort loin de maîtriser à l'époque, c'était la fabrication de mémoires principales rapides, fiables, et offrant une très grande capacité de stockage. La mise au point de pareils systèmes constitue en réalité l'obstacle technique le plus sérieux qui ait jamais été rencontré dans le domaine informatique (n'oublions pas que la notion de « génération d'ordinateurs » s'est précisément constituée et organisée autour de cette difficulté). Comprendre que, l'organisation typique de l'ordinateur ayant été fixée et admise « une bonne fois pour toutes », c'est essentiellement ce problème, ou plutôt les différentes sortes de solutions qui purent tour à tour lui être apporté, qui représentèrent à partir de ce moment là – et jusqu'en 1975 - le facteur déterminant pour la fabrication des machines. Assez rapidement, c'est-à-dire dès 1947-48, on se rendit cependant compte que la mémoire d'un ordinateur (nous parlons ici en priorité de la mémoire centrale mais ce qui suit est aussi valable pour les mémoires auxiliaires), devait impérativement posséder un certain nombre de propriétés caractéristiques. C'est dans un article publié en 1949, « A Storage System for Use with Binary-Digital Computing Machines⁶³⁶ », que les concepteurs de la *Manchester Baby Machine*, Sir Frederic Calland Williams et Tom Kilburn, exposèrent pour la première fois l'ensemble de ces critères fondamentaux. Ainsi :

⁶³⁶ F. C. Williams, T. Kilburn, « A Storage System for Use with Binary-Digital Computing Machines », *Proceedings of I.E.E.E.*, Vol. 96, Mars 1949, pp. 81-100.

- La mémoire d'un ordinateur devait permettre le stockage des données de façon permanente sauf enregistrements successifs (une erreur sur un million étant ici considérée comme un seuil fatal au bon fonctionnement du système).
- Elle devait offrir une capacité de stockage élevée.
- Il devait être possible d'effacer tout ou partie de son contenu et de le remplacer immédiatement par de nouvelles informations.
- Les temps d'accès en lecture et en écriture devaient être très brefs de façon à ce qu'il n'existe pas un différentiel trop important entre la vitesse de fonctionnement de la mémoire et celle de l'ordinateur dont elle constituait un des organes primordiaux⁶³⁷.
- La réalisation des processus de lecture et d'écriture devait être extrêmement précise. En outre, la lecture d'une quelconque information ne devait en aucun cas se solder par sa destruction (son effacement).
- Sa consommation en énergie électrique devait être réduite.
- Elle devait être peu coûteuse.
- Elle devait pouvoir être produite en série.

Il doit être précisé sans plus tarder que jusqu'à l'apparition, en 1975, des premières puces gravées en technologie V.L.S.I. (*Very Large Scale Integration*), aucun système mémoire, pas même les matrices tridimensionnelles à tores de ferrite, ne s'était trouvé à même de répondre simultanément et d'une façon qui soit réellement satisfaisante à l'ensemble de ces spécifications pourtant proposées dès 1948-49 (ceci, en plus de la difficulté et de la persistance du problème, témoigne également de la valeur, en tant que méthode permettant d'évaluer les progrès réalisés dans ce domaine, du faisceau de contraintes précocement énoncé par F. C. Williams et T. Kilburn). A l'aune de ces quelques éléments d'information, peut-être se trouve-t-on alors en mesure de mieux concevoir la distance considérable qui a été parcourue - et les énormes difficultés qui ont été aussi surmontées - depuis la première utilisation « informatique » des lignes délai acoustiques (sur l'E.D.S.A.C.) jusqu'à celle des *chips* à très haut niveau d'intégration... Les équipes de chercheurs américains et britanniques

⁶³⁷ Jérôme Ramunni, in [Ramunni, 1989], p. 101, rappelle ce que F. C. Williams entendait exactement par « rapidité » lorsqu'il évoquait les phases de lecture et d'écriture en mémoire: il s'agissait en fait « *d'un laps de temps comparable à celui que prend le travail de la partie électronique de la machine* ». Notons que le respect de ce critère particulier conduisit assez vite à l'exclusion des dispositifs mécaniques et, plus particulièrement, à celle des relais électromagnétiques. Deux raisons peuvent être avancées pour rendre compte de ce rejet. D'une part, les relais les plus perfectionnés ne pouvaient commuter que de 100 à 200 fois par seconde alors que dans le même intervalle de temps, un tube à vide pouvait changer d'état 10^6 fois. Cet important écart de performances se révéla donc réhibitoire. D'autre part, la taille d'une unité mémorielle essentiellement constituée de relais aurait nécessairement été énorme tandis que sa consommation électrique, elle, aurait été par trop excessive.

qui dans les années quarante et cinquante devaient se pencher sur le problème crucial que représentait la fabrication de la mémoire des ordinateurs suggérèrent assez rapidement des solutions techniques aussi nombreuses que diversifiées. De fait, la presque totalité des propriétés (connues) de la matière devaient être testées ici tour à tour (avec plus ou moins de succès cependant). C'est d'ailleurs en se basant sur les propriétés physiques qu'elles exploitaient spécifiquement qu'il est possible de classer les différentes sortes de mémoires conçues avant l'avènement des matériaux semi-conducteurs. Ainsi pourra-t-on successivement distinguer :

- Les dispositifs thermiques.
- Les dispositifs mécaniques et électromécaniques.
- Les lignes délais acoustiques et magnétostrictives (mémoires centrales).
- Les mécanismes de stockage électrostatiques : tubes Williams et *Selectrons* (mémoires centrales)
- Les mémoires magnétiques rotatives : tambours, disques, bandes (mémoires auxiliaires).
- Les mémoires magnétiques statiques : matrices en tores de ferrite (mémoires centrales).
- Les mémoires en composants semi-conducteurs.

On aura parfaitement compris ici que la recherche d'une mémoire qui soit à la fois rapide et fiable commença de mobiliser l'attention de tous les scientifiques intéressés avant même que ne démarre effectivement la construction des tous premiers ordinateurs. Compte tenu de la criticité et de la persistance qui devait caractériser cette problématique, autrement dit du rôle absolument déterminant qu'elle tint longtemps dans le domaine du développement et de la construction des ordinateurs, il nous apparaît maintenant nécessaire d'étudier séparément, ou, pour ainsi dire, *ex machina*, l'histoire et les principes de fonctionnement des différents dispositifs dont il a été fait mention ci-dessus. En effet si certains, comme les systèmes thermiques et mécaniques, ne devaient être construits qu'à titre purement expérimental, tous les autres, sans exception et à titre individuel s'entend, furent bel et bien employés en guise de *mémoires principales* ou de *mémoires auxiliaires* sur l'une ou l'autre des très nombreuses machines fabriquées entre les années d'après-guerre et aujourd'hui. Partant de la période d'immédiat après-guerre pour finalement nous arrêter à la première moitié des années soixante-dix, nous reviendrons, en tentant à chaque fois de mettre en

évidence et d'expliquer les motivations et les enjeux profonds qui polarisèrent et travaillèrent en profondeur ces processus, sur la genèse et la mise en œuvre de ces dispositifs. Il va de soi que le cas échéant, nous traiterons également des transformations qu'ils subirent dans le temps. Indiquons sans tarder qu'une part non négligeable de cette réflexion sera consacrée aux mémoires en matériau semi-conducteur. Ceci nous conduira tout naturellement à considérer de façon détaillée les très importants développements qui furent réalisés dans les domaines de l'électronique et de la microélectronique au cours de l'intervalle dont il vient d'être fait mention. De manière tout à fait évidente il demeure complètement envisageable de « faire » une histoire de l'informatique en ne consacrant qu'un nombre relativement modeste de pages à celle des mémoires d'ordinateurs. C'est encore plus possible, si l'on pousse davantage encore ce raisonnement, de l'élaborer en n'accordant que quelques phrases à peine à l'invention et à l'évolution du transistor tout de même qu'à celles du circuit intégré. Cependant consentir à faire l'économie de tout cela quant on prétend rendre compte véritablement – tout du moins autant que faire de peut - du développement de l'informatique sur une période qui couvre quasiment un demi-siècle, c'est tolérer d'emblée et sciemment qu'elle se trouve amputée d'une de ses dimensions à la fois les plus essentielles et les plus méconnues. Nous avons au contraire fait ici le choix méthodologique de la prise en considération de cet aspect par trop souvent effleuré – et seulement cela - de l'histoire de l'informatique. C'est après avoir mené à son terme ce travail préparatoire, et après seulement, que nous pourrions procéder à l'examen détaillé des ordinateurs qui nous ont paru être les plus représentatifs de ce que nous avons appelé les première, deuxième et troisième informatiques.

2.2.8.1. Les mémoires thermiques.

C'est un spécialiste de l'analyse des structures cristallines par diffraction de rayons X, le Dr. Andrew Donald Booth, qui conçut l'idée d'une mémoire-tambour thermique dans les années d'immédiat après-guerre (très sûrement entre 1947 et 1948). Précisons tout de suite que ce physicien et mathématicien britannique rattaché au *Birkbeck College Computation Laboratory* (Université de Londres), n'est pas uniquement connu pour les remarquables travaux de recherche et de développement qu'en compagnie de son père, un mécanicien hors pair, il effectua sur les mémoires d'ordinateur. On sait ainsi que dans les tous premiers mois de l'année 1945, Andrew D. Booth rencontra le Professeur Douglas R. Hartree (Université de Manchester), avec lequel il commença à envisager informellement la possibilité de construire un calculateur digital automatique « tout usage » (*general-purpose*). C'est d'ailleurs très

vraisemblablement par l'entremise de ce même Douglas R. Hartree, lequel avait été officiellement invité à venir voir l'E.N.I.A.C. en juillet 1945 et entretenait depuis lors d'excellents rapports professionnels avec Herman H. Goldstine et l'ensemble des membres de l'équipe de l'E.D.V.A.C., que Booth, la même année, se trouva en mesure d'obtenir une copie du *First Draft of a Report on the EDVAC*. Le semestre (de mars à septembre 1947), qu'il passa ensuite en compagnie de John Von Neumann et de son équipe à l'*Institute for Advanced Study* de Princeton acheva de le convaincre définitivement des extraordinaires potentialités que recelait la machine inventée par le mathématicien hongro-américain (rappelons tout de même qu'à cette date, aucun ordinateur, à commencer par l'I.A.S.C., n'était encore opérationnel). Ce que Booth eut le rare privilège d'observer au cours de cette visite prolongée dans le New Jersey devait exercer sur lui une très profonde influence puisque aussitôt rentré en Grande-Bretagne, il s'attela immédiatement à la construction d'un ordinateur censé reprendre les grandes lignes conceptuelles caractérisant l'I.A.S.C. (en l'occurrence il s'agissait de l'architecture Von Neumann mais aussi du principe d'une mémoire principale travaillant en mode parallèle). En dépit de leur stricte identité structurelle il était cependant un point, et de taille, sur lequel les deux machines différaient de façon radicale (tout au moins en principe). L'*Automatic Relay Computer* (A.R.C.), comme sa désignation l'indique très clairement, devait en effet être une version *électromécanique* de l'ordinateur de l'*Institute for Advanced Study* ! Le choix de cette solution technologique « obsolète », évidemment, ne peut manquer de susciter en nous un vif sentiment d'étonnement quant on sait d'une part que tous les ordinateurs développés à la même époque reposaient massivement sur l'emploi de l'électronique et que Booth, d'autre part, avait assez longuement séjourné aux côtés de Von Neumann en 1947. Pouvait-il en effet exister meilleur mentor, pour quelqu'un qui s'intéressait de très près à la conception des ordinateurs, que l'auteur du *First Draft* en personne ? La réponse à cette question, en tout cas est-ce là notre sincère conviction, semble tomber d'elle-même sous le sens. Compte tenu de cela, et aussi du fait qu'il avait étudié le précieux rapport de Von Neumann, il est parfaitement évident que le concepteur de l'A.R.C. ne pouvait ignorer les avantages considérables que l'usage de la technologie électronique apportait en ce domaine. La voie sur laquelle il décida finalement de s'engager fut pourtant toute autre... Plusieurs raisons peuvent être invoquées alors afin d'expliquer pourquoi Booth jeta ainsi son dévolu sur les relais pour qu'ils servent d'éléments de base à l'A.R.C. Selon Jérôme Ramunni, qui rapporte ici des propos tenus par Maurice V. Wilkes, « [le] projet de

*Booth fut sérieusement gêné par le manque de crédits.*⁶³⁸ ». En réalité cette observation ne concernait pas l'A.R.C. mais l'A.P.E.(R).C.⁶³⁹, un petit ordinateur à valves thermoïoniques que Booth commença à concevoir à la fin de l'année 1949 pour le bénéfice du *Birkbeck College Computation Laboratory*. Toutefois, c'est sans difficulté aucune que la remarque de Wilkes peut se voir généralisée à la presque totalité des machines que fabriqua le physicien anglais. Ainsi, et bien qu'elle ait pendant quelques temps bénéficié du support de la *British Rubber Producer's Research Association*⁶⁴⁰, l'équipe de Booth était à l'époque une des plus modestes qui soit tant en terme de moyens financiers que de personnel. Le plus souvent à court d'argent, et encore était-ce là le meilleur des cas, le scientifique ne devait jamais compter plus de trois collaborateurs en même temps dans son groupe de travail: son propre père, un ingénieur et Miss Kathleen Britten, la programmatrice qui allait bientôt devenir son épouse. Il n'est donc sûrement pas exagéré d'affirmer ici qu'en fait de « structure de recherches », Booth ne disposait de rien de plus que d'une toute petite entreprise privée, laquelle se trouvait de surcroît quasiment réduite au cercle familial ! En dépit, on le comprend, de conditions de travail rendues particulièrement pénibles par l'insuffisance de capitaux, il parvint tout de même à compléter la section arithmétique et logique de l'A.R.C. au printemps 1948. Malheureusement il échoua par la suite à produire une mémoire électromécanique réellement adaptée à cette machine. Faute de trouver rapidement une solution à ce problème⁶⁴¹, l'*Automatic Relay Computer* se vit finalement équipé d'une mémoire électromécanique de capacité modeste (50 nombres binaires) et d'une unité de contrôle amovible stockant 300 instructions sous forme câblée. Pour le dire encore autrement, cette machine dont l'ambition initiale était de copier l'I.A.S.C. fut en définitive reconvertie en une sorte de calculateur contrôlé par séquence... Ce n'est qu'après qu'il se fut tourné vers l'emploi de valves thermoïoniques, en 1949, que Booth réussit enfin à réaliser un ordinateur. Il conçut tout d'abord le S.E.C. (*Simple Electronic Computer*), une petite machine électronique développée à titre expérimental, puis l'A.P.E.(R).C. Cet ordinateur placé en opération au mois de juillet 1952 au *Birkbeck College* se révéla être un franc succès puisque

⁶³⁸ In [Ramunni, 1989], p.101.

⁶³⁹ A.P.E.(R).C. : *All-Purpose Electronic (Rayon) Computer*. La lettre « R », placée entre parenthèses, avait pour fonction d'indiquer que les constructeurs de la machine bénéficiaient du soutien financier de la *British Rayon Research Association*. Notons que cette machine était également connue sous la désignation de A.P.E.(X).C., le « X » signifiant ici sans nul doute « X-Ray », c'est-à-dire rayon X.

⁶⁴⁰ La B.R.P.R.A. (Welwyn Garden City, Hertfordshire), fut l'employeur d'Andrew D. Booth d'août 1943 à septembre 1945. Après que celui-ci ait rejoint le *Birkbeck College Computation Laboratory* à la fin de l'année 1945, ce consortium d'industriels continua de l'employer un certain temps en tant que consultant scientifique.

⁶⁴¹ Booth devait se consacrer au même moment à la mise au point d'un tambour magnétique doté d'une capacité de 256 mots de 20 bits mais celui-ci, après avoir été temporairement couplé à l'A.R.C., fut démonté car ses performances et sa fiabilité se révélèrent insatisfaisantes.

la *British Tabulating Machine Company*, filiale britannique d'I.B.M., s'y intéressa très rapidement. Sur la base de cette machine, la B.T.M.C. dérivait tout d'abord un prototype, le H.E.C. (*Hollerith Electronic Computer*), puis deux ordinateurs spécifiquement destinés au marché civil, le B.T.M. 1200 (1954) et le B.T.M. 1201 (1956). Grâce à l'A.P.E.(R).C., ou plutôt aux ordinateurs B.T.M. auxquels il donna naissance dans la première moitié des années cinquante, les travaux de Booth portèrent enfin leurs fruits et celui-ci put à partir de là poursuivre ses recherches dans de bien meilleures conditions que celles qu'il avait connues auparavant⁶⁴². Quoiqu'il en soit, il nous faut maintenant revenir sur l'échec de l'*Automatic Relay Computer* afin d'en comprendre les motifs véritables et d'en tirer également de précieux enseignements concernant le problème immense que représentait à cette époque la mise au point des mémoires d'ordinateurs. Pour commencer, et sur ce point Maurice V. Wilkes ne saurait raisonnablement se voir contredit, le manque d'argent dont il souffrit en quasi permanence constitua assurément une des raisons majeures pour lesquelles Booth ne put mener à son terme son premier projet d'ordinateur. N'omettons surtout pas de rappeler ici que dans les quelques années qui suivirent la fin de la deuxième guerre mondiale – cette délicate situation devait se prolonger jusqu'en 1949 – la Grande-Bretagne fut victime d'une très sérieuse pénurie en matière de composants électroniques. De ce fait, seules les institutions les plus fortunées bénéficiant en outre des soutiens politique et économique de l'état pouvaient se permettre d'acquérir ces matériels, fut-ce au prix fort. A l'époque bien sûr, la situation financière de Booth était loin de valoir celle d'un Newman (Université de Manchester), d'un Wilkes (Université de Cambridge), ou d'un Turing (*National Physical Laboratory*). Dans ces conditions, il n'eut alors guère d'autre choix que celui consistant à se tourner vers l'utilisation de relais électromécaniques – éléments nettement moins rapides mais aussi beaucoup moins onéreux que les composants électroniques – pour construire l'A.R.C. Mais ce ne fut pas là le seul obstacle de taille auquel le scientifique anglais devait se heurter dans le cadre de son ambitieuse entreprise. Ainsi que nous l'avons déjà signalé plus haut, Booth réussit à confectionner l'unité arithmétique et logique de l'A.R.C. en à peine une année mais il échoua ultérieurement à mettre au point un dispositif de stockage principal pour cet ordinateur à relais. Selon les analyses de Michael R. Williams, il existait en effet trois difficultés d'ordre technique directement liées au processus de fabrication des mémoires de type mécanique ou électromécanique⁶⁴³. Les deux premières complications identifiables ici, lesquelles

⁶⁴² Au total, les ventes confondues de B.T.M. 1200 et 1201 dépassèrent en effet les 75 unités.

⁶⁴³ C'était là en effet les deux seules solutions que Booth, eut égard à son budget mais aussi au type technologique de son ordinateur, pouvait se permettre de considérer. Quand bien même se serait-il trouvé en

représentaient aussi les plus facilement surmontables, tenaient en fait aux phases de design et d'usinage des multiples pièces qui, outre les relais, étaient appelées à composer cette unité. Quant à la troisième d'entre elles – celle sur laquelle Booth et son père devaient précisément achopper – elle concernait tout simplement l'assemblage de ces nombreux éléments en un seul et même ensemble fonctionnel. Le manque d'argent, la pénurie de matériaux appropriés et les immenses difficultés techniques que le physicien rencontra lors de la fabrication de l'A.R.C. entraînaient cependant de très intéressantes conséquences.

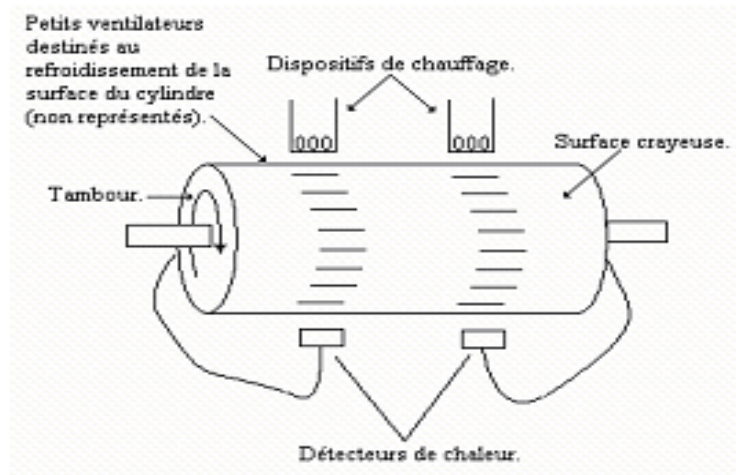


Fig. 19: mémoire mécano-thermique d'A.D. Booth.

Examinons à présent les spécificités techniques ainsi que le principe de fonctionnement de la mémoire thermique expérimentale que Booth mit au point peu de temps après son retour de Princeton. Ce dispositif relativement simple, mais fort ingénieux, consistait comme on le voit sur le schéma ci-dessus en un assemblage de cinq éléments principaux : 1) un cylindre de section et de longueur modestes dont la surface était recouverte d'une fine couche stabilisée de matière crayeuse ; 2) un axe disposé horizontalement qui, couplé un petit moteur électrique, permettait d'imprimer audit cylindre un mouvement rotatif caractérisé par une vitesse constante ; 3) deux dispositifs électriques (*heaters*) dont la fonction consistait à porter à une température élevée – et non pas à brûler - une zone circonscrite de la surface du cylindre ; 4) deux détecteurs de chaleur placés exactement dans l'axe des appareils de chauffage et formant avec eux un circuit électrique fermé destiné *in fine* à autoriser la régénération des signaux thermiques ainsi recueillis ; 5) enfin, un ensemble de petits

mesure d'acquérir des composants électroniques pour fabriquer la mémoire de l'A.R.C., il aurait été de toute façon complètement insensé de songer à coupler une mémoire électronique, donc une unité extrêmement rapide, à un ordinateur composé d'éléments aussi lents que des relais électromagnétiques.

ventilateurs puissants (non représentés sur la figure), installés à l'arrière du cylindre et servant à refroidir sa surface afin de la rendre immédiatement réutilisable en vue d'un nouvel enregistrement. Sachant que ce prototype n'équipa jamais aucun ordinateur ni non plus aucun calculateur, nous décrirons maintenant son *modus operandi* en supposant qu'un opérateur humain en assurait directement le contrôle. Au cours de la phase initiale d'enregistrement, chacun des éléments d'information (0 ou 1) composant la brève séquence de données appelée à être stockée sur le tambour de la mémoire thermique était successivement envoyé au système. Les deux dispositifs de chauffage (*heaters*) placés sur la partie supérieure du cylindre entraient alors simultanément en opération à chaque fois qu'un bit de type « 1 » était rencontré – deux petites zones distinctes et parallèles du cylindre se voyaient immédiatement portées à haute température afin de représenter ce bit - tandis que dans le cas contraire, celui correspondant par conséquent à un bit de type 0, seul l'un d'entre eux était activé. Puisque le tambour de la mémoire était animé d'un mouvement rotatoire régulier, les « points chauds » simples ou doubles venant d'être créés, ou plutôt écrits à sa surface, ne tardaient pas à passer devant ses deux capteurs de chaleur (lesquels constituaient en fait les têtes de lecture de l'ensemble). Lorsqu'un « point chaud » était détecté par un, voire deux de ces senseurs thermiques, l'information correspondante, soit 0 ou 1, se voyait alors immédiatement renvoyée vers le mécanisme d'écriture de la mémoire (ses *heaters*) sous la forme d'un signal électrique d'intensité appropriée. Au terme de cette boucle de *feedback*, l'information venant d'être lue pouvait être ainsi réécrite sur une zone vierge du revêtement du cylindre et le cycle d'écriture/stockage/lecture recommencé *ad libitum*.

En dépit de sa remarquable ingéniosité, la mémoire imaginée par Booth souffrait de très nombreuses imperfections dont la plus handicapante, on le pressent peut-être, tenait au fait qu'elle reposait essentiellement sur l'exploitation de l'énergie sous sa forme thermique. D'un point de vue strictement thermodynamique, et puisqu'on est très loin d'avoir affaire ici à un système clos idéalisé, on sait fort bien qu'au fur et à mesure que le temps s'écoule, toute source de chaleur tend inéluctablement à diffuser et à se dissiper. Pour le dire encore autrement, dans des conditions normales, elle « s'étend », s'attédie puis finit invariablement par refroidir. Ce sont précisément ces phénomènes thermodynamiques qui devaient grandement limiter l'efficacité du dispositif de Booth et conduire au final à son abandon définitif. En effet, et afin d'accroître la quantité d'information susceptible d'être stockée sur le tambour d'enregistrement du système - ce que cherchait justement à faire le physicien anglais - deux solutions pouvaient être envisagées. La première d'entre elles consistait à augmenter le diamètre – et par voie de conséquence géométrique la surface utile - du cylindre de la

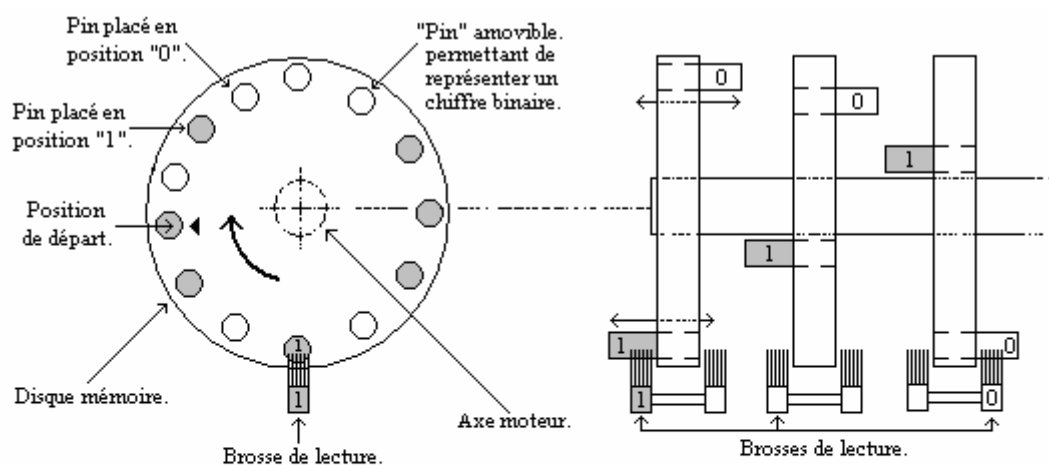
mémoire. Mais ce faisant il est bien évident que l'on accroissait du même coup la distance qu'un « point chaud » donné devait physiquement parcourir entre le mécanisme d'écriture et les capteurs thermiques servant à sa détection et à sa régénération. Jusqu'à un certain point, ou, si l'on préfère, jusqu'à ce que le diamètre du cylindre d'enregistrement atteigne une valeur définie, cette façon de procéder pouvait très certainement se révéler fructueuse. Cependant, une fois doublé ce seuil critique, on s'exposait au risque de voir très régulièrement apparaître des erreurs lors des phases répétées de lecture et d'écriture. Ainsi entre l'instant où il était créé ou régénéré et celui où il passait sous les capteurs de chaleur en vue d'être recyclé par *feedback* électrothermique, le « point chaud » pouvait avoir le temps de refroidir suffisamment au point de devenir complètement indétectable. Dans de pareilles conditions, l'information enregistrée risquait alors tout bonnement d'être perdue ou altérée dans les tous derniers moments de l'intercycle. Précisons immédiatement que le caractère très rudimentaire des mécanismes d'écriture et de lecture employés par Booth interdisait que la vitesse de rotation du tambour soit forcée afin de contenir cette dégradation calorifique dans des limites techniquement acceptables. On aurait également pu imaginer ici intensifier le courant électrique servant à la production des empreintes « info-thermiques » sur le tambour dans le but de prolonger leur durée de vie mais cette façon de procéder, parce qu'extrêmement contraignante sur le plan mécanique, aurait eu pour conséquence inévitable d'entraîner une détérioration par trop rapide de son revêtement. En outre cette méthode aurait aussi conduit à amplifier le phénomène de diffusion thermique au delà de ce qui pouvait être admis... La deuxième solution concevable ici pour étendre la capacité de la mémoire thermique consistait à augmenter la densité d'information stockée sur la surface du cylindre d'enregistrement, c'est-à-dire finalement à réduire la distance physique existant entre deux « points chauds » représentant deux informations parfaitement distinctes. Dans ce cas précis, et en supposant que l'on ait exagérément diminué cet intervalle séparateur, c'est alors à un risque d'interférence thermique, donc de perturbation informationnelle, que l'on s'exposait. En raison des phénomènes de diffusion thermique et des propriétés naturelles de conductivité calorifique des matériaux, le fait de rapprocher excessivement deux « point chauds » l'un de l'autre menaçait sérieusement de conduire à la mixtion ou à l'amalgame, autrement dit à l'indifférenciation et à la perte, des informations spécifiques que ces derniers permettaient de représenter à l'origine (on aurait par exemple lu une unique information là où il y en avait deux auparavant car deux points « info-thermiques » insuffisamment dissociés auraient fini par n'en former qu'un seul sous l'effet de la propagation de la chaleur). Encore une fois il faut bien voir que sous prétexte de vouloir gagner en capacité de stockage, tout ne pouvait être

envisagé: certains paramètres physiques, certaines « pesanteurs », pour reprendre ici le terme de Joël de Rosnay, devaient ainsi être impérativement prises en considération sous peine de voir le système devenir totalement inopérant. D'un autre côté, le respect de ces contraintes avec lesquelles il était de toute façon impossible de transiger imposait de sérieuses limitations à ce même système, à commencer bien entendu par celle déterminant sa capacité maximale de stockage. D'après ce que nous en savons, Andrew D. Booth s'efforça de tenir compte conjointement de ces deux facteurs limitatifs pour mettre au point sa mémoire thermique mais en dépit de tous ses efforts, il ne parvint jamais à obtenir par ce moyen l'importante capacité de stockage qu'exigeait en fait l'*Automatic Relay Computer*. Par la suite ce principe pourtant très intéressant, mais il est vrai bien peu facile à réaliser et à maîtriser, fut complètement délaissé.

2.2.8.2. Les mémoires mécaniques et électromécaniques.

Après que l'E.N.I.A.C. ait définitivement démontré la viabilité ainsi que les potentialités de la technologie électronique lorsqu'elle était utilisée à grande échelle et que Von Neumann ait exposé peu de temps après les grands principes architecturaux de sa nouvelle machine dans son célèbre rapport, la très grande majorité des personnes impliquées dans le tout nouveau domaine de la conception des ordinateurs s'efforcèrent de fabriquer pour eux des mémoires offrant à la fois rapidité de fonctionnement et grande capacité d'enregistrement. Leur objectif, qui devait en réalité constituer l'enjeu décisif de la première informatique, visait en tout premier lieu à découvrir de nouvelles solutions techniques en vue de parvenir à réduire au maximum le différentiel existant de fait entre la vitesse d'opération des systèmes de stockage de la machine et celle de ses modules électroniques (ces derniers étant de loin les plus rapides, ils constituaient pour ainsi dire la norme sur laquelle il convenait d'essayer de s'aligner). Bref, en tentant d'homogénéiser de la sorte la vitesse de fonctionnement des différentes parties de l'ordinateur, ces gens, comme toujours, cherchaient tout simplement à gagner du temps. A cette époque – nous parlons bien entendu ici des années d'immédiat après-guerre - seuls l'allemand Konrad Zuse et le britannique Andrew D. Booth travaillaient encore avec des éléments aussi « lents » que les relais électromécaniques pour construire leurs machines (construire *intégralement* s'entend). Partout ailleurs, on recourait exclusivement à des composants électroniques pour réaliser les parties maîtresses des ordinateurs en même temps que l'on commençait à introduire et à tester de nouveaux procédés d'enregistrement à haut rendement. On comprend alors sans peine que la production de mémoires mécaniques ou électromécaniques soit restée quelque chose

d'extrêmement confidentiel : beaucoup trop lentes pour que l'on puisse raisonnablement envisager de les coupler à des dispositifs électroniques, elles ne pouvaient en réalité être unies qu'à des machines assemblées à partir du même type d'éléments qu'elles. Or en dehors des rares prototypes conçus par Booth ou Zuse, il n'existait au monde aucun ordinateur électromécanique. Dans ce qui suit, et sans nous étendre plus qu'il n'est nécessaire car il s'agissait vraiment de réalisations marginales, nous examinerons le principe de fonctionnement d'une des mémoires électromécaniques que Booth conçut pour son *Automatic Relay Computer*. L'unité de base de ce système consistait en un petit disque rotatif dont la zone pré-circconférentielle était garnie d'un certain nombre de trous régulièrement espacés (sur le diagramme ci-dessus, treize ont été représentés mais ce nombre pouvait être supérieur ou inférieur à cela). Logé à l'intérieur de ces cavités individuelles, on trouvait un petit cylindre métallique - ou pin - doté de deux niveaux de liberté horizontaux. En l'occurrence, chacun de ces éléments mobiles pouvait faire saillie *soit* sur la face frontale du disque, *soit* sur sa face dorsale. L'une et l'autre de ces deux positions pouvaient donc servir – et servaient ! - à représenter spécifiquement un chiffre binaire (1 ou 0 selon le cas considéré). Alors que le disque était placé en rotation, un solénoïde – une bobine électrique générant un champ magnétique comparable à celui d'un aimant - permettait de déclencher automatiquement et sélectivement un mouvement de translation horizontale pour initialiser (écrire) ou modifier la position de tout ou partie de cet ensemble de cylindres.



- 1) Le nombre binaire représenté par le disque figurant ci-dessus est : 1101011100010.
- 2) Par souci de lisibilité, nous n'avons représenté que deux pins (un "1" et un "0"), sur la partie droite du diagramme. En réalité, nous aurions dû en faire figurer treize.

Fig. 20: représentation schématique d'une des mémoires électromécaniques mises au point par Andrew D. Booth pour l'*Automatic Relay Calculator* (le montage présenté ici est de type sériel).

En procédant de la sorte, il était ainsi possible de transformer mécaniquement la valeur du nombre binaire stocké sur le disque numérique au fur et à mesure que l'ordinateur auquel il était relié effectuait des calculs. Installées de part et d'autre de la partie inférieure du disque, deux petites brosses métalliques parcourues en permanence par un courant électrique étaient employées en tant que dispositifs de lecture. Ces têtes étaient positionnées de telle sorte que lorsque le mécanisme était mis en marche, elles établissaient un bref contact électrique avec les pins que leurs multiples brins, nécessairement, balayaient. C'est cet ensemble de signaux électriques qui permettait de représenter et d'exporter vers l'ordinateur le nombre binaire enregistré sur le disque numérique. Pour écrire, on recourait au même type de procédé : l'ordinateur envoyait des signaux électriques représentant les valeurs numériques devant être stockées en direction des solénoïdes de la mémoire lesquels, sous l'effet du flux électronique entrant, induisaient des champs magnétiques qui modifiaient la position courante des pins de manière appropriée.

En montant plusieurs disques de ce genre sur un axe moteur unique, il était possible d'obtenir deux sortes d'unité de stockage : une mémoire à fonctionnement sériel ou bien une mémoire à fonctionnement parallèle. C'est en fait la façon dont on choisissait de représenter les nombres sur les disques numériques qui déterminait le type de dispositif auquel on avait affaire. Quelle que soit la solution retenue, il n'était de toute façon nullement besoin d'intervenir pour modifier la structure matérielle de l'appareil. Dans le premier cas de figure – celui de la mémoire sérielle – tous les chiffres composant un nombre binaire étaient stockés sur un seul et même disque. Sachant qu'il existait bien évidemment une position de départ, les processus d'écriture et de lecture s'effectuaient donc bit par bit – pin par pin – tandis que le disque tournait sur lui-même. Ici, *un disque* autorisait par conséquent le stockage d'*un nombre*. Dans le second cas, on faisait plutôt usage d'un schéma de représentation basé sur le principe de la notation positionnelle. Chaque chiffre, en fonction de l'emplacement particulier qu'il occupait au sein du nombre binaire à traiter, était matérialisé sur le pin correspondant du disque coïncidant. Ainsi, pour stocker un nombre commençant par la série numérique 101....., on aurait activé le premier pin « 1 » du premier disque (tous les autres auraient été mis en position « 0 » et ignorés), le deuxième pin « 0 » du deuxième disque (tous les autres auraient été mis en position « 1 » et ignorés), le troisième pin « 1 » du troisième disque, etcetera. Au cours de la phase de lecture, l'ensemble de bits stockés était lu au même instant – en mode parallèle donc - ce qui supposait bien sûr une synchronisation parfaite du mouvement des disques d'enregistrement.

On sait qu'en partant du principe général que nous venons d'exposer, Booth réussit à concevoir une mémoire électromécanique sérielle pour l'A.R.C. Malgré ses dimensions modestes (20,3 centimètres de long pour 5,08 centimètres de diamètre), celle-ci était pourtant dotée d'une capacité de 50 nombres de 21 bits (soit à peu près 130 octets). En théorie au moins ceci semblait bien prouver la faisabilité d'une mémoire électromécanique de grande capacité mais en pratique, comme nous l'avons vu, Booth et son père ne purent surmonter l'obstacle que représentait l'assemblage minutieux des multiples pièces qu'elle nécessitait.

2.2.8.3. Les lignes délais acoustiques et magnétostrictives.

Alors que nous étudions l'E.N.I.A.C., nous avons eu largement l'occasion de parler et d'examiner le mode de fonctionnement des lignes délai acoustiques au mercure. Nous n'y reviendrons donc pas ici et préférerons plutôt nous concentrer sur un autre genre de mémoires à mode d'accès sériel, les lignes délai magnétostrictives (*Magnetostrictive Delay Lines* ou M.D.L.). Introduites en Grande-Bretagne au cours de l'année 1951 par Andrew D. Booth et la firme industrielle *Ferranti Corp.*, les M.D.L. constituaient en fait une version électromagnétique des lignes délai au mercure. Comprendre que si elles reprenaient effectivement le principe général d'opération de ces dernières, le médium permettant à l'onde porteuse acoustique représentant l'information enregistrée de se propager d'une extrémité à l'autre du système n'était plus ici du mercure - un matériau lourd, coûteux et finalement assez peu fiable - mais un fil ou un tube de nickel. Examinons à présent la figure produite ci-dessous en précisant immédiatement qu'en plus de pouvoir être disposé de manière linéaire, comme c'est justement le cas ici, le fil de nickel de la M.D.L. était également susceptible de se voir enroulé sur lui-même pour former une spirale, ce qui permettait bien évidemment de réaliser un gain de place souvent très appréciable. Une M.D.L. consistait donc tout d'abord en un fil ou tube de nickel extrêmement fins. La vitesse de propagation du son dans ce matériau étant beaucoup plus élevée qu'elle ne l'est dans le mercure, il fallait compter à peu près cinq mètres de fil pour obtenir un délai de stockage d'une milliseconde (d'où l'intérêt de pouvoir procéder à son enroulement lorsque l'on souhaitait disposer de temps de latence plus importants). A chaque extrémité du dispositif était installée une bobine électrique : la bobine située à gauche de l'ensemble, c'est-à-dire en entrée du système, servait de générateur de champ magnétique tandis que celle placée à droite était utilisée en tant que convertisseur de sortie. Le phénomène physique sur lequel reposait le fonctionnement des M.D.L. était la

magnéto-restriction : ainsi quant un corps ferromagnétique⁶⁴⁴ - comme le nickel mais aussi le fer ou le cobalt – se trouve placé dans un champ magnétique, il subit une déformation mécanique qui, sous la forme d'une onde de compression longitudinale, se propage dans toute sa longueur. Il est ensuite possible de récupérer ce signal en bout de ligne en recourant au processus de transduction inverse : les propriétés du champ magnétique propre à un matériau tel que le nickel variant localement en fonction de celles de l'onde de distorsion mécanique qui le traverse, celle-ci, en arrivant au niveau de la bobine réceptrice du système, y induit un faible courant électrique susceptible ensuite de se voir amplifié au moyen d'un aimant permanent. A partir de là ce courant pouvait être détecté et renvoyé en direction de la M.D.L. (rafraîchissement des informations) ou bien d'un autre dispositif (ordinateur, mémoires auxiliaires, imprimante, etc.).

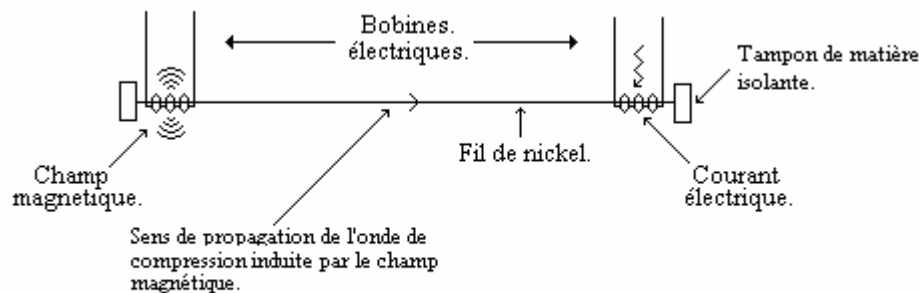


Fig 21: ligne délai magnétostrictive.

Bien entendu la série d'impulsions électriques appliquée au transducteur d'entrée de la M.D.L., le champ magnétique et la déformation mécanique générés par celui-ci ainsi que le signal finalement recueilli en sortie du système servaient tous à représenter, sous une modalité ou sous une autre, les données numériques binaires transmises par l'ordinateur à la ligne magnétostrictive (ou inversement). Pour éviter toute réverbération de l'onde porteuse dans le fil de nickel – et donc toute apparition de bruit dans le système – deux embouts de matière absorbante garnissaient ses terminaisons. Ainsi, en lieu et place de « rebondir » sur l'extrémité droite du fil et d'entrer ensuite dans un régime de type oscillatoire et dégénèrescent, l'onde de compression, après avoir doublé la bobine de sortie, était complètement étouffée aussitôt qu'elle entra en contact avec ces tampons. Leur rôle était donc parfaitement analogue à celui que remplissaient les cristaux de quartz non réfléchifs qui

⁶⁴⁴ Rappelons que le terme « ferromagnétisme » désigne cette capacité qu'ont certains matériaux à pouvoir prendre une forte aimantation en dépit de l'absence de champ magnétique extérieur.

« bouchaient » généralement les extrémités des tubes des lignes délai acoustiques au mercure. Par rapport à ces dernières, on remarquera que les lignes magnétostrictives offraient au moins trois avantages de taille. Tout d'abord, et ainsi que nous l'avons déjà dit, ces dispositifs étaient très peu encombrants. Ensuite, le nickel étant nettement moins thermosensible que ne l'est mercure, peu de précautions devaient être prises pour installer une ou plusieurs M.D.L. sur un ordinateur, y compris à proximité de ses unités électroniques (celles produisant justement le plus de chaleur). Là encore on réalisait un gain de place. Mais il faut bien voir ici qu'en rapprochant physiquement sa mémoire principale des différents modules de l'ordinateur on réduisait également la distance que les flux électroniques entrants et sortants avaient à parcourir entre ces derniers. En d'autres termes, il était possible par là d'améliorer la vitesse d'opération de l'ordinateur sans pour autant craindre de voir diminuer les performances et la fiabilité de sa mémoire. Dans ce cas précis on ne saurait bien entendu parler de processus de miniaturisation mais force nous est faite de constater que le principe fondamental sous-tendant ces deux démarches – rapprochement des unités et miniaturisation – est le même : il s'agit en définitive de gagner de la place pour gagner de la vitesse. Enfin, contrairement au mercure, le nickel est un médium qui se prête tout à fait au transport d'ondes acoustiques de basse fréquence. Alors que les lignes au mercure nécessitaient impérativement l'emploi d'un modulateur d'onde porteuse à haute fréquence pour pouvoir fonctionner correctement, ce n'était pas le cas avec les M.D.L. Le système s'en trouvait donc d'autant simplifié. Il semble que la fréquence maximum de fonctionnement jamais été atteinte avec une ligne délai magnétostrictive avoisinait les 5 mégahertz. Compte tenu du fait que la fréquence de l'onde porteuse tendait à décroître en même temps qu'augmentait son délai de propagation (ou la longueur du fil de nickel), on peut alors estimer à quelques 5000 bits – soit 625 octets - la capacité de stockage optimale d'un tel dispositif.

En dépit de tous les avantages qu'elles offraient, les lignes délais magnétostrictives ne furent finalement que très peu employées sur les ordinateurs construits entre 1951-52 et le début des années soixante. Parmi ces trop rares machines, on pourra par exemple citer l'ordinateur militaire NICHOLAS et les ordinateurs commerciaux 402 et 403 produits par la firme britannique *Elliott Brothers*, l'ordinateur commercial Pegasus de la *Ferranti Ltd.*, ou encore le prototype 4111 construit en 1959 par l'américain *Burroughs* afin de contrer l'I.B.M. 650 et l'U.N.I.V.A.C. *File Computer*. Les raisons permettant d'expliquer cet échec, ou ce demi-échec, n'ont absolument rien d'énigmatique (les fabricants d'ordinateurs ne « boudèrent » pas les lignes magnétostrictives pour quelque obscur motif). Ainsi, malgré leurs performances et leur fiabilité tout à fait exemplaires, les M.D.L. souffraient encore du défaut

majeur qui avait caractérisé les lignes délai au mercure, à savoir un mode de fonctionnement sériel qui faisait que l'information qu'elles permettaient de stocker n'était jamais immédiatement disponible. Chaque processus de lecture ou d'écriture sur la ligne s'accompagnait donc systématiquement d'une perte de temps difficilement tolérable (*a fortiori* quant on réalisait des calculs très longs). Or à l'époque où les lignes magnétostrictives furent introduites, on commençait déjà à utiliser des tubes cathodiques de type Williams, des C.R.T., pour fabriquer la mémoire principale de certains ordinateurs (l'I.A.S.C. et l'O.R.D.V.A.C. figurèrent parmi les premières machines à en être dotées). Dans le milieu des années cinquante, ce sont les matrices à tores de ferrites qu'Andrew D. Booth et Jay Forrester avaient conçues (indépendamment) en 1947 qui se hissèrent à leur tour sur le devant de la scène. Ce sont ces deux sortes de systèmes digitaux qui devaient définitivement supplanter les lignes magnétostrictives (les tuer *in ovo* pour ainsi dire). L'apparition et l'utilisation croissante de ces nouvelles mémoires dites à « accès aléatoire » (*Random Access Memory*) ne signifia pour autant le complet abandon des M.D.L. Dans son *History of Computing*, Michael R. Williams indique ainsi qu'elles continuèrent à être employées jusque dans le milieu des années soixante-dix comme mémoires temporaires dans certaines parties des ordinateurs⁶⁴⁵ (généralement elles servaient de mémoires aux éléments de contrôle des terminaux vidéo). On sait également que des calculateurs électroniques tels que les *Friden* 130 et 1162, les *Monroe* 920, 950 et 990, le *Canon* 141, le *Sony* Sobax ICC-500W ou encore les *Iskra* 111-M et 111-I en furent équipés.

2.2.8.4. Les mécanismes de stockage électrostatiques à accès aléatoire.

2.2.8.4.1. Les tubes Williams.

Les premiers travaux de recherches concernant l'utilisation d'iconoscopes (ou *Cathode Ray Tubes*) comme dispositifs de stockage remontent aux débuts de l'année 1946. Ils devaient tout d'abord être menés par Edward F. MacNichol, Persa R. Bell et Hillard B. Huntington au *Radiation Laboratory* du *Massachusetts Institute of Technology*. L'objectif que poursuivaient ces trois scientifiques américains visait en tout premier lieu à développer un appareil d'enregistrement susceptible de remplacer avantageusement les lignes délai retard au mercure qui était alors couramment employées sur les systèmes de détection radar. A côté de

⁶⁴⁵ In [Williams, 1997], p.311.

cela, une deuxième application avait également été envisagée pour les C.R.T. : celle consistant à les utiliser comme mémoire principale d'ordinateur. C'est Presper J. Eckert qui émit cette idée pour la première fois à l'occasion de la célèbre série de conférences qui se tint aux mois de juillet et août 1946 à la *Moore School of Electrical Engineering*. Après tout si les C.R.T. pouvaient remplacer les lignes délai sur les systèmes radars et que celles-ci représentaient par ailleurs d'assez bons candidats pour fabriquer une mémoire d'ordinateur, on pouvait à juste titre supposer qu'ils étaient eux aussi capable de remplir cette fonction. Assez rapidement pourtant cette ligne d'investigation se vit abandonnée (tout du moins au M.I.T.). Dans un article qu'ils ont cosigné en 1952, Frederic C. Williams et Tom Kilburn ont exposé la raison pour laquelle MacNichol et ses collaborateurs renoncèrent finalement à poursuivre ce versant de leurs expérimentations: « *Another American source reported that the observed phenomena were quite unsuitable as the basis for a computing machine store. The reason given was that the memory was too transient, and thus the record could be read only a very few times before it faded away.*⁶⁴⁶ ».

Comprendre la nature exacte du problème évoqué ici par Williams et Kilburn exige que nous revenions brièvement sur la façon dont il est possible de stocker de l'information au moyen d'un tube cathodique (celle-ci pouvant par exemple servir à représenter l'évolution de la trajectoire d'un avion, comme c'est le cas avec le radar, ou bien encore une valeur numérique quelconque). Le principe général de fonctionnement des *Cathode Ray Tubes* peut être décrit comme suit : quant le faisceau électronique qu'émet son canon à électrons frappe la surface électroluminescente de la face interne de l'écran de l'icône, il se forme sur cet emplacement précis un point lumineux légèrement chargé en électricité. Ce sont ces points électroluminescents – lesquels peuvent éventuellement se voir regroupés de proche en proche pour former des traits – qui sont alors employés afin de représenter l'information binaire (données ou instructions) que l'on souhaite enregistrer « sur » le tube⁶⁴⁷. Pour recueillir ensuite ces signaux, c'est-à-dire finalement lire l'information qu'ils représentent, un certain nombre de moyens techniques reposant sur la détection et la collecte des charges électriques ainsi créées sont ensuite susceptibles d'être mis en œuvre. Le problème auquel devaient donc lourdement se heurter MacNichol et ses collègues tenait au

⁶⁴⁶ F. C. Williams et T. Kilburn, « The University of Manchester Computing Machine », *Review of Electronic Digital Computers, Joint A.I.E.E.-I.R.E. Computer Conference*, 1953, pp. 57-61. Cité in [Goldstine, 1972], p. 248.

⁶⁴⁷ Notons bien que les tubes Williams furent utilisés de deux manières différentes : en mode sériel ou en mode parallèle. Dans le premier cas, un seul tube servait à stocker un mot informatique de n bits. Dans le second, n tubes étaient employés pour enregistrer un mot de n bits. Sur des machines à mémoire parallèle telle que l'I.A.S.C. et ses copies (l'O.R.D.V.A.C. ou l'I.L.L.I.A.C. par exemple), la longueur d'un mot était de 40 bits. Pour stocker ce mot, quarante tubes étaient donc nécessaires.

fait que ces points électroluminescents avaient une durée de vie extrêmement brève. En effet la brillance et la charge électrique que possédait chacun de ces minuscules foyers informationnels ne constituaient pas des phénomènes rémanents: il suffisait d'un délai d'à peine deux dixièmes de seconde pour que ces derniers disparaissent complètement de la surface du tube (*fading*). La conclusion à laquelle parvinrent alors les américains était que cette durée de vie était beaucoup trop éphémère pour que l'on puisse raisonnablement imaginer se servir d'un tube cathodique en guise de mémoire d'ordinateur (où l'information, comme on le sait, doit fréquemment être stockée pendant de longues périodes de temps). Ce que Williams comprit, et que les membres de l'équipe du *Radiation Laboratory* se montrèrent impuissants à saisir, c'est qu'à partir du moment où une information peut être enregistrée brièvement au moyen de dispositifs de ce genre, elle est également susceptible de l'être indéfiniment. La solution, comme l'explique Jérôme Ramunni, consiste à coupler le tube « avec un système de régénération [qui rétablit] l'information enregistrée tous les 1/30^e de seconde⁶⁴⁸ ». En d'autres termes, il s'agit ici de rafraîchir très fréquemment les signaux électroluminescents que génère le canon électronique sur l'écran de l'iconscope avant que ces derniers ne se dégradent et ne soient perdus définitivement. C'est alors qu'il travaillait comme ingénieur électronicien / radariste au *British Telecommunications Research Establishment* de Malvern que F. C. Williams commença à s'intéresser aux dispositifs de stockage digitaux électrostatiques. La guerre terminée, le perfectionnement des systèmes radar ne constituait en effet plus une priorité pour la Grande-Bretagne et les supérieurs hiérarchiques de Williams l'autorisèrent par conséquent à se lancer dans de nouveaux travaux de recherche. Selon Michael R. Williams⁶⁴⁹, ce sont très vraisemblablement les idées que Presper J. Eckert avait eues dans ce domaine qui incitèrent en fait Williams à s'engager dans cette voie originale. Cette hypothèse, en tout cas à notre sens, semble parfaitement recevable. Ainsi on sait fort bien que F. C. Williams n'assista jamais aux conférences d'été de la *Moore School of Electrical Engineering* mais avant même que Maxwell H. A. Newman ne lui propose la chaire d'électrotechniques de la *Victoria University* de Manchester au début de l'année 1947, celui-ci entretenait déjà des relations privilégiées avec Douglas R. Hartree et Maurice V. Wilkes. Ce sont donc sûrement ces deux personnes – peut-être l'une d'entre elles seulement - qui lui firent part de la proposition d'Eckert. Quoi qu'il en soit, et même si tout porte à croire que la paternité de cette idée ne saurait vraiment lui revenir, c'est bien F. C. Williams qui le premier parvint à lui donner forme concrète. Le travail sur les C.R.T. connut

⁶⁴⁸ In [Ramunni, 1989], p. 115.

⁶⁴⁹ In [Williams, 1997], p. 311.

un rythme de développement remarquablement rapide puisque dans les tout derniers mois de 1946, Williams déposa un brevet afin de protéger légalement son nouveau système d'enregistrement. Un an après cela, Tom Kilburn et lui disposaient déjà d'un démonstrateur capable de stocker de manière relativement fiable un millier de bits mais il fallut « encore » attendre un semestre avant que les deux hommes ne réussissent à mettre au point un modèle doté d'une capacité de stockage de plusieurs milliers de bits, autrement dit qu'ils ne fabriquent un C.R.T. dont les performances étaient telles qu'il devenait désormais possible de l'utiliser comme une mémoire d'ordinateur. Ainsi que le remarque fort justement Herman H. Goldstine, « *le tube Williams représenta très certainement le meilleur dispositif mémoire disponible [sur le « marché »] jusqu'à ce que les matrices à tores de ferrite ne soient inventées*⁶⁵⁰ ». De fait, par rapport aux lignes délai acoustiques dont ils étaient les contemporains – et non les prédécesseurs – les tubes Williams constituaient bel et bien une petite révolution. Pour commencer ils étaient extrêmement rapides : les temps d'accès moyens en phase de lecture/écriture se situaient ici dans une fourchette allant de 8 à 16 microsecondes contre 48 microsecondes – quelquefois huit fois plus – pour les lignes délai acoustiques ou magnétostrictives les plus évoluées. Ensuite, et pour une capacité de stockage beaucoup plus importante, ils devaient se révéler nettement plus fiables⁶⁵¹ que ces dernières. Il serait toutefois inexact d'affirmer ici que ces mémoires cathodiques fonctionnaient entièrement sur le mode digital : comme nous allons le voir sous peu il subsistait en effet dans ces instruments une « part » d'analogique qui, dans une certaine mesure, pouvait nuire à leur bon fonctionnement. C'est d'ailleurs ce mode d'opération hybride, ce « mélange peu esthétique des techniques analogique et digitale » pour reprendre ici l'expression de M. R. Williams, qui amena Jan Rajchman des R.C.A. *Laboratories* à tenter de concevoir un tube cathodique entièrement digital, le Selectron. En nous appuyant sur les analyses de M. R. Williams, nous allons à présent revenir sur le fonctionnement des tubes Williams de façon un peu plus détaillée afin de comprendre comment ces derniers purent effectivement être utilisés comme

⁶⁵⁰ In [Goldstine, 1972], p. 248.

⁶⁵¹ Les tubes Williams, à l'inverse des lignes délai au mercure, n'étaient pas thermosensibles. Cependant il doit être noté que dans certaines conditions qui peuvent sans doute se voir qualifiées d'extrêmes, les C.R.T. pouvaient devenir photosensibles. Dans son *History of Modern Computing* (pp. 34-35), Paul E. Ceruzzi rapporte ainsi que le jour où l'I.B.M. 701 fut dévoilé cérémonieusement au public, les flashes répétés des photographes provoquèrent l'effacement des informations qui étaient stockées sur les tubes cathodiques de 3 pouces lui servant de mémoire principale. De manière plus générale, les tubes Williams étaient extrêmement sensibles aux perturbations électromagnétiques pouvant être présentes dans l'environnement. C'est d'ailleurs ce qui amena James H. Pomerene à concevoir des boucliers métalliques individuels pour chacun des quarante C.R.T. qui devaient être montés en parallèle sur l'I.A.S.C.

mémoires d'ordinateurs. Ceci nous permettra également de mettre en lumière les défauts qui étaient les leurs.

On remarque que lorsqu'un faisceau d'électrons est employé pour écrire – enregistrer – une série de point ou de traits représentant de l'information sur l'écran électroluminescent d'un iconoscope, la charge électrique entourant un point est différente de celle qui enveloppe un trait. Si, immédiatement après qu'ait été complétée cette phase d'écriture, on procède à une deuxième opération de balayage horizontal (lecture et rafraîchissement de l'information ligne par ligne), il s'ensuivra alors nécessairement une « fuite » d'électrons au travers de l'écran du tube cathodique. Or la charge électrique propre des différents points et traits déjà présents sur l'écran va modifier localement l'intensité de ce courant « fuyant » de sorte qu'en installant un treillis métallique collecteur devant l'écran, on pourra en détecter les plus infimes variations c'est-à-dire « voir » si, en telle zone ou telle autre, le faisceau électronique est passé sur un point ou un trait (un « 1 » ou un « 0 ») Grâce à cette sorte de filtrage électronique, il est donc possible de lire les informations binaires stockées par l'iconoscope. Toutefois il survient ici un problème de taille. Le dispositif permettant d'écrire et de lire sur l'écran du tube étant exactement le même dans les deux cas, il est évident que durant la phase de lecture/réécriture le faisceau d'électrons tendra forcément à transformer la charge électrique des points et des traits dont il est pourtant censé permettre à la fois la détection et la régénération. De plus, en raison de l'imprécision relative de ces processus, il n'est pas du tout certain qu'un point (ou un trait) venant d'être rafraîchi occupe exactement le même emplacement, le même pixel, que celui où il se trouvait avant d'être régénéré.

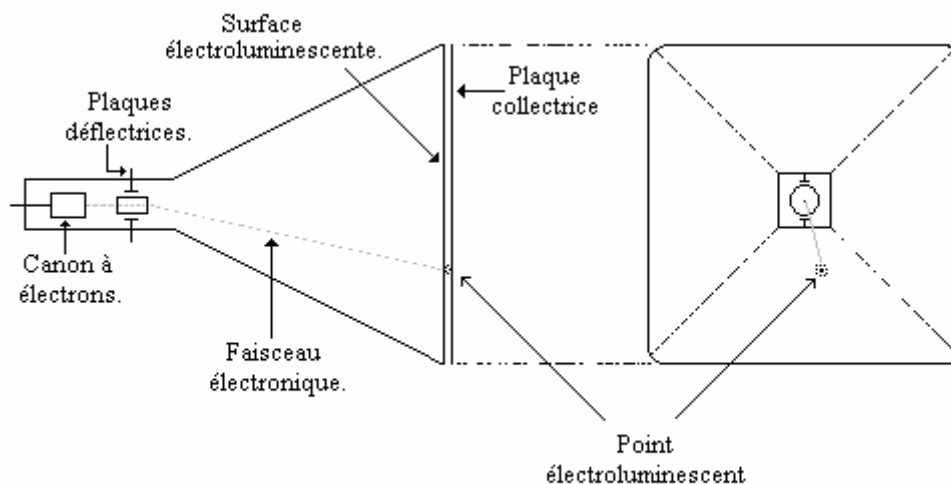


Fig. 22: principe de fonctionnement du tube Williams (système de stockage électrostatique)

En d'autres termes, et sans vouloir faire ici la moindre allusion à la version « populaire » du célèbre principe d'incertitude d'Heisenberg, les informations devant être lues

risquent tout simplement d'être altérées alors même que s'effectue leur lecture/réécriture. Afin de remédier à cette difficulté technique, Williams et Kilburn songèrent tout d'abord à employer deux iconoscopes jumelés. Le premier devait servir à l'écriture des informations tandis que le second devait permettre leur lecture. En permutant les fonctions respectives de ces tubes une fois tous les $1/10^6$ de seconde, un dispositif de stockage permanent pouvait ainsi être créé. L'inconvénient, ici, était qu'en procédant de cette manière on doublait inévitablement la complexité du système, sa consommation énergétique, son coût de revient et d'entretien, etcetera. Bref si cela « marchait » bel et bien, ce type d'arrangement était fort loin de constituer une solution particulièrement économique. Rapidement toutefois, les deux hommes se rendirent compte que les champs électriques enveloppant les points et les traits affichés sur l'écran de l'iconoscope étaient suffisamment étendus et différents les uns des autres pour que l'on puisse les détecter - et donc discriminer les points des traits - *avant* même que le faisceau électronique de lecture ne scanne directement ces derniers. Exploitant cette propriété, Williams et Kilburn fabriquèrent alors un C.R.T. employant un faisceau dont la puissance pouvait être modulée automatiquement en fonction des « événements » électroniques rencontrés. En phase de lecture/réécriture, un rayon de basse intensité était tout d'abord utilisé pour balayer l'écran. Lorsque le système rencontrait un champ électrique, c'est-à-dire détectait si un point ou un trait *était sur le point d'être scanné*, la puissance du faisceau se voyait immédiatement accrue de manière à ce que ce point ou ce trait soit réécrit à l'endroit exact où il se trouvait au moment où son champ électrique avait été détecté. Une fois cette opération terminée, l'intensité du faisceau électronique était réduite et le processus de balayage horizontal pouvait se poursuivre normalement jusqu'à ce qu'un nouveau champ électrique « annonçant » un point ou un trait électroluminescent – une information binaire – soit découvert. C'est ce système que Williams et Kilburn retinrent finalement en lieu et place du prototype bitube qui l'avait précédé.

Au cours des années cinquante, les tubes Williams furent très souvent utilisés pour fabriquer la mémoire principale des ordinateurs. On devait ainsi les retrouver sur des machines aussi illustres que l'I.A.S.C., l'I.L.L.I.A.C., l'O.R.D.V.A.C., le N.O.R.C., le S.E.A.C., le S.W.A.C., l'E.R.A.-1103 (ou U.N.I.-S.C.I.), l'I.B.M. 701 ou encore les M.A.N.I.A.C. modèles I et II. Les raisons permettant d'expliquer ce succès sont relativement simples. Pour commencer, la technologie sur laquelle reposait fondamentalement leur fonctionnement – celle de l'iconoscope – était connue depuis longtemps et donc très bien maîtrisée. Ensuite, les tubes Williams pouvaient être fabriqués à partir de composants standard ce qui contribuait naturellement à en faire des dispositifs bon marché, donc des

instruments aisément réparables ou remplaçables. Enfin, à capacité de stockage et à vitesse de fonctionnement supérieures, ils offraient un niveau de précision et de fiabilité beaucoup plus élevé que celui caractérisant les lignes délai acoustiques mercurielles ou magnétostrictives construites à la même époque. En dépit de ces nombreuses qualités, il serait pourtant inexact d'affirmer ici que les C.R.T. constituaient des dispositifs de stockage « irréprochables ». Ainsi, les concernant, au moins deux faiblesses majeures pouvaient être relevées. La première d'entre elles était directement liée à la qualité de leur processus de fabrication. Il n'était pas rare en effet que la surface interne de l'écran d'un tube cathodique comporte de minuscules imperfections ou que l'épaisseur de la couche de matière électroluminescente - généralement du phosphore ou du fluor - dont elle était enduite par la suite ne soit pas parfaitement homogène. Ces deux facteurs - *a fortiori* quant leurs effets néfastes se cumulaient - ne pouvaient évidemment que nuire au bon fonctionnement du tube. Contrairement à ce que l'on pourrait peut-être croire ce genre de défauts ne concernaient pas seulement une petite partie de la production des C.R.T. Herman H. Goldstine se souvient ainsi que lorsqu'il travaillait avec les membres de l'équipe de John Von Neumann à la construction de l'ordinateur de l'*Institute for Advanced Study*, seuls 19% des tubes pourtant jugés « convenables » que purent leur fournir la *Radio Corporation of America* ou les *Allen B. Dumont Laboratories* furent finalement retenus et utilisés sur la machine après réalisation des phases de test⁶⁵². De fait, comme le rappelle M. R. Williams, « *même les tubes d'excellente qualité n'étaient pas toujours suffisamment bons pour pouvoir servir de composants mémoire à un ordinateur*⁶⁵³ ». Pour contourner cette difficulté - rejeter les meilleurs tubes pour vice de fabrication était bien entendu chose complètement impensable - il était possible de jouer sur le voltage du courant électrique appliqué aux plaques défléctrices du canon à électron de façon à déplacer sur l'écran le *pattern* de points et de traits que l'on souhaitait y enregistrer jusqu'à ce que l'on parvienne enfin à identifier un secteur « valide ». En séparant ainsi « le bon grain de l'ivraie » on pouvait donc employer un C.R.T. présentant de légères anomalies sachant tout de même que cette opération de sélection s'effectuait au détriment de sa capacité totale de stockage (puisque une partie seulement de l'écran était exploitée). Plus tard, un nouveau schéma d'encodage de l'information fut introduit par Williams et Kilburn qui devait permettre de solutionner définitivement ce problème. Au lieu de recourir à des points et à des traits pour représenter les données binaires, il s'agissait maintenant d'utiliser un faisceau électronique dont on faisait varier la concentration. Un point électroluminescent « condensé » produit par

⁶⁵² In [Goldstine, 1972], p. 310.

⁶⁵³ In [Williams, 1997], p. 313.

un rayon hautement focalisé pouvait alors servir à représenter un « 1 » tandis qu'un point légèrement diffus, donc généré par un faisceau de section plus importante, pouvait être employé afin de représenter un « 0 » (ou inversement). Cette nouvelle méthode de codage binaire était extrêmement intéressante en ceci que, sans nécessiter aucune modification sérieuse de la composition matérielle des systèmes, elle donnait pourtant des résultats tout à fait satisfaisants y compris avec des tubes de qualité relativement médiocre. Conséquence de la meilleure tolérance aux défauts qui résulta de sa mise en œuvre, le taux de rejet des tubes Williams diminua considérablement ce qui entraîna aussitôt une baisse sensible de leur coût d'achat.

La deuxième grande faiblesse des mémoires à tubes cathodiques est connue sous le nom il est vrai assez difficilement traduisible de *read-around problem*. Celui-ci survenait en fait lorsque le faisceau de lecture/écriture du C.R.T. se trouvait trop longtemps ou trop fréquemment focalisé en un point particulier de l'écran et que les électrons qu'il y « laissait » tendaient à se répandre et à s'accumuler graduellement dans les zones contiguës à cet emplacement. Si ce phénomène de débordement pouvait être toléré jusqu'à un certain seuil – encore fallait-il identifier ce dernier - il arrivait tout de même un moment où le nuage électronique ainsi formé atteignait une envergure telle que l'intégrité des informations stockées dans le voisinage immédiat du point effectivement bombardé s'en trouvait dangereusement menacée. Dans la troisième partie de *The Computer from Pascal to Von Neumann* Herman H. Goldstine a fourni une excellente description de ce phénomène:

« *If a particular spot was read or written on too many times without the whole vicinity being regenerated, it was possible for stray electrons to “leak” into neighboring spots and change them from one binary state to another erroneously... While roughness in appearance may be perfectly tolerable in a television program, this phenomenon may spell catastrophe in a calculation, since erroneous changes may materially alter numbers or perhaps even worse the very instructions defining a given problem*⁶⁵⁴. ».

Les techniciens et ingénieurs en charge de la mise au point des ordinateurs à mémoires cathodiques parvinrent à prévenir l'apparition de ce type de perturbations en déterminant à chaque fois quel était précisément le « *read-around problem ratio* », c'est-à-dire finalement le délai de temps maximum, qu'il ne fallait en aucun cas dépasser sous peine de voir le système

⁶⁵⁴ In [Goldstine, 1972], pp. 312-313.

commencer à se comporter anormalement sous les effets cumulés du phénomène de *read-around*. En fonction de la valeur de ce seuil critique, la fréquence de régénération de l'écran pouvait être finement ajustée – un rafraîchissement complet tous les 10 à 40 cycles de lecture selon l'ordinateur et les tubes considérés - et la taille des nuages électroniques toujours maintenue dans des limites acceptables. Précisons pour finir que cette fréquence de rafraîchissement ne pouvait être trop « poussée » car alors le temps total consacré à la régénération des informations sur l'écran de l'icôneoscope aurait égalé ou bien dépassé celui où il était sollicité par l'ordinateur, chose qui bien entendu aurait entamé son efficacité en tant que mémoire.

2.2.8.4.2. Les Selectrons.

L'histoire du Selectron est très intimement liée à celle de l'ordinateur de l'*Institute for Advanced Study*. Partenaire industriel de l'Université de Princeton aux premières heures de ce projet (un accord de collaboration fut en effet signé entre les représentants ces deux organismes dès le mois de décembre 1945), c'est la firme américaine *Radio Corporation of America* qui devait se charger de la conception et de la fourniture des éléments de la mémoire de cette machine. Dans un premier temps⁶⁵⁵ les membres de l'équipe de recherche et de développement que dirigeaient les Dr. Jan A. Rajchman et Vladimir K. Zworykin à la R.C.A. s'intéressèrent pour cela aux tubes cathodiques (comme F. C. Williams à la même époque). Toutefois, en procédant à un examen minutieux de leur mode de fonctionnement, Rajchman se rendit compte que leur fiabilité dépendait en fait étroitement de la précision du dispositif employé pour contrôler les déplacements horizontaux et verticaux (éventuellement diagonaux) de leur faisceau électronique. Comme nous l'avons expliqué plus haut, ce mécanisme directeur consistait en deux plaques défléctrices auxquelles étaient appliquées des courants électriques dont le voltage pouvait être modifié automatiquement en fonction de l'orientation spécifique que l'on désirait donner à ce faisceau. Il ne s'agissait donc là ni plus ni moins que d'un processus analogique – c'est-à-dire d'un processus potentiellement sujet à des dérèglements et à des imprécisions - jouant un rôle crucial au sein d'un dispositif digital et c'est précisément cela, cette espèce d'assortiment inélégant des deux techniques, qui déplut profondément à Rajchman. Forts de cette observation, ses collaborateurs et lui décidèrent alors de s'atteler à la conception d'un nouveau tube de stockage électrostatique dont

⁶⁵⁵ C'est-à-dire durant les tout premiers mois de l'année 1946.

l'ambition avérée était d'être entièrement digital. Ils le nommèrent Selectron. Dans ce qui suit, nous procéderons tout d'abord à la description technique de cet instrument remarquable puis nous nous efforcerons de détailler son fonctionnement afin de bien comprendre quels en étaient les avantages et les inconvénients.

Si l'on s'en tient uniquement à l'évocation de son apparence extérieure, à celle de ses dimensions, il est vrai que l'on ne peut que se rendre à l'évidence : le Selectron ressemblait beaucoup à un tube cathodique. Sur le plan de son organisation interne et de son *modus operandi* maintenant, c'est peu de chose de dire qu'il représentait un écart radical par rapport aux iconoscopes « classiques ». Le Selectron utilisait en effet un dispositif digital de sélection basé sur le bombardement électronique homogène de fenêtres créées par deux ensembles de barres parallèles disposés orthogonalement l'un par rapport à l'autre. A la différence de ce qui se passait avec les iconoscopes, où un unique faisceau électronique dirigé était employé pour exécuter ce processus de sélection – en quel endroit précis de l'écran enregistrer, lire ou réécrire l'information ? – c'était ici une véritable « douche électronique⁶⁵⁶ » qui se déversait en quasi permanence sur la matrice disjonctive du Selectron (couche n°1 sur le diagramme présenté ci-dessous). En vue de commander l'ouverture d'une fenêtre déterminée de ce réseau, donc d'écrire ou de lire des données, on appliquait un voltage approprié aux deux barres horizontales et aux deux barres verticales qui en formaient pour ainsi dire le chambranle. Lorsque le potentiel électrique de chacune de ces barres était positif et relativement égal à celui des autres, on obtenait alors une sorte de porte AND et une partie du flux d'électrons bombardant la grille pouvait passer au travers. Dans le cas contraire ce flux était repoussé (tout accès en lecture ou en écriture à la plaque de stockage se voyait donc interdit). En outre, le dispositif d'enregistrement des Selectrons n'avait strictement rien à voir avec celui des tubes cathodiques normaux. Au lieu d'un écran recouvert de substance électroluminescente, on trouvait ici une gaufrette (*wafer*) de mica⁶⁵⁷ dans laquelle étaient enchâssés à intervalles réguliers de minuscules anneaux d'acier nickelé maintenus à l'un ou l'autre de deux voltages électriques possibles. Ces deux états électriques différents permettaient à chacun de ces anneaux de pouvoir représenter un bit d'information, « 1 » ou « 0 » selon le cas (couche n°2 sur la figure). La distribution spatiale de ces éléments de stockage *discrets* sur leur plaque de support micacée était telle que chacun d'entre eux se trouvait très exactement localisé au

⁶⁵⁶ L'expression « douche d'électrons » est d'Ian A. Rajchman. Il l'a notamment employée dans un entretien qu'il a accordé le 11 juillet 1975 à deux membres de l'I.E.E.E. *History Center*, Mark Heyer et Al Pinsky (Jan Rajchman, *Electrical Engineer, An Oral History Conducted in 1975 by Mark Heyer and Al Pinsky*, I.E.E.E. *History Center*, Rutgers University, New Brunswick, NJ, USA.).

⁶⁵⁷ Les micas - biotite, phlogopite ou muscovite - sont des silicates d'aluminium et de potassium principalement connus pour leurs propriétés isolantes. Ils sont en outre transparents et infusibles.

centre d'une des fenêtres de la grille de sélection (à « l'arrière » de cette grille s'entend). Le degré de précision qu'il était possible d'atteindre grâce à ce système d'adressage digital lors des opérations de lecture et d'écriture était tout bonnement remarquable sachant en plus que les propriétés isolantes du mica empêchaient toute apparition d'un phénomène de diffusion électronique au voisinage d'un anneau électriquement chargé (*read around problem*). Enfin, derrière cette gaufrette de mica, une plaque collectrice destinée à détecter les flux électroniques passant au travers des anneaux nickelés se trouvait disposée. C'est cette dernière « strate » (n°3 sur la figure) qui permettait en fait de lire les informations enregistrées « sur » les anneaux de la lame de silicate. Avant que nous ne passions à l'étude du fonctionnement du Selectron, qu'il nous soit permis ici de formuler quelques remarques d'ordre général. Pour commencer, on se rend bien compte qu'il s'agissait là d'un instrument d'enregistrement nettement plus complexe que ne l'étaient les tubes cathodiques courants. La fabrication de ses différents éléments puis leur assemblage constituaient par conséquent un processus extrêmement délicat. De ce fait, ses coûts de production et de maintenance (éventuellement de réparation), étaient également beaucoup plus élevés que ceux qui pouvaient être attachés aux autres iconoscopes. En contrepartie, et à capacité de stockage au moins équivalente, le Selectron était théoriquement censé offrir à ses utilisateurs une fiabilité et une précision réellement hors du commun.

La description du fonctionnement d'un dispositif aussi compliqué que le Selectron n'est pas chose aisée. En procédant analytiquement – nous expliquerons successivement son opération lors des phases d'écriture, de stockage et de lecture – nous nous trouverons néanmoins en position d'en rendre compte de manière satisfaisante sans pour autant surcharger le discours avec des explications qui deviendraient bien vite par trop techniques. Supposons donc un Selectron vierge de toute information (à l'initialisation de l'appareil le potentiel électrique des anneaux de stockage était quelconque mais il divergeait de ceux employés pour représenter les « 0 » et les « 1 »). Lors de la phase d'écriture, l'ordinateur devait évidemment enregistrer dans le Selectron un certain nombre de données codées sous forme binaire. En appliquant successivement un voltage adapté à certaines paires de barres verticales et horizontales de la grille de sélection, il était possible d'ouvrir tour à tour autant de fenêtres d'écriture qu'il existait de bits devant être stockés. Si l'on voulait par exemple enregistrer un mot informatique de 40 bits – c'était là le format retenu pour la longueur des mots de l'I.A.S.C. - quarante fenêtres distinctes devaient être ouvertes à l'alternat par le système de contrôle piloté par la machine.

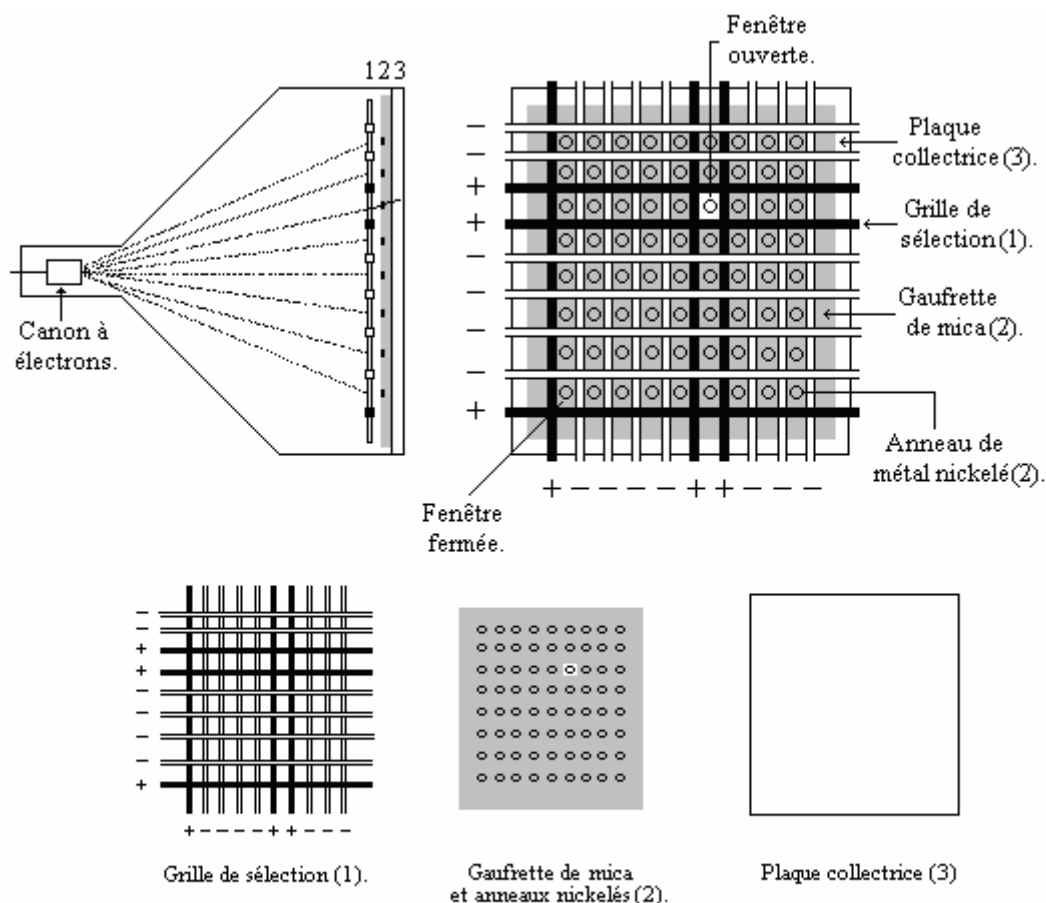


Fig 23: représentation schématique des principaux éléments du Selectron (R.C.A.).

Dans ce cas de figure précis, c'était une « douche électronique » à haute énergie qui était utilisée pour bombarder la totalité de la surface de la matrice sélective. Maintenant, de deux choses l'une : ou les électrons ainsi émis rencontraient sur leur chemin une fenêtre fermée et ils étaient repoussés (dès lors rien n'advenait), ou bien ils rencontraient une fenêtre ouverte, et ils passaient au travers. Si c'était effectivement ce qui se produisait, les électrons accédant à la couche de mica modifiaient - élevaient ou abaissaient selon le cas - le potentiel électrique de l'anneau précisément localisé derrière cette fenêtre. En fonction de la valeur de ce potentiel, l'anneau représentait désormais un « 1 » ou un « 0 », c'est-à-dire un bit d'information.

En phase de stockage, la grille de sélection de l'appareil se trouvait constamment « arrosée » au moyen d'une « pluie électronique » de moindre intensité. La fonction de ce bombardement consistait à générer sur cette grille un courant uniforme destiné à stabiliser le potentiel électrique des anneaux pris dans la gaufrette de mica. Les issues par lesquelles ils auraient éventuellement pu « fuir » étant toutes verrouillées électriquement, les électrons

participant de la charge électrique des anneaux d'enregistrement étaient donc contraints et forcés de demeurer à leur place. Notons bien ici que cette façon très particulière de procéder excluait que l'on ait besoin de recourir à un rafraîchissement périodique des informations stockées (un processus fréquent, donc coûteux en temps, qui risquait en outre d'endommager gravement les données, voire de les effacer, lorsqu'il était exécuté). On pourrait donc dire qu'à la différence des autres tubes cathodiques, les Selectrons étaient des dispositifs mémoire fonctionnant à « plein rendement ». Le procédé utilisé en phase de lecture était assez similaire à celui employé pour écrire les informations (l'intensité de la « douche électronique » était identique dans les deux cas). Les unes après les autres, les fenêtres pertinentes de la matrice sélective étaient ouvertes laissant ainsi la voie libre aux électrons sur le passage desquels elles se trouvaient. En fonction de la valeur du potentiel électrique de l'anneau placé derrière chacune de ces fenêtres, le flux électronique entrant pouvait passer intégralement ou partiellement en son centre. Selon le type du signal recueilli sur la plaque collectrice, c'est un « 1 » ou un « 0 » qui était lu.

Le Selectron représente certainement un des dispositifs d'enregistrement les plus ambitieux, mais aussi les plus élégants sur le plan technologique, qui ait jamais été conçu avant les années cinquante. Tout comme celui de l'ordinateur, le fonctionnement de cet appareil de stockage électronique était entièrement digital: il était donc extrêmement rapide – étant une mémoire à accès aléatoire, on pouvait accéder à n'importe quel bit stocké aussi vite qu'à n'importe quel autre - et incomparablement plus précis que ne l'étaient les autres iconoscopes. Cette très grande fidélité, ajoutée au fait qu'aucune procédure de rafraîchissement des informations enregistrées n'était nécessaire ici, contribuait donc à en faire une mémoire présentant un taux de fiabilité particulièrement élevé. Comme nous l'indiquions en débutant cette étude, les Selectrons furent spécifiquement développés par les laboratoires de recherche de la *Radio Corporation of America* pour servir d'éléments à la mémoire principale de l'ordinateur que John Von Neumann et son équipe construisaient au *Princeton Institute for Advanced Study*. Pourtant ces systèmes ne devaient jamais équiper l'I.A.S.C. En effet, au moment où le « projet » Selectron fut initié, une capacité de stockage nominale de 4096 bits (512 octets) par unité avait été arrêtée de manière à pouvoir répondre exactement aux besoins particuliers de cette machine. Malheureusement, les incessantes difficultés techniques que rencontrèrent Rajchman et Zworykin lors des phases de fabrication et d'assemblage des éléments des Selectrons furent telles que cette estimation première du être considérablement revue à la baisse. De fait, sur les 2000 tubes qui furent produits en tout et pour tout par la R.C.A., aucun ne devait dépasser les 256 bits de capacité (32 octets). Ceci

ne signifiait pas qu'en l'état, les Selectrons n'auraient pas pu être montés sur l'I.A.S.C. Théoriquement au moins, cela restait quelque chose de parfaitement envisageable. Mais puisqu'il avait été prévu dès l'origine que la capacité de la mémoire centrale de cet ordinateur devrait être de 160000 bits (4000 mots de 40 bits), il aurait maintenant fallu employer 625 tubes – contre 40 au départ – pour respecter ce volet crucial du cahier des charges. Sur le plan pratique c'était inacceptable car proprement irréalisable. Au début du printemps 1948, il devint clair pour les gens de l'I.A.S. que la production des Selectrons était en proie à d'énormes difficultés et que les objectifs de performance fixés un peu plus de deux ans auparavant ne pourraient être atteints (en tout cas dans des délais raisonnables). Aussitôt, ils se mirent donc en quête de solutions de stockage alternatives. La première d'entre elles prit la forme d'un tambour magnétique de petites dimensions (12,7 cm de diamètre), doté de quatre têtes de lecture/écriture et capable de tourner à la vitesse de 15000 tours par minute⁶⁵⁸. La capacité de stockage de cette mémoire magnétique rotative était de 2000 mots de 40 bits, soit 50% de la capacité mémoire effectivement requise pour que l'ordinateur de l'I.A.S. fonctionne normalement. Bien sûr ce tambour ne représentait rien de plus qu'une solution de pis aller - un dispositif électromagnétique est nécessairement plus lent qu'un ordinateur électronique ce qui fait que chaque accès en lecture ou en écriture ralentit considérablement la vitesse d'opération globale du système - mais en attendant mieux, c'est-à-dire plus « spacieux » et beaucoup plus rapide, l'I.A.S.C. disposait au moins d'une mémoire à accès parallèle opérationnelle de taille somme toute acceptable. D'après les notes personnelles d'Herman H. Goldstine⁶⁵⁹, c'est Julian Bigelow, le chef du projet I.A.S.C. et l'auteur, avec Arturo Rosenbluth et Norbert Wiener, du célèbre article « Behavior, Purpose and Teleology », qui le premier prit connaissance des travaux accomplis par F. C. Williams à l'Université de Manchester. Bien que Williams ait toujours employé ses iconoscopes pour stocker les données de manière sérielle (n bits étaient enregistrés sur un seul tube), Bigelow réalisa tout de suite que les tubes Williams correspondaient parfaitement à ce qu'il recherchait et qu'en outre, rien ne s'opposait techniquement à ce qu'un certain nombre d'unités soient couplées de manière à former une mémoire parallèle. C'est bien ce qui fut fait en définitive. Le seul problème ici était que la capacité de stockage d'un tube Williams (1024 bits) était quatre fois inférieure à celle qui avait été prévue à l'origine pour un Selectron (4096 bits).

⁶⁵⁸ Julian Bigelow était à l'origine de ce projet. La réalisation en fut confiée à Peter Panagos, Morris Rubinoff et Willis Ware de l'I.A.S. L'argent nécessaire au développement de cette mémoire magnétique provint d'un contrat que l'I.A.S. avait passé pour l'occasion avec l'*Office of Naval Research*. Notons enfin que ce tambour fut terminé le 31 juin 1948.

⁶⁵⁹ In [Goldstine, 1972], pp. 314.

Von Neumann choisit alors d'employer une mémoire parallèle composée de 40 tubes Williams (soit 40960 bits) secondée par un tambour magnétique de 81920 bits de capacité. Ce tambour, que Morris Rubinoff avait commencé à fabriquer en juillet 1948, fut installé en mai 1953 sur l'I.A.S.C. afin de subir une longue phase de tests. Ceux-ci, ainsi que le principe d'une mémoire à deux niveaux complémentaires mettant simultanément en jeu des tubes électrostatiques et un tambour magnétique, se révélèrent finalement satisfaisants puisque le dispositif de Rubinoff ne fut démonté qu'en 1955 pour se voir aussitôt remplacé par un tambour *Engineering Research Associates* de plus grande capacité (16384 mots de 40 bits).

A ce jour encore, la plupart des historiens de l'informatique s'accordent à reconnaître le caractère réellement exceptionnel des Selectrons. Herman H. Goldstine, témoin privilégié de cette époque s'il en fut, a ainsi pu qualifier le travail accompli par Rajchman et Zworykin entre 1946 et 1948 de « *work of great engineering virtuosity*⁶⁶⁰ ». Pour les différents motifs que nous avons exposés plus haut, ces ambitieuses mémoires à accès aléatoire furent cependant très loin de tenir toutes leurs promesses. Aussi, ce que ces auteurs se plaisent généralement à louer dans le Selectron, c'est plus la performance intellectuelle et technologique que représentaient sa conceptualisation, son design, que l'artefact quelque peu décevant qui sortit finalement des chaînes d'assemblage de la *Radio Corporation of America*. A notre connaissance, les Selectrons ne furent d'ailleurs employés que sur un seul et unique ordinateur : le J.O.H.N.N.I.A.C. de la *Rand Corporation* (1953). Encore cette utilisation ne devait-elle être que provisoire car il apparaît que deux ans à peine après avoir été mise en service, cette copie de l'I.A.S.C.⁶⁶¹ financée en grande partie par l'U.S. *Air Force* se vit équipée de mémoires à tores de ferrite. Extrêmement coûteux, beaucoup trop complexes à réaliser, offrant une capacité d'enregistrement largement insuffisante - même pour l'époque - les Selectrons se virent rapidement supplantés par les tubes Williams, des systèmes de stockage électrostatiques certes moins aboutis sur le plan technologique mais nettement plus efficaces dans les faits. Jusqu'à la fin des années cinquante, les tubes Williams, la plupart du temps secondés par des tambours magnétiques de très grande capacité⁶⁶², devait ainsi constituer l'instrument de référence pour l'élaboration de la mémoire centrale des ordinateurs. Mais bientôt ils ne tardèrent pas eux aussi à être évincés par un tout nouveau système de

⁶⁶⁰ In [Goldstine, 1972], pp. 309.

⁶⁶¹ Initialement pourvu de quatre tubes Selectrons (soit 1024 bits de capacité au total), le J.O.H.N.N.I.A.C. disposait également d'un tambour magnétique de 12288 mots de 40 bits. En 1957, l'unité arithmétique et logique de cette machine fut entièrement transistorisée.

⁶⁶² Précisons ici que le principe d'une mémoire centrale à deux niveaux ne devait pas seulement concerner les ordinateurs équipés de tubes Williams. En vue de compenser la faible capacité de stockage offerte par les lignes délais acoustiques au mercure, et au prix d'une sensible diminution de leur vitesse de fonctionnement, des machines telles l'E.D.S.A.C. ou l'E.D.V.A.C. furent également dotées de tambours magnétiques.

stockage magnétique de type *random access memory*: les mémoires à tores de ferrite (*magnetic core memory*). Ce sont ces dispositifs, lesquels n'allaient pas tarder à révolutionner le monde de l'informatique naissante, que nous nous proposons à présent d'étudier.

2.2.8.4.3. Les mémoires magnétiques dynamiques: tambours, disques, bandes.

La première tentative connue pour doter une machine à calculer électronique d'un tambour d'enregistrement rotatif est attribuée à John V. Atanasoff. A la fin des années trente, l'homme qui devait exercer une si profonde influence sur John W. Mauchly – et par conséquent sur l'E.N.I.A.C. - conçut en effet un dispositif de ce genre pour son calculateur A.B.C. Comme nous l'avons indiqué plus haut, cette petite machine révolutionnaire⁶⁶³ fut démontée avant la fin de la deuxième guerre mondiale car elle était trop large pour passer par l'entrée du local où elle avait été construite puis entreposée (ladite pièce devant être libérée pour servir à d'autres fins). Inutile bien entendu de préciser qu'une fois désassemblée, il ne se trouva personne pour la remettre en état de fonctionnement et c'est ainsi que peu à peu, on la perdit corps et bien. Toutefois, grâce au remarquable travail de reconstitution auquel se sont livrés le Dr. John Gustafson et ses collaborateurs pendant trois ans, une réplique opérationnelle de l'A.B.C. a finalement vu le jour au début du mois d'octobre 1997 à l'*Iowa State University*. Depuis cette date, on la connaît donc beaucoup mieux. Les deux mémoires tambour – peut-être conviendrait-il mieux de parler dans ce cas de *registres* tambour - dont était équipé l'A.B.C. n'étaient pas des dispositifs électromagnétiques. Il s'agissait en fait de petits cylindres de résine phénolique dans lesquels étaient pris des condensateurs (3200 au total) dont la charge électrique rafraîchie périodiquement permettait de représenter soit un « 1 », soit un « 0 », c'est-à-dire l'une ou l'autre des deux valeurs binaires. Le fait que ces systèmes de conservation de l'information⁶⁶⁴ aient eu une forme cylindrique les rapproche bien évidemment des tambours à picots utilisés sur les automates ou les calculateurs mécaniques des siècles précédents comme il les rapproche d'ailleurs des tambours électromagnétiques conçus à partir de la fin de la seconde guerre mondiale. Cependant, il est prudent d'arrêter là la comparaison. Comme le fait très justement remarquer John Gustafson

⁶⁶³ Rappelons que l'A.B.C. était un calculateur *électronique*, qu'il fonctionnait en mode *parallèle* et que la notation employée pour représenter les données numériques à traiter était le *binnaire*.

⁶⁶⁴ Chacune de ces « *Dynamic memory* », comme les qualifiait Atanasoff, avait une capacité de 32 mots de 50 bits, ce qui fait que la taille de la mémoire de l'A.B.C. était légèrement supérieure à $0,39 \text{ kilooctets } (((32 \times 50) \times 2) / 8) / 1024$.

dans les articles qu'il a consacrés il y a quelques années à la reconstruction de l'A.B.C.⁶⁶⁵, le mode opératoire des registres dynamiques du calculateur d'Atanasoff était finalement plus proche de celui de nos actuelles R.A.M. ou D.R.A.M. – il s'agissait ne l'oublions pas de dispositifs électroniques - que de celui des tambours électromagnétiques fabriqués à la fin des années quarante ou au milieu des années cinquante (certes, à l'instar de ces derniers, les *dynamic memory* de l'A.B.C. étaient entraînées mécaniquement). Si un lien de parenté doit être repéré ici, il tient donc plus à la figure géométrique et au procédé de mise en mouvement qu'avaient en partage ces deux sortes de mémoires qu'à la manière dont elles fonctionnaient effectivement. Il faut par conséquent se garder de faire des registres électroniques rotatifs de l'Atanasoff-Berry Computer les ancêtres des tambours magnétiques qui seront montés une demi-décennie plus tard sur les tout premiers ordinateurs.

Aux Etats-Unis, la mise au point des premiers dispositifs d'enregistrement électromagnétiques a commencé tout juste après la seconde guerre mondiale. En Grande-Bretagne, pays qui comme nous l'avons déjà mentionné souffrait d'une importante pénurie de matériaux électroniques et électromagnétiques de base au sortir du conflit, ce développement a tout de même été frappé d'un certain retard (de deux à trois ans par rapport à ce qui était réalisé aux Etats-Unis). L'idée consistant à stocker des informations codées en binaire comme on pouvait autrefois enregistrer à long terme la voix humaine ou des pièces musicales au moyen d'un appareil à bande magnétique semble être apparue plus ou moins simultanément en différents endroits. De ce fait même, il n'est pas toujours possible d'assigner une date ou d'associer le nom d'un inventeur à un système donné. En outre, ainsi que le fait remarquer Michael R. Williams, il n'était pas rare qu'un groupe conçoive une idée et qu'une autre équipe se charge par la suite de la développer⁶⁶⁶. Quoiqu'il en soit, la plupart des matériaux utilisés en Angleterre et aux U.S.A. durant la seconde moitié des années quarante pour élaborer les mémoires électromagnétiques des ordinateurs – nous songeons ici aux bobines filaires, aux bandes, aux tambours mais aussi aux matrices à tores - trouvent leur origine en Allemagne. On sait ainsi qu'en 1945, des équipes de consultants scientifiques alliées (au rang desquelles des savants américains et anglais) eurent l'occasion de « visiter » des laboratoires militaires allemands secrets situés en Allemagne, en France et au Luxembourg et qu'ils y firent des découvertes extrêmement intéressantes. Pour comprendre cela, rappelons brièvement que si le principe de l'enregistrement électromagnétique est une invention

⁶⁶⁵ Dr. J. Gustafson, « The Reconstruction of the Atanasoff-Berry Computer. », in [Rojas, Hashagen et al., 2000], pp. 91-106 et « An FPS Forerunner ; The Atanasoff-Berry Computer », 2000, document en ligne disponible à l'U.R.L. suivante : <http://www.scl.ameslab.gov>.

⁶⁶⁶ In [Williams, 1997], p. 316.

américano-danoise – l'ingénieur mécanicien américain Oberlin Smith le conçoit en 1878 et l'inventeur danois Valdemar Poulsen⁶⁶⁷ le redécouvre en 1898 – ce sont certainement les allemands qui réalisèrent en ce domaine les percées les plus remarquables. Ceci, évidemment, ne signifie pas qu'entre 1898 et 1945, les autres pays furent touchés par une sorte d'immobilisme technologique. En 1911 par exemple l'américain Lee de Forest, alors employé par la *Federal Telegraph Company*, fabriqua pour le récepteur radio *Tikker* un enregistreur de messages radiotélégraphiques rapides qu'il appela *Telegraphone*. Dix neuf ans après, les *Bell Telephone Laboratories* (U.S.A.), initièrent une vaste campagne de recherches sur les appareils d'enregistrement vocaux à fil et à bande magnétiques. Sous la direction du scientifique Clarence N. Hickman, plusieurs dispositifs de ce type – dont un répondeur téléphonique, un petit enregistreur portable à bobines, et un « annonceur » - purent ainsi être fabriqués. Une des plus belles réalisations des années trente, le *Blattnerphone*, est à mettre au crédit du fondateur de la *Blattner Picture Corporation*, le britannique Louis Blattner. Extrêmement répandu, cet appareil sera utilisé dans bon nombre de pays européens, dont l'Allemagne. On évoquera aussi les divers enregistreurs à bande que la *Marconi Stille Company*, une entreprise née du partenariat industriel de l'italien Marconi et de l'allemand Stille, produisit pour le compte de la *British Broadcasting Corporation* et qui furent par la suite massivement exportés dans des pays tels que le Canada, l'Australie, la France, l'Égypte, la Suède et la Pologne. Enfin nous citerons l'enregistreur à bobines de Marvin Camras (U.S. *Armour Research Foundation of the Armour Institute of Technology*), lequel fut vendu à de très nombreux exemplaires à l'*U.S. Army* et à l'*U.S. Navy* avant l'éclatement de la deuxième guerre mondiale. Comme on ne peut manquer de le constater, entre 1900 et 1939 le développement des dispositifs d'enregistrement électromagnétiques alla bon train en Angleterre et aux États-Unis mais en cette matière, ce sont surtout les inventeurs et les chercheurs allemands qui devaient tout particulièrement s'illustrer. Au début des années 1920, l'inventeur et entrepreneur Curt Stille modifia le *Telegraphone* de Lee de Forest en lui ajoutant un système d'amplification électronique. Cette version modernisée de l'invention du chercheur de la F.T.C. rencontra un vif succès puisque plusieurs firmes anglaises et allemandes l'adoptèrent très rapidement. En 1925, le même Stille, cette fois associé à Karl Bauer, un de ses distributeurs, conçut une sorte de répondeur/dictaphone à fil qu'il appela le *Dailygraph*. Fabriquée en Allemagne par la *Vox Company*, cette machine possédait ceci d'extrêmement intéressant qu'elle fut très sûrement la première à comporter un système de

⁶⁶⁷ La même année, Poulsen dépose une série de brevets au Danemark et aux États-Unis et fabrique un enregistreur électromagnétique à fil connu sous le nom de *Telegraphone*.

chargement du médium d'enregistrement par cartouche. En 1930, le géant de l'électricité *Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft* (A.E.G.) racheta les brevets que l'inventeur indépendant Fritz Pfleumer avait déposés deux ans auparavant afin de protéger un tout nouveau procédé d'enregistrement : en lieu et place d'un fil ou d'une bande de métal, il s'agissait ici d'employer comme support de l'information sonore une pièce de papier dont la surface était recouverte d'une fine couche de poudre d'acier magnétisable. Bien sûr, les principes physiques à l'œuvre dans ce cas précis étaient strictement les mêmes qu'auparavant, mais l'utilisation du papier, un matériau relativement souple et flexible, autorisait désormais l'utilisation de formes jusque là refusées. La même année, l'A.E.G. s'associa avec la firme industrielle *I. G. Farben* pour produire un appareil d'enregistrement à bande basé sur ce principe. Etant comme on le sait spécialisée dans le domaine de la chimie – ne devait-elle pas fournir aux tortionnaires SS les containers d'acide cyanhydrique employés une décennie plus tard dans les chambres à gaz ? - l'*I. G. Farben* fut chargée de développer la bande d'enregistrement⁶⁶⁸ de ce système tandis que l'A.E.G. se consacra à son design et à sa fabrication. Signe pour le moins funeste du tragique changement historique qui était alors en train de s'amorcer, Hitler, peu de temps après avoir été élu chancelier, ordonna que son gouvernement procède à des achats massifs de ce type d'appareils. Il n'est pas vraiment besoin de s'étendre ici sur les différents usages qu'il entendait en faire tant cela semble évident... Entre 1933 et 1939, de nouveaux systèmes, encore plus performants que les précédents, furent successivement développés en Allemagne. On mentionnera notamment le *Textophon*, un engin construit sous licence Stille par la compagnie *Echophon* (laquelle sera rachetée plus tard par l'*International Telephone and Telegraph Corporation.*), et un dispositif qu'on ne présente plus, le *Magnetophon*, qui fut introduit en 1935 par A.E.G. Notons que si le *Magnetophon* fit bel et bien l'objet d'une présentation au public en 1935 – il fut utilisé pour enregistrer un concert que l'orchestre philharmonique de Londres donnait cette année là à l'opéra de Berlin - il ne fut en revanche jamais exporté hors d'Allemagne.

Il ressort de tout ceci qu'avant la deuxième guerre mondiale, le savoir-faire que possédait l'Allemagne en matière de conception et de fabrication d'appareils d'enregistrement électromagnétiques était nettement supérieur à celui de tous les autres pays. De fait, lorsque les membres des équipes techniques américaines et britanniques eurent accès aux laboratoires militaires allemands après la défaite des troupes nazies, ce qu'ils découvrirent les surprit grandement. Parmi leurs nombreuses trouvailles, le magnétophone d'A.E.G. bien sûr (et sa

⁶⁶⁸ Cette bande était faite d'un long morceau de papier sur lequel avait été déposée une couche de poudre de fer carbonylée.

version portable, le *Tonschreiber*), mais aussi un certain nombre de matériaux magnétisables au rang desquels figurait en très bonne place le Permenorm 5000-Z, un alliage composé à 50% de fer et de nickel que la firme *Arnold Engineering* produisait alors sous le nom de Deltamax⁶⁶⁹. Pendant la guerre, on sait que la *Kriegsmarine* utilisa le Deltamax afin d'amplifier les signaux électriques des systèmes de contrôle des batteries de canons équipant ses bâtiments de combat. Comme cela devait être le cas avec les armes secrètes de la *Luftwaffe*, les américains se taillèrent ici encore la part du lion : la majeure partie des matériels et des informations confisqués à cette occasion fut envoyée sans délai à l'U.S. *Department of Commerce* ainsi qu'à divers services scientifiques de l'armée américaine – notamment ceux de l'U.S. *Navy* - tandis que les brevets allemands les concernant étaient saisis par l'U.S. *Alien Property Custodian*. Les américains furent donc les principaux bénéficiaires de la technologie allemande et les britanniques durent généralement se contenter de ce que leurs puissants alliés « consentirent » à leur laisser. A ce titre, nous ne résistons d'ailleurs pas à l'envie de mentionner ici une petite anecdote représentative que Michael R. Williams a relatée dans son *History of Computing* : un des scientifiques de la délégation officielle anglaise envoyée en Allemagne n'était autre qu'Andrew D. Booth. De son propre aveu, et à plusieurs reprises, celui-ci profita des visites organisées dans les installations allemandes pour dérober – le terme exact employé par M. R. Williams est en fait « *liberated* » - des objets tels que des bobines de fil et des bandes magnétiques afin de les exploiter plus tard dans son propre laboratoire⁶⁷⁰...

Dans les années d'immédiat après guerre, alors que les premiers ordinateurs venaient tout juste d'être mis en chantier dans les laboratoires des plus prestigieuses universités anglaises et américaines, les tambours magnétiques (mais aussi les dispositifs à bande), commencèrent à émerger et à s'imposer comme des dispositifs mémoire fiables, simples et bon marché. Pour les concevoir, les ingénieurs et techniciens américains ou britanniques s'appuyèrent principalement sur les travaux de recherches qui, avant et pendant la guerre, avaient été conduits en Allemagne et aux Etats-Unis dans le domaine des appareils d'enregistrement électromagnétiques vocaux. Le seul problème véritable avec ces instruments dont la capacité de stockage devait au demeurant se révéler très importante était la vitesse par trop insuffisante avec laquelle ils permettaient d'accéder à l'information lors de la réalisation des opérations de lecture et d'écriture. Etant des systèmes actionnés par des moyens

⁶⁶⁹ J. Ramunni, in [Ramunni, 1989], p. 115, indique que ce matériau était également connu en France sous le nom d'Hipernik.

⁶⁷⁰ In [Williams, 1997], p. 302.

électromécaniques, leur vitesse de fonctionnement ne pouvait bien entendu prétendre égaler celle des machines électroniques auxquels ils étaient pourtant destinés⁶⁷¹. De fait, hors la solution quelque peu « désespérée » qui fut très brièvement considérée au printemps 1948 à l'*Institute for Advanced Study* pour remplacer les tubes Selectrons devant constituer la mémoire de l'I.A.S.C., on ne songea jamais, ou presque⁶⁷², à utiliser uniquement un tambour électromagnétique pour fabriquer la mémoire principale d'un ordinateur *électronique*. Selon la machine et l'époque considérées, ces dispositifs devaient ainsi être systématiquement employés en complément et en renforcement des mémoires à lignes délai acoustiques, des mémoires à tubes Williams ou bien encore des matrices en tores de ferrite (toutes sortes de systèmes extrêmement rapides mais manquant cruellement de capacité de stockage). Dans ce qui suit, nous nous intéresserons à l'histoire des mémoires tambour ainsi qu'à celle des disques électromagnétiques puis nous procéderons à l'examen détaillé de leurs modes opératoires respectifs. Notre objectif, ici, consistera à déterminer quels étaient les qualités et les défauts propres de ces appareils en vue de comprendre pourquoi les instruments à disques (notamment sous la figure du disque dur) supplantèrent finalement les systèmes d'enregistrement de forme cylindrique. Après cela, nous étudierons les matrices à tores de ferrites et tenterons de démontrer en quoi ce nouveau type de mémoire électromagnétique inventé presque simultanément par plusieurs chercheurs à la fin des années quarante - Jay Forrester et William N. Papian du M.I.T., Jan Rajchman et Dudley Buch de la R.C.A., An Wang, collaborateur d'Howard Aiken à Harvard et Frederick Viehe, inspecteur au *Los Angeles Department of Public Works* - se démarquait si radicalement de tous les autres systèmes de stockage de l'information existant à l'époque qu'à partir des années 1952-53, son utilisation grandissante par les plus grands constructeurs d'ordinateurs conduisit à de profonds bouleversements dans le monde de l'informatique.

2.2.8.4.4. Tambours et disques magnétiques : quelques éléments historiques.

Entre 1946 et 1955, les membres de la petite équipe du britannique Andrew D. Booth et les scientifiques rattachés au projet « *Task 13* » de la firme américaine *Engineering*

⁶⁷¹ Pour un tambour tournant à 3600 tours par minute par exemple, le temps d'accès à un bit d'information pouvait quelquefois s'élever à 17 millisecondes alors qu'à l'époque la vitesse moyenne d'opération d'un ordinateur se chiffrait généralement en quelques microsecondes.

⁶⁷² D'après ce que nous savons, le C.R.C. 102A introduit en 1953 par la firme américaine *Computer Research Company* fut le seul ordinateur électronique à posséder une mémoire principale constituée d'un tambour magnétique.

Research Associates (E.R.A.) devaient s'imposer comme les figures principales de la recherche dans le domaine des tambours électromagnétiques⁶⁷³. S'il nous est permis ici de nous exprimer de la sorte, on pourra sans nul doute dire que le cas du Dr. Andrew D. Booth était un peu « spécial ». Par la force des choses, on l'a vu, le physicien et mathématicien du laboratoire de calcul du *Birkbeck College* fut en effet le seul chercheur à se lancer dans la construction d'un ordinateur à relais alors que de part et d'autre de l'Atlantique, tous ceux qui s'étaient engagés dans la voie ouverte en juin 1945 par Von Neumann avaient bien entendu opté pour l'emploi de composants électroniques (en cela, ils ne faisaient d'ailleurs rien de plus que suivre les prescriptions du « maître » et il est évident que si le scientifique anglais avait eu d'emblée la possibilité de faire de même, il n'aurait pas hésité l'ombre d'un instant). Il nous faut bien voir ce que la nature électromécanique de l'*Automatic Relay Computer* devait impliquer au regard de la réalisation de sa mémoire centrale. Les circuits de calcul et de contrôle de l'A.R.C. n'ayant pas été confectionnés à partir de tubes à vide mais de relais, c'est-à-dire d'éléments offrant des temps de commutation largement supérieurs à ceux qui pouvaient caractériser les tubes électroniques, rien ne s'opposait techniquement à ce qu'un dispositif de stockage électromagnétique soit utilisé pour constituer sa mémoire principale. Sans toutefois être équivalentes – les relais électromécaniques étaient tout de même plus rapides que les appareils d'enregistrement électromagnétiques – les vitesses d'opération respectives de ces deux types de systèmes participaient en effet du même ordre de grandeur. En raison de cette espèce « d'homogénéité technologique », de cette compatibilité dirait-on aujourd'hui, Booth put donc équiper l'*Automatic Relay Computer* d'une mémoire tambour électromagnétique sans prendre le risque de voir diminuer ses performances en deçà de ce qui pouvait être raisonnablement toléré (évidemment, procéder de la sorte avec un ordinateur électronique eut été chose parfaitement incohérente à moins bien sûr que l'on ne s'y trouve contraint et forcé par quelque événement extérieur).

Après s'être essayé à la mise au point de mémoires thermiques et mécaniques, lesquelles, même si elles fonctionnaient, étaient fort loin de représenter la panacée lorsqu'on envisageait de les utiliser régulièrement avec un ordinateur (fut-il électromécanique), A. D. Booth commença à s'intéresser à la construction de mémoires électromagnétiques. Dans les

⁶⁷³ Une deuxième société fondée par d'anciens employés de la *Northrop Aircraft Company*, la *Computer Research Corporation*, s'illustra également dans ce domaine. Avant d'acquérir une certaine renommée avec ses tambours, elle se fit tout d'abord connaître en commercialisant un ordinateur, le C.R.C. 102A, qui constituait en fait une version de série du C.A.D.A.C., une petite machine commandée par l'U.S. Air Force et qui fut livrée en 1951 au *Massachusetts Institute of Technology*.

premiers mois de l'année 1947, son attention devait principalement se porter sur le principe du tambour magnétique. En réfléchissant au fonctionnement de ces appareils, il parvint à la conclusion qu'ici, l'essentiel de la difficulté consistait en fait à recueillir un signal électrique fort – suffisamment fort pour être exploitable - sur leurs têtes de lecture/écriture (il existait en effet une telle tête pour chaque piste magnétisable que comportait le cylindre). Dans tous les cas s'aperçut-il, ces têtes devaient en permanence être maintenues à une distance infime de la surface magnétisée du cylindre support sachant tout de même qu'aux vitesses de rotation devant impérativement être atteintes pour que l'appareil fonctionne de manière appropriée (soit plusieurs milliers de tour par minute), le moindre écart par rapport à la normale pouvait avoir des conséquences réellement catastrophiques. Au mieux, les têtes n'auraient plus été en mesure de remplir leur fonction ; au pire, elles seraient tout bonnement venues racler la surface du tambour, endommageant ainsi son revêtement et détruisant par la même occasion tout ou partie des informations qui étaient susceptibles d'y être stockées. Ce résultat théorique conduisit Booth à développer un système d'enregistrement électromagnétique expérimental dont le mode de fonctionnement, on va le voir maintenant, n'est pas sans rappeler celui de nos actuels *floppy disk*. En lieu et place d'un cylindre fait de cuivre ou de laiton, l'idée consistait ici à utiliser un petit disque de papier dont les deux faces avaient été recouvertes d'une mince couche de matériau magnétique⁶⁷⁴. En disposant les deux pôles de la tête de lecture/écriture de l'appareil de part et d'autre de ce disque – à l'époque ces têtes étaient de minuscules électroaimants constitué d'un brin d'acier ou de nickel extrêmement fin auquel on donnait la forme d'un fer à cheval - Booth espérait que les flux magnétiques envoyés au système pourraient traverser le papier du disque et qu'un signal d'intensité suffisante pour autoriser à la fois l'écriture et la lecture d'informations serait ainsi obtenu. Pour voir son appareil fonctionner correctement – et surtout éviter l'écrasement de la tête de lecture/écriture sur le disque d'enregistrement - Booth tablait sur deux propriétés physiques : 1) Il supposait tout d'abord qu'en tournant rapidement sur lui-même (à 3000 tours par minute), le disque souple pourrait être gardé parfaitement plat grâce la puissante force centrifuge à laquelle il se trouvait mécaniquement soumis ; 2) Il pensait également que la mince couche d'air mobile produite par le mouvement rotatoire du disque serait suffisante pour garder la tête de lecture/écriture du système à distance régulière de ce dernier sans pour autant que cet écartement

⁶⁷⁴ Booth, profitant peut-être de son long séjour à Princeton, se procura ces pièces de papier magnétique auprès du fabricant américain *Brush Development Company*. A l'époque, cette entreprise produisait un enregistreur vocal à disques souples qu'elle commercialisait sous le nom de BK-503 *Mail-a-Voice* (ces disques, une fois enregistrés, pouvaient être insérés dans une enveloppe et adressés à leur destinataire par le service postal comme un vulgaire courrier, d'où la désignation de l'appareil). C'est à partir du matériau qui était utilisé pour fabriquer les disques du *Mail-a-Voice* que Booth façonna ceux de son *floppy disk*.

« pneumatique » empêche en quelque façon l'inscription ou la récupération de données. Cette tentative, malheureusement, se solda par un échec cuisant. Les disques que Booth devait utiliser dans le cadre de cette expérience présentaient en effet tous des défauts structurels plus ou moins importants mais pas nécessairement visibles. Dès lors, quand ils furent tour à tour installés sur le système et placés en mouvement, un phénomène de « papillonnement » incontrôlable se produisit et tous furent réduits en charpie lorsque qu'ils entrèrent en contact avec sa tête de lecture/écriture.

Il est extrêmement important de bien voir ici que la déconvenue expérimentale de Booth doit essentiellement être mise au compte de la médiocre qualité des matériaux dont il disposait en 1947. Quant à son idée de départ, elle, elle était remarquable. De fait, c'est vers cet ingénieux principe que le chercheur américain David L. Noble se tourna à la fin des années soixante quand il fut question de développer un dispositif de stockage auxiliaire et amovible pour enregistrer le programme de contrôle et les micro-instructions du nouvel ordinateur à transistors d'I.B.M., le *System/370*. Si la création du premier *floppy disk* - une disquette flexible de 20,3 centimètres de diamètre - fut officiellement annoncée en 1971 par la toute-puissante firme américaine⁶⁷⁵, son invention, elle, en revient incontestablement à ce scientifique brillant – mais isolé et sans grands moyens financiers – qu'était Andrew D. Booth.

Suite à cette expérience malheureuse, le chercheur britannique revint au principe du tambour électromagnétique. Avec l'aide de son père, il produisit un premier prototype dans les derniers mois de l'année 1947 : il s'agissait d'un cylindre de cuivre de 5,08 centimètres de diamètre et d'une vingtaine de centimètres de long dont la surface avait été recouverte d'une mince couche de nickel. En partant de cette base, les deux hommes purent ensuite développer une mémoire tambour. De ce dispositif on ne sait en fait que très peu de choses si ce n'est qu'il fut opérationnel le 1^{er} janvier 1948, que sa capacité était d'une cinquantaine de nombres binaires⁶⁷⁶ et qu'il fut installé sur l'*Automatic Relay Computer* en mai de la même année. Les résultats expérimentaux qu'ils obtinrent alors avec cette mémoire étaient à ce point encourageants qu'ils décidèrent de poursuivre son développement. En 1952, forts de leurs réussites successives, ils se lancèrent dans la construction de tambours électromagnétiques pour d'autres fabricants anglais d'ordinateurs (notamment la *Ferranti Ltd.*). Preuve incontestable de leur excellence technologique, nombre de ces instruments furent exportés

⁶⁷⁵ Notons que le principe de la couche d'air séparatrice est aujourd'hui encore utilisé sur nos disques durs multiplateaux.

⁶⁷⁶ L'A.R.C. ayant été conçu à partir des plans de l'ordinateur de l'I.A.S., on peut raisonnablement supposer que la longueur de ses mots binaires était identique à celle de la machine de Von Neumann, c'est-à-dire 40 bits. Dans ce cas, mais ce n'est là rien de plus qu'une hypothèse de travail, la capacité de stockage du tambour électromagnétique de cet ordinateur à relais aurait approximativement été de deux milliers de bits.

vers les Etats-Unis où certains d'entre eux restèrent en service sans connaître de réels problèmes de fiabilité pendant plus d'une dizaine d'années.

Outre-atlantique, c'est la firme *Engineering Research Associates* qui devait s'imposer comme le principal leader dans le domaine de la fabrication des mémoires tambour après la guerre. Il n'est peut-être pas superflu ici de rappeler que l'*Engineering Research Associates* naquit en fait d'une organisation mi-civile mi-militaire - la *Communications Supplementary Activity - Washington*, ou C.S.A.W. - que l'U.S. Navy avait formée pendant la deuxième guerre mondiale pour réaliser des travaux de cryptanalyse. Après la fin du conflit, deux des membres du C.S.A.W., Howard Engstrom et William Norris décidèrent de fonder une compagnie privée afin d'éviter que les talents qu'avait réussi à réunir la Navy en temps de guerre ne « s'éparpillent ». Du fait de ses origines militaires, et jusqu'à son rachat en 1952 par la *Rand Corporation*⁶⁷⁷, l'E.R.A., même si elle restait officiellement une entreprise civile, ne cessa de travailler en très étroite collaboration avec la marine américaine. Ainsi, la plupart des contrats que l'U.S. Navy, son principal client, lui confia, concernait des projets à haut niveau de confidentialité (nombre d'entre eux étant d'ailleurs liés au secteur de la cryptanalyse). Au mois d'août 1947, une équipe de développement de l'E.R.A., se vit assigner la tâche de construire un ordinateur pour les forces navales américaines (projet connu sous le nom de code « *Task 13* »). Cette machine fut terminée au début des années cinquante et inaugura la série des ordinateurs ATLAS⁶⁷⁸. Elle fut tout d'abord commercialisée sous le nom de E.R.A. 1101 (13 en notation binaire) puis, après que la *Rand* ait racheté l'*Engineering Research Associates*, sous celui d'U.N.I.V.A.C. 1100. Quoiqu'il en soit, leur travail pour la Navy permit aux ingénieurs et aux techniciens de l'E.R.A. d'acquérir une très grande expérience dans le domaine de la construction des ordinateurs. En outre les liens extrêmement privilégiés qu'entretenait cette firme avec l'armée les autorisèrent à accéder à des informations et à des matériaux - ceux qui avaient été confisqués aux allemands en 1945 - auxquels les autres groupes ne pouvaient pas forcément prétendre. A eux deux, et concernant tout particulièrement les instruments d'enregistrement des données informatiques, ces facteurs expliquent en très grande partie les progrès réellement étonnants que se trouvèrent en mesure de réaliser les chercheurs de l'E.R.A. entre la fin de la deuxième guerre mondiale et 1950. Dès 1947, ces derniers étaient en effet parvenus à augmenter considérablement la vitesse de

⁶⁷⁷ La même année, la *Rand Corporation* acquit également l'Eckert - Mauchly *Computer Corporation*, laquelle était en proie à de très graves difficultés financières. Avec l'E.R.A. cette société devait former la base de la division U.N.I.V.A.C. de la future *Sperry Rand*.

⁶⁷⁸ La série d'ordinateurs américains ATLAS ne doit pas être confondue avec l'ATLAS, une machine dont la fabrication démarra en 1956 à l'Université de Manchester. Construit en partenariat avec l'industriel britannique *Ferranti Ltd.*, cet ordinateur était similaire à l'I.B.M. *Stretch* (ou I.B.M. 7030) et au L.A.R.C. de Sperry Rand.

rotation des tambours ainsi que leur densité de stockage. Dans les deux années qui suivirent, ils fabriquèrent différents prototypes dont le plus petit et le plus grand avaient un diamètre respectif de 11 et 86,36 centimètres. La capacité de stockage de ce dernier modèle – au demeurant fort impressionnant – était de 65000 mots de 30 bits (soit presque deux millions de bits) et ses temps d'accès moyens de 64 millisecondes (contre 8 millisecondes pour le plus petit). L'E.R.A. devait tout d'abord employer de tels tambours pour équiper son ordinateur 1101 puis, face à une demande qui se faisait de plus en plus croissante – pour ne pas dire pressante – elle finit par proposer ses produits à d'autres constructeurs d'ordinateurs (comme nous l'avons dit, et pour ne donner que ce seul exemple, c'est un tambour magnétique E.R.A. qui fut monté sur l'I.A.S.C. en 1955). En dépit de leurs défauts – à commencer bien sûr par celui que représentait la lenteur de leur fonctionnement par rapport à la vitesse d'opération des ordinateurs sur lesquels ils se trouvaient montés – les tambours électromagnétiques ont été très largement employés dans le secteur informatique jusque dans les soixante, voire même parfois un peu plus tard. Tout d'abord directement couplés à des mémoires principales constituées de lignes délai acoustiques ou bien de tubes électrostatiques Williams, ils furent ensuite utilisés comme systèmes de stockage auxiliaires avant de se voir progressivement remplacés par des unités à disques magnétiques superposés à partir de 1957-58. Cette date devait en effet marquer l'introduction sur le marché informatique du tout premier ordinateur pourvu d'un disque dur, l'I.B.M. *Random Access Method of Accounting and Control*⁶⁷⁹, un appareil sans doute beaucoup mieux connu sous le nom d'I.B.M. 305 R.A.M.A.C. Son dispositif de stockage révolutionnaire – à tel point d'ailleurs que Thomas Watson Jr. n'hésita pas à affirmer du jour où il fut officiellement présenté qu'il était le « *the greatest product day in the history of IBM*⁶⁸⁰ » – était composé de cinquante disques d'aluminium de 61 centimètres de diamètre tournant chacun à la vitesse de 1200 tours par minute. Quant à sa capacité d'enregistrement, elle était de cinq millions de caractères alphanumériques. Nous allons à présent étudier le fonctionnement des mémoires tambour, en exposer les avantages et les limitations, puis nous démontrerons pourquoi les systèmes dont la lignée fut inaugurée par le R.A.M.A.C. leur étaient supérieurs.

⁶⁷⁹ En 1956, le prototype du disque dur qui devait équiper le R.A.M.A.C. fut baptisé *Model 350 Disk Storage Unit*. Notons qu'il n'est pas rare que les historiens de l'informatique interprètent l'acronyme R.A.M.A.C. comme suit : *Random Access Memory Accounting Machine* (au lieu de *Random Access Method of Accounting and Control*).

⁶⁸⁰ In [Ceruzzi, 1998], p 70.

2.2.8.4.5. *Modus operandi*, atouts et inconvénients des tambours magnétiques.

Dans un petit ouvrage remarquable qu'ils ont consacré aux ordinateurs⁶⁸¹ en 1958, l'informaticien Pierre Demarne et le polytechnicien Max Rouquerol ont étudié et expliqué le principe de fonctionnement des grands types de mémoires magnétiques successivement construits dans le monde jusqu'à cette date (évidemment ni les mémoires à transistors, ni les mémoires à circuits intégrés n'y sont traitées). En vue de rendre compte de celui des mémoires tambours, ils ont proposé une approche explicative que l'on pourrait sans doute qualifier de macroscopique (dans un premier temps, il est question de « barreaux » d'acier, non de particules de matière ferromagnétique). Ainsi écrivent-ils :

« 1° Un barreau d'acier placé dans l'entrefer d'un électro-aimant dont la bobine est parcourue par un courant, s'aimante d'une manière permanente, c'est-à-dire subsistant après la coupure du courant d'alimentation. Si le barreau a une extrémité peinte, ce qui permet de le repérer, et si celle-ci est toujours placée dans la même position par rapport à l'électro-aimant, la présence d'un pôle nord ou d'un pôle sud à cette extrémité résulte du sens du courant. 2° Un barreau aimanté, déplacé dans l'entrefer d'un électroaimant dont la bobine est connectée à un galvanomètre, crée un courant dont le sens est lié au sens de l'aimantation du barreau. Si l'extrémité peinte est toujours amenée la première dans l'entrefer une déviation à gauche indique, par exemple, toujours un pôle nord à cette extrémité et à droite un pôle sud. 3° Envisageons la série d'expériences suivantes : Dans l'entrefer d'un premier électro-aimant connecté à une source de courant par l'intermédiaire d'un inverseur, l'expérimentateur place un barreau d'acier, l'extrémité peinte à gauche ; il choisit une position de l'inverseur, par exemple la position 0, le barreau s'aimante. Dans l'entrefer du deuxième électro-aimant connecté au galvanomètre, l'expérimentateur déplace le même barreau, l'extrémité peinte la première, il constate que l'aiguille [du galvanomètre] dévie à gauche ; il désigne cette position par position zéro. Si l'inverseur avait été en position 1, l'aiguille aurait dévié à droite et la position correspondante aurait été notée 1.⁶⁸² ».

⁶⁸¹ Pierre Demarne et Max Rouquerol., *Les Ordinateurs*, 9^{ème} Ed., coll. « Que sais-je ? », n°832, Paris, P.U.F., 1985 (1^{ère} édition en 1958).

⁶⁸² In [Demarne et Rouquerol, 1985], pp. 26, 27 et 28.

On voit donc qu'en se dotant d'une installation expérimentale aussi rudimentaire que celle qui vient d'être décrite – une source de courant, un premier électro-aimant relié à cette source ainsi qu'à un inverseur bipositionnel, un second électro-aimant connecté à un galvanomètre et un barreau d'acier muni d'un petit repère visuel – il est parfaitement possible d'enregistrer – d'écrire – puis de récupérer – de lire – une information (en fait un bit d'information). En fonction de l'état actuel de l'inverseur, lequel sert à déterminer le sens du courant employé pour magnétiser le barreau de fer, celui-ci, dont il est essentiel qu'il soit *toujours* présenté dans la même position dans l'entrefer des deux électro-aimants que comprend le dispositif, sera aimanté d'une certaine façon (sur deux possibles). Si, au moment où l'on procède à son aimantation, l'inverseur de courant est placé en position « 0 », alors ce même barreau, lorsqu'il se trouvera ensuite installé dans l'entrefer du second électro-aimant, induira un courant électrique de sens correspondant dans la bobine de ce dernier, ce qui amènera l'aiguille du galvanomètre à pointer en direction du symbole « 0 » inscrit sur son cadran de lecture. Inversement, si lors de la phase d'aimantation (d'écriture), l'inverseur de courant était en position « 1 », alors c'est un « 1 » qui pourra être lu par l'expérimentateur sur l'indicateur visuel du galvanomètre. Etant donné qu'en l'état il ne permet d'enregistrer qu'un seul bit d'information (1 ou 0 selon la position initiale de l'inverseur de courant), on conviendra sans nul doute qu'un tel système n'a que très peu d'utilité sur le plan pratique. Maintenant, et sans que l'on ait à y apporter une quelconque forme de modification, il est quand même possible d'accroître sa capacité de stockage de manière très importante. Si, au lieu d'une seule barre métallique, on emploie désormais une série de barreau identiques que l'on dote individuellement d'un marquage numérique (par exemple 8 unités numérotées dans l'ordre croissant), on se trouvera déjà en mesure de stocker un octet (soit huit bits, c'est-à-dire un bit par barreau). Pour illustrer cela, on peut par exemple imaginer la petite expérience suivante. En code A.S.C.I.I., la valeur numérique décimale conventionnellement utilisée pour représenter le symbole alphanumérique « A » est 065 (#41 en notation hexadécimale). Transcrite en notation binaire, cette valeur correspond au nombre 1000001. Puisque l'on a décidé - arbitrairement - de travailler ici sur un octet, on conviendra de la noter 01000001 (on rajoute simplement un « 0 » devant le bit de poids fort de la série binaire pour obtenir 8 bits au lieu de sept sachant que cette adjonction n'a strictement aucune incidence sur la valeur représentée). A partir de ce point, comment l'expérimentateur pourra-t-il enregistrer, puis lire, cet octet (c'est-à-dire finalement le « A » qu'il souhaite stocker et récupérer) ? Les deux procédures qu'il devra suivre ici alternativement peuvent en fait être décrites de façon algorithmique. Pour la phase d'écriture : 1°) prendre le premier barreau de la série « vierge »

(celui portant le numéro n); 2°) lire le premier bit de l'octet à enregistrer en commençant par celui qui est positionné le plus à gauche de la série ; 3°) placer l'inverseur de courant sur la position correspondant à la valeur de ce bit (« 1 » ou « 0 » selon le cas) ; 4°) présenter le barreau prélevé dans l'entrefer du premier électro-aimant du dispositif en veillant scrupuleusement à ce que son extrémité peinte soit la première à être introduite ; 5°) procéder à sa magnétisation ; 6°) récupérer ce barreau aimanté et le placer dans un endroit différent de celui où il a été extrait – une boîte par exemple - en faisant extrêmement attention à ce que l'ordre de dépose soit exactement le même que celui de prélèvement (le barreau portant le numéro $n+1$ ne devant *jamais* se situer avant le barreau portant le numéro n) ; 7°) réitérer cette procédure (avec le barreau de numéro $n+1$) jusqu'à épuisement de la série de barreaux. A présent, pour la phase de lecture : 1°) dans la boîte, prendre le barreau situé le plus à gauche de la série (barreau de numéro n); 2°) le placer dans l'entrefer du second électro-aimant du système en veillant à ce que son extrémité peinte soit la première à être introduite; 3°) sur le cadran du galvanomètre, lire la valeur indiquée par la position de l'aiguille (« 1 » ou « 0 » selon le cas), puis la reporter sur une feuille de papier ; 4°) récupérer ce barreau et, le cas échéant, le replacer très exactement à l'endroit où on l'a pris si l'on envisage de le réutiliser encore par la suite ; 5°) recommencer la procédure (avec le barreau de numéro $n+1$) jusqu'à épuisement du stock de barreaux et donc « recomposition » de l'octet stocké ; 6°) éventuellement traduire en base décimale la valeur binaire ainsi récupérée puis consulter la table du code international A.S.C.I.I. pour voir quel caractère alphanumérique elle permet de représenter. Au passage, et puisque l'aimantation des barreaux métalliques est subsistante, on remarquera qu'il n'est pas nécessaire que les phases de lecture et d'écriture soient effectuées immédiatement l'une à la suite de l'autre. Ainsi entre le moment où l'octet est stocké et celui où il est lu, il peut tout à fait s'écouler un laps de temps assez important. Evidemment cette manière de faire, même si elle « marche » – on pourrait parfaitement imaginer enregistrer chacun des caractères alphanumériques contenus dans *La critique de la raison pure* en procédant de la sorte – est extrêmement incommode. Fort coûteuse en temps, elle nécessiterait de la part des opérateurs du système une attention de tous les instants (notamment pour ne pas déranger les ordres de présentation et de rangement des barreaux), et exigerait en outre des entrepôts immenses afin de stocker séparément les quantités colossales de barreaux vierges et aimantés devant être utilisées. Heureusement, il est encore possible de procéder autrement. Comme le précisent Demarne et Rouquerol :

« Si les différents barreaux de la série sont disposés le long d'un cylindre en rotation et viennent successivement se placer dans l'entrefer d'un électro-aimant d'aimantation ou tête d'écriture et dans l'entrefer de l'électro-aimant d'observation, ou tête de lecture [en pratique les deux dispositifs sont confondus] en synchronisant l'alimentation en courant de la tête d'écriture avec la rotation du cylindre, il est possible de provoquer l'aimantation au moment où les barreaux se placent correctement dans l'entrefer. La manœuvre de l'inverseur, c'est-à-dire le choix du sens du courant, étant fait avec la manœuvre de l'interrupteur d'alimentation. Si le cylindre comporte 20 barreaux, la manœuvre doit être répétée pour chacun d'entre eux, soit 20 fois au total. L'opération de lecture peut être faite ultérieurement, elle nécessite le même synchronisme entre le passage du barreau dans l'entrefer et la connexion du galvanomètre. En outre, pour que la lecture ait un sens, il est évident qu'elle doit commencer par le premier barreau de la série et s'arrêter avec le dernier⁶⁸³ ».

La capacité de la mémoire expérimentale décrite par ces deux auteurs pour les besoins de leur démonstration, on le voit, est extrêmement faible. Avec vingt barreaux disposés sur le pourtour du cylindre, on ne peut en effet prétendre enregistrer que vingt bits d'information (soit 2,5 octets au total, c'est-à-dire deux caractères alphanumériques avec 4 bits restant inusités). L'objectif premier consistant ici à *comprendre* le mode opératoire de ce genre d'appareil on peut parfaitement, en lieu et place de procéder à l'étude d'un dispositif réel – donc d'un système relativement complexe – se satisfaire d'en considérer une instance exagérément simplifiée sachant par ailleurs que quelle que soit la capacité de stockage du système qui sera effectivement envisagé, la façon dont il opère fondamentalement demeurera inchangée. Dans ces circonstances, il est donc préférable d'opter pour une approche qui procède graduellement du simple vers le complexe. Comme nous le disions, la capacité d'enregistrement du cylindre présenté ici est de 20 bits. Reste maintenant à savoir comment distribuer ces 20 bits – ces 20 barreaux – sur la surface du volume cylindrique et comment les « utiliser » ensuite. La solution proposée par Demarne et le Rouquerol consiste à fractionner ces vingt barreaux en quatre séries de cinq unités. Avec de tels quintuplés, il sera donc possible d'enregistrer quatre nombres de cinq chiffres binaires. Chacun d'entre eux permettra ainsi de représenter une quantité dont la valeur sera comprise dans un intervalle numérique allant de 00000 (0 en notation décimale) à 11111 (31 en notation décimale). La manière dont on se trouvera ensuite en mesure de disposer ces quatre groupes de cinq barreaux sur le

⁶⁸³ In [Demarne et Rouquerol, 1985], p. 30.

pourtour du cylindre sera fonction à la fois de son diamètre et de sa longueur. Si sa longueur est importante mais que son diamètre est faible (il est toutefois nécessaire qu'il soit suffisant pour autoriser au moins la fixation de cinq barreaux les uns en dessous des autres), alors on créera quatre pistes⁶⁸⁴ parallèles d'enregistrement sur la mémoire tambour. Il faudra donc l'équiper par la suite de quatre têtes de lecture/écriture indépendantes, soit une spécifiquement dédiée à chaque piste (utiliser ici un équipage monotête mobile monté sur un rail directeur conduirait en effet à accroître considérablement les temps d'accès au système, ce qui n'est pas souhaitable). Il se peut également que l'on choisisse de recourir à un cylindre plus court mais de diamètre augmenté. Dans ce cas – mais c'est seulement une possibilité combinatoire parmi d'autres également envisageables - on pourra placer deux séries de cinq barreaux l'une en dessous de l'autre, répéter l'opération une fois encore en se décalant de quelques centimètres vers l'extrémité droite du cylindre, et n'employer alors que deux têtes de lecture/écriture indépendantes. Les procédures d'écriture et de lecture que nous avons exposées plus haut sont bien entendu entièrement automatisables. On supposera donc désormais que la mémoire tambour est contrôlée par un ordinateur⁶⁸⁵. La question qui se pose à présent consiste à savoir comment la machine pilotant ce dispositif pourra accéder à tel ou tel ensemble individuel de barreaux sans risquer de modifier ou de lire accidentellement un autre bloc ? On peut encore exprimer cette interrogation autrement: étant bien entendu que ces différentes actions doivent se dérouler à très grande vitesse, comment l'ordinateur « saura-t-il » très exactement où commencer et où arrêter les processus de lecture et d'écriture dont il a la charge ? Toute forme d'imprécision, par exemple par débordement ou par interruption prématurée d'opération ne saurait en effet être tolérée ici sous peine de voir les informations manipulées par l'ordinateur corrompues plus ou moins gravement. Afin de préserver leur intégrité il est impératif que chacune des manœuvres réalisées par la machine sur une série de barreau donnée soit absolument indépendante de toutes les autres. Elle devra donc être capable de différencier avec une extrême précision entre tous les blocs de données auxquels elle peut avoir accès. Pour ce faire, on associera à la mémoire tambour un appareil de contrôle dont la fonction consiste à compter les barreaux à partir d'une position prédéterminée et invariable (une sorte de « ligne de départ et d'arrivée » représentée par le premier barreau de la première série de chaque piste). Si l'ordinateur, à un moment donné, doit inscrire une valeur

⁶⁸⁴ Le terme « piste » est employé ici pour désigner l'ensemble des séries de barreaux qui défilent sous une seule et même tête de lecture/écriture.

⁶⁸⁵ La manœuvre des interrupteurs et des inverseurs de courant est désormais automatisée et son contrôle confié à l'ordinateur. De même, puisque le tambour tourne sur lui-même à la vitesse de plusieurs milliers de tours par minute, la lecture du galvanomètre ne peut plus être réalisée par un opérateur humain ; un système effectuant automatiquement cette tâche doit donc lui être substitué.

quelconque, disons 11110, dans le deuxième bloc de la deuxième piste du cylindre, il enverra l'instruction et les données codées correspondant à cet ordre d'écriture au contrôleur de la mémoire lequel comptera alors les barreaux présents sur la deuxième piste à partir du point de départ. Après le passage du cinquième barreau de la première série, l'écriture sera autorisée – cinq barreaux seront successivement magnétisés – tandis qu'après le passage du dixième barreau de la seconde série, elle sera interdite. Cette manière particulière de procéder est appelée un « adressage ». Etant d'une extrême simplicité, notre dispositif ne nécessitera en fait la définition que de quatre adresses différentes. Chacune d'entre elles exigera que l'on spécifie: 1°) l'indice de la tête de lecture/écriture devant être activée (*e.g.* « tête numéro 1 » ou « tête numéro 2 »); 2°) l'indice de la série de barreaux intéressée parmi toutes celles qui peuvent défiler sous la tête de lecture désignée (*e.g.* « série numéro 1 » ou « série numéro 2 »). Un dispositif un peu plus perfectionné pourrait également permettre d'adresser les 20 bits de la mémoire individuellement. Ici, il faudrait spécifier 20 adresses différentes, chacune comprenant le numéro de la tête de lecture/écriture concernée, le numéro de la série de barreaux où se trouve le barreau auquel on souhaite accéder, et enfin le numéro du rang qu'occupe ce barreau dans cette série.

En pratique bien sûr une telle mémoire n'aurait quasiment aucun intérêt : sa taille serait en effet bien trop limitée pour que l'on puisse raisonnablement envisager de s'en servir, surtout avec un ordinateur. Pour que ce soit le cas, il faudrait en fait que le nombre de barreaux fixés sur le pourtour du cylindre mémoire soit très important (n'oublions pas que sur les premiers ordinateurs les mémoires tambour étaient systématiquement associées à des mémoires acoustiques ou électrostatiques lesquelles, si elles étaient extrêmement rapides, manquaient en revanche cruellement de capacité. C'est précisément ce défaut qu'étaient censées compenser les mémoires tambour, certes plus lentes, mais de capacité nettement plus importante que les précédentes). Or il existe ici certaines contraintes spatiales et certaines servitudes mécaniques – notamment celles liées à la taille minimum que l'on peut donner aux barreaux, au volume et à la masse maxima que peut atteindre le cylindre ainsi qu'à la limitation de la vitesse de rotation de ce dernier en raison des effets de la force centrifuge – qui représentent autant d'obstacles empêchant de fait la fabrication d'un système de ce genre. Toutefois, comme le rappellent Demarne et Rouquerol, « *chaque grain de la matière constitutive des barreaux se comporte lui-même comme un barreau*⁶⁸⁶ », de sorte qu'en fixant une couche parfaitement régulière de cette matière pulvérisée sur la surface du cylindre on

⁶⁸⁶ In [Demarne et Rouquerol, 1985], p. 32.

obtient exactement le même dispositif que celui précédemment décrit. D'une certaine manière, on peut sans nul doute dire que les barreaux d'enregistrement n'ont pas complètement disparu ici: ils sont tout simplement devenus « plats » et minuscules. Evidemment, pour un cylindre de volume donné, la réalisation de cette économie spatiale se traduit par un accroissement considérable de sa capacité d'enregistrement. Quoiqu'il en soit il faut bien voir que dans l'un et l'autre cas, le principe d'opération du système reste rigoureusement identique.

La figure 24, ci-dessous, représente un tambour magnétique. Par simple souci de lisibilité, nous avons volontairement restreint son nombre de pistes et de têtes de lecture/écriture à quatorze. Précisons cependant que sur les systèmes réellement construits à partir de la fin des années quarante, ces quantités – en fait cette quantité puisqu'il y avait autant de têtes que de pistes – étaient de loin supérieures à cela. Quelques remarques s'imposent. Tout d'abord ce que nous avons tour à tour nommé « tambour magnétique », « mémoire tambour » ou « cylindre mémoire » était en fait constitué par l'ensemble de pièces suivant, à savoir l'axe de rotation du cylindre, le cylindre lui-même et ses têtes de lecture/écriture. On notera ensuite que la largeur de la piste d'enregistrement ou, ce qui revient au même, de la zone élémentaire magnétisable sur le cylindre, dépendait directement de celle des têtes de lecture/écriture employées. Au final, la capacité de stockage d'un tambour magnétique était donc déterminée: 1°) par la largeur de chaque piste d'enregistrement et la longueur de son cylindre, c'est-à-dire par le nombre de pistes parallèles que ce dernier pouvait comporter; 2°) par la circonférence de ce cylindre et le nombre de bits qu'il était possible d'enregistrer sur chaque piste.

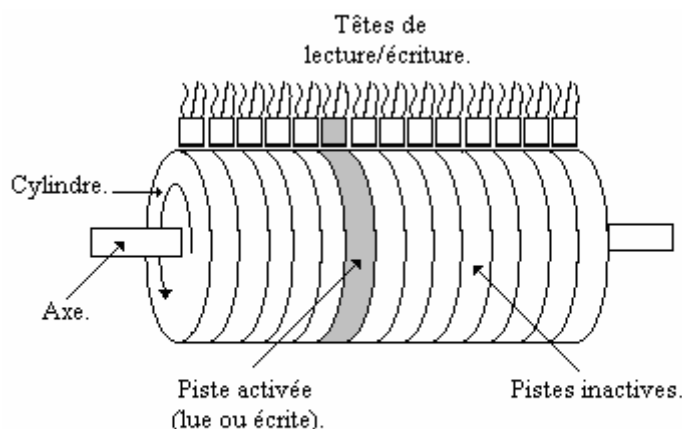


Fig. 24: représentation schématique d'une mémoire tambour électromagnétique.

En droit, et nonobstant l'encombrement qui aurait inévitablement résulté de la construction de pareils systèmes, on peut peut-être penser qu'en jouant simultanément sur ces deux paramètres dimensionnels, il était possible de fabriquer des mémoires tambours de capacité proprement gigantesque (les cylindres utilisés devant alors être très longs et de fort diamètre). En fait, et même s'il n'était pas rare que les tambours magnétiques élaborés durant les années cinquante atteignent plusieurs dizaines de milliers de bits de capacité, voire plusieurs millions pour les plus performants, leurs constructeurs étaient bien loin de tout pouvoir se permettre. Par nature ces mémoires souffraient en effet d'une énorme limitation à savoir une opposition entre leur capacité de stockage et leur temps d'accès. La capacité d'enregistrement d'un tambour magnétique étant proportionnelle à la surface de son cylindre (donc au diamètre et à la longueur de celui-ci), plus il était volumineux – et lourd – plus il était nécessaire de diminuer sa vitesse de rotation afin de prévenir les effets de la force centrifuge et de limiter l'inertie du système. Dans le cas contraire, celui d'un tambour plus petit et de moindre capacité, des vitesses de rotation plus importantes pouvaient par conséquent être atteintes (au détriment bien sûr de la densité d'information enregistrable). On peut encore exprimer ce rapport de co-variation inverse en disant que plus grande était la capacité de stockage de la mémoire, plus long était son temps d'accès (et réciproquement). Compte tenu du fait qu'à l'origine ces dispositifs devaient être couplés aux systèmes ultrarapides constituant la mémoire centrale des ordinateurs (à l'exception de l'*Automatic Relay Computer*, du C.R.C. 102A de la *Computer Research Company* et de l'*U.N.I.V.A.C. File Computer* de la *Sperry Rand Corp.*), c'est bien entendu le facteur vitesse qui devait se voir ici systématiquement privilégié pour le motif évident qu'installer un tambour magnétique de trop grande capacité sur une machine électronique aurait nécessairement conduit à en diminuer énormément les performances. A quoi bon alors disposer d'une machine universelle capable de traiter de l'information aux extraordinaires vitesses permises par l'électronique si ce bénéfice précieux devait se voir systématiquement dilapidé lors des accès répétés à sa mémoire ? Concernant les limitations inhérentes aux tambours magnétiques, une deuxième chose se doit d'être signalée. Quant l'ordinateur envoyait une instruction de lecture ou d'écriture au contrôleur du tambour, une tête et une piste d'enregistrement, sur n possibles, étaient spécifiquement sélectionnées. Cette opération de sélection était donc réalisée sur le mode digital. Maintenant, une fois la « bonne » tête de lecture/écriture activée, il fallait encore trouver, sur la piste correspondante, l'emplacement spécifique sur lequel on souhaitait lire ou écrire des données. Statistiquement, les chances pour que cet emplacement précis se trouve exactement sous la tête intéressée au moment propice étaient bien entendu minimales. Une

assez bonne estimation du temps *moyen* qu'il était nécessaire d'attendre avant que cela ne se produise peut en fait être calculée au moyen de la formule mathématique suivante : $\frac{1}{2} \times \frac{1}{tps}$, où *tps* est une variable représentant la vitesse de rotation, exprimée en nombre de tours par seconde, à laquelle le cylindre d'une mémoire tambour donnée tournait⁶⁸⁷. Quelles qu'aient pu être par ailleurs la capacité de stockage et la vitesse de rotation du cylindre considéré, il ressort clairement de tout cela que l'accès à une zone particulière de la piste parallèle choisie se faisait sur le mode sériel. Autrement dit, il fallait en général attendre que tout ou partie des emplacements non pertinents de cette piste défilent sous la tête de lecture/écriture avant de se trouver effectivement en mesure d'accéder à celui qui l'était à l'instant *t*, exactement comme c'était le cas avec les lignes délai acoustiques ou les dispositifs à bandes.

Malgré ces deux défauts majeurs, lesquels pouvaient tout de même être contenus dans des limites acceptables en ajustant adéquatement le volume et la vitesse de rotation de leur cylindre, les tambours magnétiques furent massivement employés par les constructeurs d'ordinateurs jusque dans les années soixante. Dans un premier temps, au moins jusqu'à la fin de 1954⁶⁸⁸, ils devaient essentiellement être utilisés en renforcement des mémoires principales à lignes délai acoustique ou à tubes électrostatiques de type Williams⁶⁸⁹. Mais avec l'apparition et la progressive montée en puissance des matrices à tores de ferrite puis des transistors, composants miniatures qui permettaient de fabriquer à « moindres » frais des mémoires centrales offrant accès aléatoire à l'information, encombrement réduit, grande capacité de stockage et extrême rapidité, le rôle et la place qu'ils occupaient au sein de l'architecture de l'ordinateur commença à évoluer. Puisqu'il n'était désormais plus besoin de renforcer la capacité de la mémoire centrale des ordinateurs, les tambours magnétiques se virent peu à peu « déplacés » vers leur périphérie pour servir, au même titre que les dispositifs à bandes magnétiques et, dans une moindre mesure, les lecteurs/perforateurs de cartes, de mémoire de masse (en entrée ou en sortie de la machine). Inutile de préciser que les très rares ordinateurs dont la mémoire centrale était seulement constituée par un tambour magnétique

⁶⁸⁷ Par exemple pour une mémoire tambour tournant à 3000 tours par minute, soit 50 tours par seconde, le temps d'accès moyen était de $\frac{1}{2} \times \frac{1}{50}$ seconde.

⁶⁸⁸ Cette date marque la toute première livraison commerciale d'un ordinateur à mémoire à tores de ferrite : il s'agissait en l'occurrence d'une machine construite par la division E.R.A. de la *Remington Rand*, le modèle 1103A. Le premier acquéreur de l'E.R.A./R.R. 1103A fut l'U.S. *National Advisory Committee of Aeronautics*.

⁶⁸⁹ Au cours de cette période, des tambours magnétiques furent aussi bien montés sur de gros prototypes d'ordinateurs scientifiques - tels l'E.D.V.A.C., le J.O.H.N.N.I.A.C., le M.A.N.I.A.C., l'I.A.S.C., l'I.L.L.I.A.C., le Whirlwind ou l'O.A.R.A.C. - que sur des machines à vocation commerciale de taille beaucoup plus modeste - par exemple l'I.B.M. 650, le *Librascope/General Precision* L.G.P. 30 ou encore le *Bendix* G-15.

(éventuellement secondé par un lecteur de bandes), n'eurent aucune descendance. En dépit des nombreux progrès qui furent successivement accomplis dans le domaine des tambours magnétiques un problème capital subsistait: l'opposition entre leur capacité de stockage et leur temps d'accès. Alors que les applications informatiques se diversifiaient grandement - en investissant l'espace économique à partir de 1952-53, l'ordinateur avait créé de nouvelles exigences mais aussi renouvelé les anciennes - et que les besoins en mémoire de masse, en rapidité de calcul et en temps d'accès augmentaient en proportion, les chercheurs des firmes industrielles et des institutions gouvernementales qui s'étaient lancées dans le développement d'ordinateurs scientifiques et/ou commerciaux à la fin des années quarante ou au début des années cinquante commencèrent à mettre au point des périphériques auxiliaires de stockage d'un genre nouveau: les unités à disques magnétiques superposés. Le premier de ces systèmes, l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* fut pour la première fois proposé à la vente en 1957. Cet ancêtre de nos disques durs allait rapidement bouleverser un secteur informatique alors encore en pleine phase d'organisation. Nous allons maintenant voir en quoi, précisément, la *Disk Storage Unit* et ses successeurs différaient de leurs proches « cousins », les tambours magnétiques.

2.2.8.4.6. Les mémoires auxiliaires à disques magnétiques: l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* et les systèmes multitêtes/multidisques.

2.2.8.4.6.1. Du contexte dans lequel l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* fut inventée et développée.

En 1957, le fabricant d'ordinateurs américain I.B.M. commercialisa un tout nouveau système de stockage auxiliaire : l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit*. Cette profonde innovation – il s'agissait en fait de mettre en œuvre un ensemble de disques magnétiques disposés sur un axe vertical et offrant un accès aléatoire rapide à une très grande quantité de données – trouve semble-t-il son origine dans une idée que formula Presper J. Eckert à la fin de l'année 1945. A l'époque, et avant qu'il ne quitte le projet en compagnie de John W. Mauchly pour aller fonder en mars 1946 une firme commerciale (l'*Electronic Control Company*, première du genre), le collaborateur de John Von Neumann était à la recherche d'un procédé technique qui permettrait de stocker à la fois le programme et les données du successeur de l'E.N.I.A.C., l'E.D.V.A.C. Parti vers d'autres horizons, Eckert ne donna finalement pas corps à ce concept pourtant voué à un bel avenir. De fait jusqu'au début des années cinquante, et mise à part la

tentative malheureuse menée par Andrew D. Booth en 1947, on perd quelque peu la trace du principe du disque d'enregistrement magnétique. On sait cependant qu'en 1952, année où furent officiellement présentés l'E.D.V.A.C. et l'I.A.S.C., Jacob Rabinow et son équipe de l'U.S. *National Bureau of Standards* travaillaient à la mise au point d'un système de ce genre à la requête du *Ballistic Research Laboratory* d'Aberdeen. Finalement, en 1956⁶⁹⁰, ce sont les ingénieurs et les scientifiques du laboratoire de développement des nouvelles technologies qu'I.B.M. avait installé en 1952 à San José – la future *Silicon Valley* - qui annoncèrent la création du premier dispositif opérationnel de ce type : le *Model 350 Disk Storage Unit*.

C'est un diplômé du *California Institute of Technology*, Arthur J. Critchlow, qui en septembre 1952 prit la tête du projet « *Source Recording* », lequel allait donner naissance à l'I.B.M. *Model 350* quatre ans après. La mission initialement assignée à Critchlow par les exécutifs d'I.B.M. était relativement simple. Dans un premier temps, elle consistait à étudier la manière dont l'information était organisée, formatée, stockée et traitée lorsqu'on employait des équipements à cartes perforées. Dans un second temps son objectif visait à définir une méthode qui s'avèrerait plus efficace que celle(s) communément usitée(s) dans les entreprises ou les administrations américaines. On s'étonnera peut-être ici qu'à cette date tardive, I.B.M. se soit ainsi tourné vers ses utilisateurs de machines à cartes perforées – des systèmes extrêmement limités au regard de l'extraordinaire puissance des ordinateurs - pour conduire une pareille étude de terrain. Souvenons-nous alors qu'en 1951, l'*Electronic Control Company* – devenue la *Eckert-Mauchly Computer Corporation* peu de temps avant son rachat par la *Remington Rand Corporation* – avait livrée à l'U.S. *Census Bureau* le premier ordinateur commercial à jamais avoir été construit dans le monde, l'*UNIVersal Automatic Computer I* (ou Univac I). Certes, sous l'influence décisive de Thomas J. Watson Jr., I.B.M. s'était engagé depuis quelques années déjà dans la fabrication de calculateurs et d'engins de bureaux électroniques (notamment avec le *Selective Sequence Electronic Calculator* et les I.B.M. 603 et 604). Mais en matière d'ordinateurs – alors des instruments rarissimes destinés exclusivement à réaliser des applications scientifiques - l'expérience de « *Big Blue* » était extrêmement limitée. A New York bien sûr, une attention toute particulière était accordée en permanence aux accomplissements des différents constructeurs d'ordinateurs. En septembre 1949, la livraison de l'ordinateur militaire B.I.N.A.C. à la *Northrop Aircraft Company* par l'E.M.C.C. focalisa soudainement l'attention des dirigeants d'I.B.M. sur la petite entreprise

⁶⁹⁰ Une première présentation du *Model 305 Disk Storage Unit* eut lieu en mai 1955. Mais c'est au début de l'année 1956, à l'occasion de la *Western Joint Computer Conference*, que ce système fut officiellement présenté à un parterre de professionnels.

commerciale créée par Presper J. Eckert et John W. Mauchly. Le *BINARY Automatic Computer*, même s'il fut finalement livré à son commanditaire (sa construction prit tout de même trois fois plus de temps que prévu), devait conduire les deux associés au bord de la faillite (le coût de développement de la machine excédant le montant du contrat initialement passé avec *Northrop*). Mais le B.I.N.A.C. démontra aussi tout à fait clairement que l'E.M.C.C. était bel et bien capable de construire un ordinateur. Conséquence de cela, le programme U.N.I.V.A.C. fut immédiatement relancé et six commandes furent enregistrées : trois exemplaires de l'U.N.I.V.A.C. I étaient destinés à diverses administrations américaines (dont le *Census Bureau*), deux à l'*A.C. Nielsen Company* et le dernier à la *Prudential Insurance Company*. Jusqu'alors, Thomas J. Watson Sr., estimant qu'il n'existait aucun marché sérieux pour des ordinateurs à vocation commerciale, s'était montré hostile à l'idée consistant à fabriquer de telles machines pour les louer – et non les vendre – à des compagnies privées ou à des officines gouvernementales. Cette prise de position, qui *a posteriori* ne peut bien entendu manquer de nous paraître étrange, peut cependant se trouver pleinement expliquée (si ce n'est justifiée). Depuis sa création par Herman H. Hollerith à la fin du 19^{ème} siècle, la firme qui allait devenir I.B.M. au mois de février 1924 avait en effet réussi à instaurer à son avantage une situation de quasi monopole dans le domaine de l'*information processing equipment*. Grâce à l'application rigoureuse d'une politique commerciale particulièrement ingénieuse et agressive, I.B.M., pendant plusieurs décennies, parvint à placer – comprendre louer - des machines de bureau mécaniques, électromécaniques puis électroniques chez ses très nombreux clients privés et publics (lesquels devaient d'ailleurs se distinguer par leur très grande fidélité). C'est ainsi que l'entreprise dirigée par T. J. Watson Sr. atteint et consolida sa position de leader sur ce marché très lucratif. Toutefois, l'essentiel des bénéfices colossaux dégagés par le géant I.B.M. ne provenait pas directement de la location de ses appareils mais de la vente de fournitures (*i.e.* de cartes perforées vierges), et de services au client (livraison et mise en route des machines, formation du personnel, entretien courant et réparation des matériels, etc.). En détenant l'exclusivité des droits de production et de vente des consommables nécessaires au fonctionnement de ses instruments de bureau, c'est-à-dire finalement en créant une dépendance extrêmement forte chez ses clients, I.B.M. se trouva littéralement en mesure de verrouiller une situation qui était déjà de type monopolistique. Même si les choses ont beaucoup évolué depuis les années cinquante, le fait que par le passé I.B.M. se soit plus souvent distingué par sa propension à l'attentisme et au conservatisme⁶⁹¹

⁶⁹¹ C'est sous l'impulsion de Thomas J. Watson Jr., le fils de T. J. Watson Sr. qu'I.B.M. amorça son virage vers la technologie électronique après la fin de la seconde guerre mondiale. Témoin du conservatisme féroce qui

que par sa capacité à proposer de réelles innovations technologiques n'est un secret pour personne. A la fin des années quarante, fort de la surpuissance économique de son entreprise et de sa mainmise presque absolue sur le marché des machines de bureau, Thomas J. Watson Sr. n'avait donc absolument aucune raison de vouloir engager I.B.M. dans une voie qu'il ne jugeait pas être prometteuse. En outre, et compte tenu de la « philosophie qui régnait alors dans la maison », il eut été fort difficile de convaincre les cadres exécutifs qui siégeaient aux conseils d'administration de l'opportunité commerciale que pouvait représenter le développement puis la location d'ordinateurs commerciaux. Pour l'immense majorité des gens - tout au moins pour ceux qui en avaient déjà entendu parler- les ordinateurs étaient des monstres technologiques complexes, onéreux, difficiles à utiliser qui avaient fondamentalement leur place dans des laboratoires de recherches militaires ou scientifiques. Or vouloir construire une telle machine pour la louer ensuite à une administration publique ou à une entreprise privée, c'était bien sûr prendre un risque technologique et économique énorme – encore une fois I.B.M. n'avait presque aucune expérience dans ce domaine - mais c'était également s'exposer à la résistance d'une clientèle fort peu encline au changement (et déjà quelque peu échaudée par l'apparition des machines de bureau électroniques). De plus, accepter cette idée c'était aussi se résoudre au fait qu'à plus ou moins long terme, les machines de bureau à cartes perforées disparaîtraient et avec elles, la manne financière sur laquelle reposait essentiellement tout l'empire I.B.M. (ce qui aurait laissé du même coup la porte ouverte à d'éventuels concurrents). Mieux valait alors y renoncer et se satisfaire d'une situation de fait qui n'avait absolument rien de désespérée, tout au contraire. On peine alors à prendre la mesure de l'intensité du choc que représenta en 1948 l'annonce par l'E.M.C.C. de six commandes simultanées d'U.N.I.V.A.C. I. Choc d'autant plus brutal que par un bien curieux concours de circonstances, l'une de ces commandes émanait de l'U.S. *Census Bureau*, le service du recensement américain qui, en 1890, avait été le premier gros client d'Herman Hollerith et lui avait permis de commencer à asseoir la suprématie de son entreprise. Avec la mise en chantier de l'U.N.I.V.A.C. I, I.B.M. se voyait dangereusement menacé sur ses propres terres car c'était bel et bien la domination du marché des machines de traitement de l'information – rien de moins - qui se trouvait désormais *remise* en jeu. A partir de là bien sûr, l'immobilisme plus ou moins confortable dans lequel la firme de New York s'était complu des décennies durant n'était plus de mise. Sous peine de se laisser distancer et de perdre son

régnait alors chez la plupart des cadres supérieurs d'I.B.M., la formule « *Evolution, not revolution* » était souvent employée pour évoquer publiquement ce qui devait être pourtant un tournant décisif dans l'histoire de cette entreprise. Peut-être également que l'utilisation de cet euphémisme était censé avoir un effet rassurant auprès de la clientèle (elle aussi extrêmement conservatrice).

monopole, il lui fallait impérativement – et rapidement - réagir⁶⁹² pour préserver un acquis de longue date que d'autres cherchaient à présent à conquérir. A l'époque, c'est-à-dire en 1948-49, deux ordinateurs étaient à l'étude dans les laboratoires de recherches d'I.B.M. : la *Tape Processing Machine* (T.P.M.) et le *Magnetic Drum Calculator* (M.D.C.). Elaborés à Poughkeepsie par Ralph L. Palmer et son équipe, la T.P.M. et le M.D.C. allaient respectivement donner naissance aux I.B.M. *Model 702 E.D.P.M.*⁶⁹³ et 650 M.D.C. dans les tout derniers mois de l'année 1953. Les concernant cependant, les choses ne se déroulèrent ni aussi vite, ni aussi facilement que ce que l'on serait peut-être tenté de le croire. Même si la menace commerciale que représentait de fait l'U.N.I.V.A.C. I avait été clairement identifiée dès 1949 et que des ordinateurs susceptibles de la contrecarrer étaient déjà en cours de développement dans les laboratoires de Poughkeepsie, il régnait encore chez I.B.M. de très grandes incertitudes quant à l'accueil que pourraient bien réserver les utilisateurs de machines de traitement de l'information « traditionnelles » à ce type d'instruments. Conséquence directe de cette valse-hésitation largement nourrie par le conservatisme viscéral qui caractérisait alors la très grande majorité des décideurs d'I.B.M., en 1949 le département « *Future Demands* » de la firme présidée par T. J. Watson Sr. rendit une étude prospective qui concluait : 1°) que le *Magnetic Drum Calculator* était une machine bien trop onéreuse au regard des coûts de fabrication et de location des machines à traiter l'information habituellement utilisées ; 2°) qu'il était beaucoup trop lent pour venir sérieusement concurrencer l'U.N.I.V.A.C. I. En conséquence, et même s'il ne fut pas totalement abandonné, le développement du M.D.C. fut temporairement placé en *stand-by*⁶⁹⁴. Quant à celui de la *Tape Processing Machine*, un ordinateur certes onéreux mais dont le *design* et la rapidité d'opération le classaient dans la même catégorie que l'U.N.I.V.A.C. I., il fit l'objet d'une réorientation aussi soudaine qu'inattendue en 1950. C'est au mois de juin de cette année en effet que la guerre de Corée éclata. Comme cela s'était produit peu de temps après l'attaque japonaise menée sur Pearl Harbor en décembre 1941, Thomas J. Watson Sr. envoya

⁶⁹² Pour décrire l'urgence dans laquelle ils allaient travailler à partir du début des années cinquante, les employés d'I.B.M. forgèrent une expression on ne peut plus explicite : « *the panic mode* » (in [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], p. 124.).

⁶⁹³ E.D.P.M.: *Electronic Data Processing Machine*. Annoncée officiellement dans le courant du mois de septembre 1953, l'E.D.P.M. (ou I.B.M. *Model 702*) était en fait une version améliorée de la *Tape Processing Machine*.

⁶⁹⁴ Rappelons que l'I.B.M. 650, lequel était directement dérivé du M.D.C., fut officiellement annoncé en juillet 1953. Contre toute attente ce petit ordinateur à tambour originalement destiné à des applications scientifiques et d'ingénierie rencontra un très vif succès dans le domaine du *business*. Au moment où le dernier I.B.M. 650 sortait des lignes de production (en 1962) plus de deux mille machines de ce type avaient déjà été livrées. Cette réussite quelque peu inattendue lui value d'ailleurs les surnoms de « *most popular computer of the 1950's* » et de « Ford T » de l'informatique.

spontanément un câble à la Maison Blanche pour informer le Président des Etats-Unis (alors Harry S. Truman), qu'il mettait immédiatement toutes les ressources de son entreprise à l'entière disposition de la nation. La sincérité du « geste » accompli ici par T. J. Watson Sr. ne saurait réellement se voir mise en doute : à soixante ans passés, ce républicain qui n'avait pas coutume de faire de ses positions anti-communistes un mystère se doublait, on le conçoit aisément, d'un patriote pour le moins fervent. Quant à l'attitude de son fils - un ancien pilote de l'U.S. *Army Air Corps* rappelons-le – elle ne devait pas être entièrement dictée par les sentiments patriotiques. S'il soutint effectivement son père dans sa décision politique, T. J. Watson Jr. vit également – et surtout - que la guerre de Corée représentait pour I.B.M. une opportunité immense pour pénétrer rapidement le marché des gros ordinateurs scientifiques. Se souvenant alors des leçons héritées du passé – durant la deuxième guerre mondiale I.B.M. avait spécialement créé des installations pour fabriquer des munitions, des instruments de communication et des décrypteurs destinés à l'U.S. *Army* - T. J. Watson Jr. demanda à James Birkenstock (le directeur général des ventes chez I.B.M.), d'établir une division militaire afin qu'I.B.M. se trouve en mesure de fournir à la défense nationale tous les produits spéciaux dont elle pouvait avoir besoin. Dans la foulée, James Birkenstock et Cuthbert Hurd (le directeur de l'I.B.M. *Applied Science Department*) s'en allèrent visiter une vingtaine de sites militaires et/ou universitaires équipés en machines I.B.M. qu'ils savaient être engagés dans des projets de recherche ou d'ingénierie directement liés au secteur de la défense. De cette étude sur le terrain, il ressortit essentiellement deux choses. D'une part les deux hommes trouvèrent à chaque fois des chercheurs parfaitement disposés – voire même avides – d'évoquer leurs besoins en puissance de calcul, laquelle ne cessait bien entendu de croître en raison de l'engagement américain aux côtés de la Corée du Sud. D'autre part, grâce à cette étude *in situ*, Birkenstock et Hurd purent assez rapidement définir une sorte de catalogue des priorités militaires. Cette liste, remise à T. J. Watson Jr. en novembre 1950, était la suivante : 1°) énergie atomique ; 2°) guidage des missiles; 3°) planification stratégique (cryptographie et cryptanalyse, prévision météorologique, théorie des jeux) ; 4°) conception de réacteurs d'avions. Dans un premier temps, on envisagea chez I.B.M. la construction de trois ou quatre ordinateurs différents, chacun devant être spécifiquement adapté à la réalisation de l'une ou l'autre de ces tâches particulières. Cette idée, dont la concrétisation aurait été par ailleurs immensément coûteuse, fut cependant assez vite abandonnée. Logiquement – après tout un ordinateur est une machine universelle - on lui préféra celle qui consistait à concevoir un seul et même dispositif capable de satisfaire la totalité des besoins exprimés par ses divers utilisateurs. Ainsi que le remarque Emerson E. Pugh : «... c'était là une stratégie extrêmement

*risquée car l'ensemble des coûts de développement de cette machine étaient à la charge d'I.B.M. Cependant, si l'entreprise réussissait son pari, les bénéfices qu'elle pourrait en tirer n'en seraient que plus grands*⁶⁹⁵ ».

Finale­ment la décision de construire le *Defense Calculator*, un ordinateur qui devait largement s'inspirer de l'*Institute for Advanced Study Computer* de Von Neumann, fut définitivement arrêtée au cours de l'été 1950. Nous reviendrons sur l'histoire du *Defense Calculator* (machine bientôt rebaptisée I.B.M. 701) un peu plus tard. Pour l'heure, ce qu'il nous faut bien voir, c'est qu'à ce moment précis T. J. Watson Sr. et son fils choisirent d'engager I.B.M. sur la voie du développement des grands ordinateurs scientifiques. Or cette décision cruciale, que d'aucuns, dont Paul E. Ceruzzi⁶⁹⁶, se plaisent à qualifier « d'erreur de *business* », eut un temps au moins des conséquences commerciales néfastes pour le géant de New York. Bien entendu la construction du *Defense Calculator* ne fut pas décidée sur un coup de tête. Dès le départ Cuthbert Hurd avait ainsi catégoriquement affirmé qu'il serait possible de louer au moins six de ces machines aux différents corps d'armée américains (le montant de cette location fut initialement estimé à 8000 dollars par mois pour finalement atteindre la somme de 17600 dollars). Après qu'il eut été officiellement autorisé à approcher des clients potentiels pour le *Defense Calculator* en février 1951, Hurd produisit une vingtaine de lettres d'intention – toutes paraphées par de hauts responsables scientifiques et/ou militaires – qui achevèrent définitivement de convaincre les Watson père et fils du bien fondé de leur démarche. De plus, en pleine guerre de Corée, le concept d'un ordinateur militaire ne fut guère difficile à « vendre » en interne : les habituelles interrogations liées au marketing et à la rentabilité de la machine furent passées sous silence et l'intérêt de la nation largement mis en avant. En même temps le marché des machines civiles apparaissait encore comme très incertain et un éventuel engagement d'I.B.M. dans ce domaine se heurtait à bien des résistances au sein de la firme. En conséquence, à notre connaissance, personne ne s'éleva – ou n'osa s'élever – contre la décision de construire le *Defense Calculator*. Compte tenu de l'ampleur du « chantier » que représentait la conception de cet ordinateur, I.B.M., malgré sa colossale puissance financière, ne pouvait se permettre de prendre le risque de conduire plusieurs projets de front. Son développement ayant été confié à Ralph Palmer (Poughkeepsie), l'intégralité des ressources humaines et financières jusque là consacrées à la mise au point de la *Tape Processing Machine* furent donc réallouées au *Defense Calculator*. Aujourd'hui chacun s'accorde à reconnaître que le gel successif des projets M.D.C. et T.P.M.

⁶⁹⁵ In [Pugh, 1995], p. 168.

⁶⁹⁶ In [Ceruzzi, 1998], p. 117.

empêcha I.B.M. de s'imposer plus rapidement qu'il ne le fit en définitive sur le marché civil du traitement de l'information. Si T. J. Watson Sr. et son fils avaient encouragé le développement de l'une ou l'autre de ces machines – voire des deux - à la fin des années quarante, I.B.M. se serait sans nul doute trouvé en mesure de rapidement barrer la route à l'E.M.C.C./*Remington Rand Corporation* et à son U.N.I.V.A.C. I. Mais comme on le sait, il n'en fut rien et pendant quelques années c'est bien la *Remington Rand* qui domina ce marché naissant. Chez I.B.M. un nouveau changement de cap – aussi soudain et radical que l'avait été celui de juin 1950 – se produisit néanmoins courant 1951 lorsque ses haut dirigeants apprirent que l'U.N.I.V.A.C. I qu'avait commandé l'U.S. *Census Bureau* en 1948 était complètement opérationnel. Dans son ouvrage *Computer : a History of the Information Machine*, Paul E. Ceruzzi nous rappelle quelle fut la réaction exacte de T. J. Watson Jr. lorsque celui prit connaissance de cette nouvelle :

« *I thought : My God, here we are trying to build Defense Calculators, while UNIVAC is smart enough to start taking all the civilian business away. I was terrified. I came back to New York in the late afternoon and called a meeting that stretched long into the night. There wasn't a single solitary soul in IBM who grasped even a hundredth of the potential the computer had. We couldn't visualize it. But the one thing we could understand was that we were losing business. Some of our engineers already had a fledgling effort under way to design a computer for commercial applications [i.e. la T.P.M.]. We decided to turn this into a major push to counter UNIVAC⁶⁹⁷ ».*

Cette brutale prise de conscience de leurs erreurs stratégiques successives conduisit les dirigeants d'I.B.M. à relancer immédiatement les projets M.D.C. et T.P.M. Bien entendu, et puisqu'à ce stade des événements il était tout à fait hors de question de renoncer à développer le *Defense Calculator* – en terme d'image et de crédibilité, et sans même parler des conséquences légales, se désengager vis-à-vis du gouvernement américain eut été proprement catastrophique pour I.B.M. - la construction de ces trois ordinateurs du avoir lieu simultanément. C'est là, comme on le dit quelquefois, un bel exemple de « retour à la case départ ». Puisque nous nous intéressons ici en priorité à l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* nous devons de remettre à plus tard l'examen des machines commerciales – en l'espèce les modèles 650, 702 et 705 E.D.P.M. – qui autorisèrent finalement I.B.M. à reprendre le pas sur

⁶⁹⁷ In [Ceruzzi, 1998], p. 123.

la *Remington Rand* à partir du milieu des années cinquante sans omettre toutefois de préciser qu'entre septembre 1953 – date de leur annonce officielle – et début 1955 – date à laquelle eurent lieu leurs premières livraisons – seule l'incapacité de son concurrent à produire un plus grand nombre d'U.N.I.V.A.C. permit à la firme de T. J. Watson Sr. de garder intact son carnet de commandes...

C'est dans ce contexte marqué par un climat d'extrême tension et d'intense compétition commerciale qu'au mois de septembre 1952, Reynold Johnson, le directeur du laboratoire d'I.B.M. à San José, demanda à Arthur J Critchlow de réaliser l'enquête que nous avons évoquée plus haut. Peu habitué aux réalités du terrain, Critchlow eut cependant la chance de trouver en la personne d'un représentant de la branche bureautique d'I.B.M. à San Francisco un allié de choix. Celui-ci, en plus de l'affranchir sur les us et coutumes des utilisateurs de machines à cartes perforées I.B.M. organisa à son intention un certain nombre de visites dans des installations privées. C'est ainsi que Critchlow apprit que les équipements de ce genre se révélaient particulièrement performants lorsqu'il s'agissait de traiter des informations organisées sur le mode sériel (ces informations se présentaient sous la forme de paquets de cartes perforées « se suivant » les unes à la suite des autres). En revanche, dès lors qu'il était question d'effectuer un traitement de type aléatoire, c'est-à-dire un traitement où les informations ne se présentaient plus à la chaîne, les choses avaient tendance à grandement se compliquer. Pour donner un exemple concret de cette catégorie de tâches, on peut évoquer le contrôle d'inventaire. Au début des années cinquante, les personnes en charge de la gestion des entrepôts équipés en machines à cartes perforées procédaient généralement de la façon suivante. Chaque acte nécessitait tout d'abord que l'on localise à la main plusieurs cartes perforées spécifiques. Une fois celles-ci localisées, elles étaient extraites de la pile dans laquelle elles se trouvaient, passées en machine pour mettre à jour l'information liée à l'inventaire du stock, puis retournées dans leur paquet d'origine. Ainsi ces opérations n'étaient-elles pas réalisées de manière sérielle mais en fonction d'exigences courantes, lesquelles pouvaient bien entendu varier du tout au tout d'un jour à l'autre. Pour faciliter leurs recherches – une des phases les plus fastidieuses de ce travail à la fois long et répétitif – habitude avait été prise par les employés des entrepôts de disposer les paquets de cartes perforées sur un grand bureau. Si le « *tub file* » comme on appelait alors ce procédé, permettait sans conteste d'accélérer la procédure de triage – plusieurs personnes pouvaient avoir accès en même temps à un fichier donné – elle augmentait aussi considérablement le risque de voir survenir des erreurs de manipulation. Fort de ce constat, la mission initialement assignée à Critchlow se trouva bien vite transformée en la recherche d'une solution technique

susceptible de remplacer avantageusement à la fois les systèmes à cartes perforées et la méthode du « *tub file* » qui leur était si souvent associée. De novembre 1952 à mars 1953, toutes sortes de dispositifs de stockage expérimentaux furent tout à tour conçus et testés par les ingénieurs de San José en vue d'apporter une réponse satisfaisante à cet épineux problème. Ces derniers devaient ainsi mettre au point différents dispositifs à cartes, à bandes, à câbles, à tambours, à disques (tous magnétiques bien entendu), et même plusieurs systèmes reposant sur l'exploitation de propriétés optiques. En avril 1953 cependant, toutes ces configurations avaient été écartées à l'exception d'une seule – celle des disques – proposée par un jeune ingénieur engagé par I.B.M. trois mois auparavant. L'idée, cependant, n'était pas de lui.

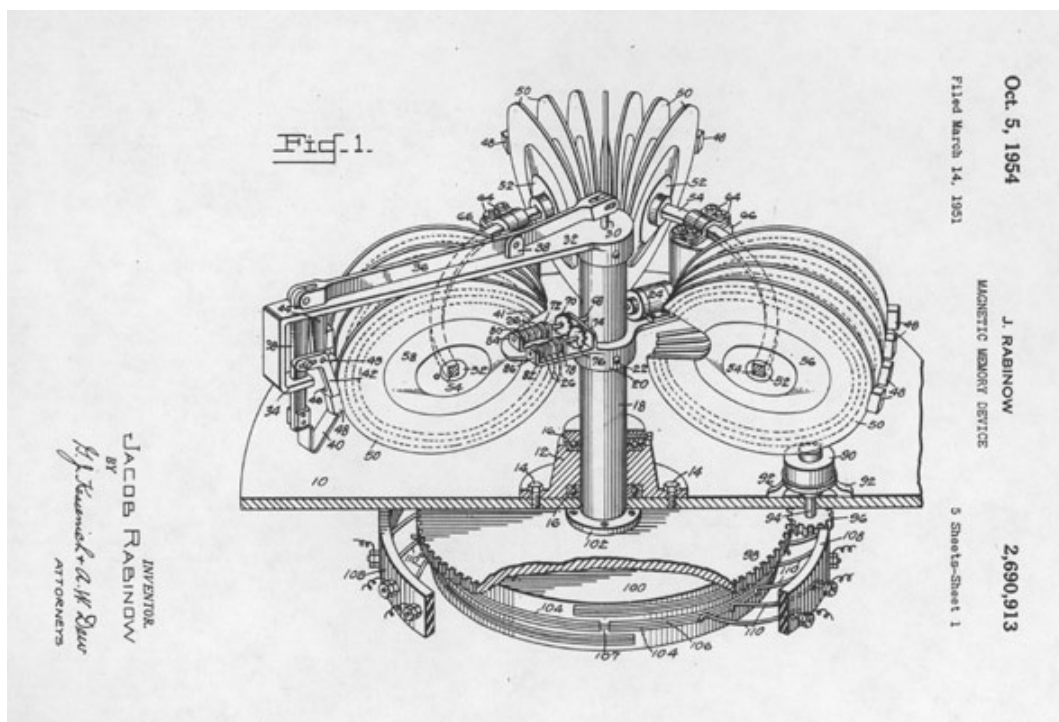


Fig 25: schéma de la « *notched-disk memory* », de Jacob Rabinow.
Image Courtesy of the National Institute of Standards and Technology.

Formulée à l'origine par Jacob Rabinow, l'ingénieur en chef de l'*Electro-Mechanical Ordnance Division* du *National Bureau of Standards*, elle avait fait l'objet d'une publication dans une revue d'ingénierie en août 1952. La « *notched-disk memory* », puisque tel était le nom de la mémoire de masse décrite dans cet article, permettait de stocker de l'information digitale sur plusieurs disques magnétiques dotés chacun d'une large encoche jouant le rôle de « fenêtre d'accès » pour les têtes de lecture/écriture du système. Ces disques étaient montés sur un axe circulaire avec leurs encoches orientées en direction du centre de cet anneau. Des têtes de lecture/écriture installées sur un bras pivotant campé au centre de cet anneau

permettaient alors de lire ou d'écrire de l'information sur le disque sélectionné, lequel se trouvait mis en mouvement au début de cette opération tandis que tous les autres demeuraient inertes. Fort malheureusement, très peu d'informations techniques subsistent aujourd'hui concernant l'invention de Jacob Rabinow. Pour en avoir vu quelques photographies originales sur le site officiel du *National Institute of Standards and Technology*⁶⁹⁸ nous nous trouvons néanmoins en mesure d'assurer que deux prototypes de la « *notched-disk memory* » - au moins - furent successivement construits au N.B.S. entre 1952 et 1955. Le premier, qui était aussi le plus grand, utilisait des disques dont le diamètre était d'une vingtaine de 20 pouces (soit environ 50 centimètres). Quant au second, plus petit et de conception plus tardive, il semble que la capacité d'enregistrement de chacun de ses disques ait été d'un million de bits. Nous ignorons tout, en revanche, de la capacité de stockage totale de ces deux systèmes. Quant à savoir si, oui ou non, l'une ou l'autre de ces deux mémoires de masse fut effectivement employée sur un ordinateur au cours des années cinquante, le mystère demeure entier. Tout, cependant, porte à croire que ce ne fut pas le cas (il semble qu'autrement nous en aurions certainement entendu parler). Même si le *design* et le fonctionnement de la « *notched-disk memory* » étaient en définitive assez éloignés de ceux qui allaient bientôt caractériser l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* c'est bien le système mis au point au *National Bureau of Standards* un an auparavant qui inspira directement les ingénieurs en charge de la conception de ce dispositif d'enregistrement totalement révolutionnaire.

2.2.8.4.6.2. *Design et modus operandi* de l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* et de ses successeurs.

A bien des égards, et comme nous allons nous efforcer de le montrer maintenant, l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* peut être considéré comme l'ancêtre direct de nos actuels disques durs. Toutefois avant d'étudier dans le détail le principe de fonctionnement de cet appareil révolutionnaire, nous nous devons de préciser une chose : on confond assez fréquemment l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* avec l'I.B.M. 305 R.A.M.A.C. (*Random Access Method of Accounting and Control*). Or il faut bien voir que le premier de ces dispositifs était un système de stockage multidisques tandis que le second était un petit ordinateur justement pourvu de ce système. De fait si le modèle 350 *Disk Storage Unit* devait en priorité équiper l'I.B.M. 305 R.A.M.A.C., il fut également proposé comme pièce d'équipement séparée

⁶⁹⁸ Ce site peut être consulté à l'U.R.L. suivant : <http://museum.nist.gov/panels/notched>

pouvant être rattachée à l'I.B.M. 650. Ceci, en même temps que l'étroite ressemblance existant entre leurs désignations numériques respectives – 350 et 305 - facilite de façon évidente la confusion entre la *Disk Storage Unit* et le R.A.M.A.C.⁶⁹⁹. On ne s'étonnera donc pas de ce que bon nombre d'historiens de l'informatique américains ou britanniques évoquent l'I.B.M. 305 R.A.M.A.C. quant ils souhaitent parler en réalité du tout premier disque dur de l'histoire. L'usage, semble-t-il, a consacré peu à peu cette pratique. Il n'est donc pas inutile de rappeler ici que lorsqu'une référence est faite à l'I.B.M. 305 R.A.M.A.C., c'est bien de l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* que l'on parle la plupart du temps. Comme nous le disions plus haut, la *Disk Storage Unit* fut dévoilée au public au début du mois de mai 1955. Une deuxième présentation, un peu plus technique celle-là, eut lieu par la suite en février 1956 à l'occasion de la tenue de la *Western Joint Computer Conference*. Dans les *Proceedings of the Western Joint Computer Conference*, T. Noyes et W. E. Dickinson ont décrit l'I.B.M. 350 de la sorte:

« *The information is stored, magnetically, on 50 rotating disks. These disks are mounted, so as to rotate about a vertical axis, with spacing between disks of 0.3 inch. This spacing permits magnetic heads to be positioned to any of the 100 concentric tracks which are available on each side of each disk. Each of these tracks contains 500 alphanumeric characters. Thus, the total storage capacity is 5,000,000 characters*⁷⁰⁰ ».

Evidemment, entre le moment où ils apprirent l'existence de la « *notched-disk memory* », c'est-à-dire début 1953, et celui où ils purent effectivement présenter un prototype achevé de la *Disk Storage Unit* (1955), les ingénieurs de l'I.B.M. *San Jose Laboratory* eurent à surmonter un certain nombre de difficultés techniques. Par rapport aux tambours magnétiques, l'utilisation d'un jeu de disques offrait un double avantage notable : pour une capacité d'enregistrement plus élevée (en raison d'une meilleure exploitation des surfaces utiles disponibles), le coût de stockage par bit s'avérait ici nettement inférieur. En revanche les tambours, de part leur forme cylindrique, se caractérisaient par une rigidité et une solidité à laquelle il était impossible de prétendre lorsque des disques se voyaient employés. Il apparut assez vite aux ingénieurs d'I.B.M. que la seule manière de procéder dans ce cas consistait à

⁶⁹⁹ Dans son *History of Modern Computing*, Paul E. Ceruzzi s'est ainsi laissé surprendre : il appelle le R.A.M.A.C. *Model 350* et la *D.S.U. Model 305*. Renseignement pris auprès du département des archives d'I.B.M. U.S.A., c'est bien le contraire qui correspond à la réalité.

⁷⁰⁰ T. Noyes et W. E. Dickinson, *Proceedings of the Western Joint Computer Conference*, février 1956, pp. 42-44, cité in [Pugh, 1995], p. 225.

disposer ces disques sur un axe moteur vertical puis à positionner la tête de lecture/écriture du système au dessus d'eux un peu comme on le faisait en posant la pointe saphir d'un phonographe sur les microsillons d'un disque en vinyle. La seule différence, ici, était que cette tête ne devait jamais entrer en contact direct avec la surface des disques sous peine de voir détruites les informations qu'ils contenaient. Tout comme Andrew D. Booth l'avait fait quelques années avant eux, ils réalisèrent alors que le soufflage permanent d'une mince couche d'air sur la surface des disques permettrait sans doute de prévenir tout phénomène d'écrasement de la tête de lecture/écriture. Si sur le premier prototype de la *Disk Storage Unit* un compresseur devait être spécifiquement employé à cette fin, par la suite, c'est le mouvement même de rotation des disques qui servit à générer ce coussin d'air isolant. Le passage d'une distribution circulaire des unités individuelles d'enregistrement à une organisation verticale ne devait pas constituer ici le seul écart que les gens d'I.B.M. s'autorisèrent par rapport au *design* original de la « *notched-disk memory* ». Le problème, avec le système du N.B.S., était qu'à un instant t , seul un disque pouvait être mis en mouvement à la fois. Dès lors, à chaque fois qu'une nouvelle unité se trouvait sélectionnée, il fallait attendre que le disque précédemment activé décélère jusqu'à complète immobilisation et que le nouveau accélère suffisamment pour qu'un accès en lecture ou en écriture puisse enfin être effectué, d'où une perte de temps à la fois importante et systématique⁷⁰¹. Afin de surmonter cette difficulté, les ingénieurs d'I.B.M. résolurent de faire tourner l'ensemble formé par l'axe vertical et les cinquante disques du système à une vitesse continue de 1200 tours par minute. Cette solution technique « globale », finalement, se révéla être la bonne : en procédant de la sorte, il était non seulement possible de conférer à l'ensemble une excellente rigidité structurelle mais on obtenait aussi un temps d'accès aux disques – à n'importe quel disque s'entend - largement inférieur à la seconde.

L'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit*, nous avons déjà commencé à le dire, se composait de trois éléments principaux : 1°) l'ensemble formé par l'axe moteur vertical et les cinquante disques d'enregistrement ; 2°) une colonne verticale crantée supportant et assurant le déplacement (perpendiculaire au sol) d'un équipage mobile doté de deux têtes de lecture/écriture; 3°) l'équipage dont nous venons de parler, qui pouvait être mû mécaniquement sur le plan horizontal.

⁷⁰¹ Précisons que sur la « *notched-disk memory* », la mise en mouvement et le freinage des disques était réalisée par friction mécanique au moyen de deux petites roues d'entraînement. L'axe circulaire sur lequel ceux-ci se trouvaient disposés n'était en fait qu'une simple armature. Sur la D.S.U. en revanche, la colonne verticale servait à la fois de support aux disques mais également de dispositif moteur.

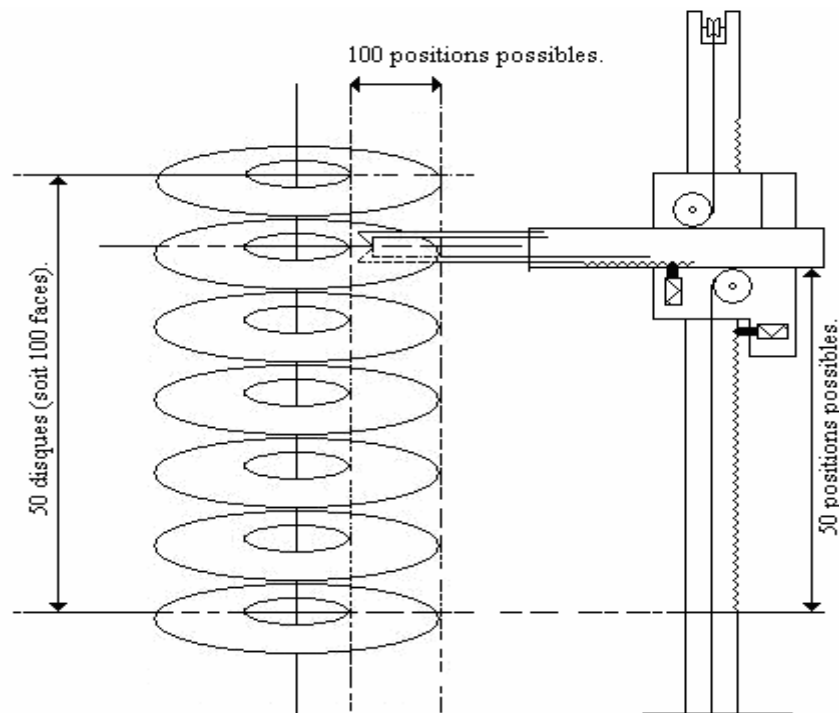


Fig 26 : système d'enregistrement magnétique multidisques
I.B.M. 350 D.S.U. (*Disk Storage Unit*).

La figure 26, ci-dessus, représente l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* sous forme schématique⁷⁰². Chacun des cinquante disques que comportait la D.S.U. était doté de 100 pistes concentriques par face ce qui faisait 200 pistes par unité individuelle d'enregistrement ou encore 10000 pistes au total. Pour l'ensemble de ces disques, il n'existait que deux têtes de lecture/écriture portées par un seul et unique équipage mobile. A un instant donné, cet équipage pouvait occuper un emplacement particulier parmi 5000 possibles (lequel se trouvait spécifié par ses positions verticale et horizontale courantes). Compte tenu du fait que les disques étaient double face et qu'il existait deux têtes de lecture/écriture, ceci permettait donc de définir les 10000 pistes précédemment évoquées. Quant un disque était sélectionné par l'ordinateur, l'équipage mobile se déplaçait verticalement sur son axe support puis, une fois parvenu à hauteur de ce disque, il pénétrait horizontalement jusqu'à atteindre la piste choisie. Enfin, un commutateur – toujours piloté par l'ordinateur – était activé qui permettait de mettre en action une des deux têtes de lecture/écriture de l'équipage (selon le cas, celle de dessus ou celle de dessous). La très grande originalité de cette mémoire magnétique résidait dans le fait qu'à tout moment, n'importe quel élément d'information était aussi accessible que n'importe quel autre, le temps d'accès à une quelconque information étant défini ici par le temps nécessaire à l'accomplissement des mouvements horizontaux et verticaux de l'équipage

⁷⁰² Diagramme réalisé d'après [Demarne et Rouquerol, 1985], fig. 25, p. 46.

mobile. Ce temps était donc fonction de la distance physique que l'équipage devait parcourir entre la position qu'il occupait précédemment et celle qui venait d'être sélectionnée. En moyenne il était de 0,6 seconde. L'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* offrait donc un accès aléatoire aux données (*random access*) et permettait en outre leur adressage numérique (tel disque, telle piste sur ce disque, tel groupe de bits sur cette piste). Par rapport aux dispositifs de stockage à bandes magnétiques – lesquelles offraient un accès sériel aux données - la D.S.U. représentait un progrès notable. A capacité de stockage équivalente, soit tout de même cinq millions de caractères alphanumériques, il a en effet été estimé que retrouver une séquence de bits particulière prenait 120 fois moins de temps avec le dispositif mis au point par I.B.M. qu'avec les mémoires à bandes les plus performantes de l'époque.

Le premier exemplaire commercial du système informatique R.A.M.A.C.⁷⁰³ fut livré à la fin de l'année 1956 à la compagnie aérienne *United Airlines* (site de Denver, Colorado). Cette machine devait faire partie intégrante du système de réservation automatique du célèbre transporteur américain. Au printemps 1958, les représentants européens d'I.B.M. installèrent aussi un modèle 305 dans le pavillon américain de la foire universelle de Bruxelles. Par l'entremise d'un clavier, les visiteurs du stand I.B.M. étaient invités à venir poser des questions au « professeur R.A.M.A.C. », lequel était alors censé leur répondre correctement dans une des dix langues naturelles⁷⁰⁴ qu'il « connaissait ». Alors que l'on parlait d'intelligence artificielle depuis deux ans déjà⁷⁰⁵, ce coup promotionnel, comme on dit, entraîna pour I.B.M. d'excellentes retombées en termes d'image de marque. D'une part, cette petite mise en scène habile démontrait clairement que tout un chacun pouvait parfaitement prétendre à utiliser un ordinateur sans pour autant être un mathématicien ou un informaticien confirmé (la possession de quelques compétences dactylographiques très élémentaires paraissait largement suffisante ici). D'autre part, elle présageait également de ce que pourrait bien devenir, un jour, l'informatique. Enfin, elle permit d'établir clairement aux yeux du public et des professionnels que le nouvel ordinateur d'I.B.M. était rapide, fiable, et qu'en matière de rapport coût/performances, sa mémoire de masse surclassait tous les autres dispositifs existants (à savoir les cartes perforées, les bandes magnétiques et les tambours magnétiques). Entre fin 1956 et 1960, le principal concurrent du système 305 R.A.M.A.C. devait être l'U.N.I.V.A.C. *File Computer* (U.F.C.), un ordinateur commercial produit par la

⁷⁰³ Nous parlons ici de « système informatique » car outre un ordinateur, le R.A.M.A.C. était également composé d'un lecteur de cartes, d'une imprimante et, bien évidemment, de la mémoire auxiliaire modèle 350.

⁷⁰⁴ Langues parmi lesquelles figurait l'Interlingua, un langage artificiel similaire à l'Espéranto.

⁷⁰⁵ Rappelons que la célèbre conférence de Dartmouth (U.S.A.), eut lieu en 1956. C'est au cours de cette conférence que fut inventée l'appellation toujours très controversée d'intelligence artificielle.

division U.N.I.V.A.C. de la *Sperry Rand Corporation*⁷⁰⁶. A la différence de l'ordinateur d'I.B.M., l'U.F.C. était pourvu d'un tambour magnétique utilisant une tête de lecture/écriture par piste d'enregistrement. Cet arrangement, bien entendu, lui conférait une vitesse d'accès à l'information beaucoup plus élevée que celle à laquelle pouvait prétendre le R.A.M.A.C. En revanche ce dernier, moins coûteux, offrait une capacité de stockage autrement plus importante que celle effectivement permise par son rival. Emerson W. Pugh⁷⁰⁷ a ainsi pu estimer que l'U.N.I.V.A.C. *File Computer*, lorsqu'il était équipé de dix tambours magnétiques (nombre maximum de périphériques d'enregistrement auxiliaires que cette machine pouvait gérer simultanément), n'offrait en fait qu'un tiers de la capacité de stockage affichée par le R.A.M.A.C. et sa « simple » unité D.S.U. 350 !

Dans les quatre ou cinq années qui suivirent immédiatement la mise sur le marché du système I.B.M. 305 R.A.M.A.C., la supériorité des disques magnétiques sur tous les autres dispositifs d'enregistrement de masse devint de plus en plus évidente. Ceci, pour une industrie informatique qui était tout juste en train de se constituer et de définir ses propres repères, sa propre identité, devait entraîner sans tarder deux conséquences extrêmement importantes. Premièrement les tambours magnétiques, instruments jusque là omniprésents mais très chers, furent presque aussitôt frappés d'obsolescence et disparurent progressivement dans le courant de la décade suivante au profit des systèmes de stockage à disques et à bandes. Deuxièmement, l'accès rapide à de très grandes quantités de données via un ordinateur – le tout pour un rapport coût/performances qui commençait à devenir véritablement intéressant – devait aussi annoncer la fin imminente des méthodes et des instruments classiques de traitement de l'information. Celles et ceux, justement, sur lesquelles I.B.M. et ses principaux concurrents avaient bâti leur empire financier depuis les temps « reculés » qui avaient vu l'avènement des toutes premières machines à tabuler mécaniques et électromécaniques. A partir de ce moment, les choses ne devaient plus jamais être les mêmes : l'ordinateur, désormais machine financièrement accessible, quittait enfin les espaces préservés des laboratoires scientifiques et militaires où il était né pour venir investir – lentement, mais sûrement - les grands secteurs industriels et institutionnels de nos sociétés...

Pour terminer, il est intéressant de noter que l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit*, après avoir provoqué la disparition prématurée des tambours magnétiques, ne connut pas elle-même

⁷⁰⁶ Après avoir racheté l'*Eckert-Mauchly Computer Company* et l'*Engineering Research Associates* au début des années cinquante, la *Remington Rand* fusionna avec la *Sperry Gyroscope* en 1955 et fut renommée *Sperry Rand Corporation*.

⁷⁰⁷ In [Pugh, 1995], p.226.

une très longue carrière⁷⁰⁸. Sa production, tout de même que celle de l'ordinateur R.A.M.A.C., fut en effet stoppée définitivement en 1961. Au cours des années qui suivirent, les ingénieurs de l'I.B.M. *San Jose Laboratory* ne demeurèrent toutefois pas inactifs. Travaillant sans discontinuer à l'amélioration de l'enregistrement de données sur des disques magnétiques, ils parvinrent à mettre au point différents systèmes reposant sur ce principe qui tous, puisqu'ils permettaient de diminuer sensiblement les coûts liés au stockage et au traitement de l'information, contribuèrent à fonder et à bâtir une industrie informatique qui était encore largement balbutiante. Parmi ces très nombreux perfectionnements on peut notamment mentionner: la création, en 1962, d'un dispositif multidisques de petite taille et d'une capacité de deux millions de caractères alphanumériques (soit autant que 25000 cartes perforées), suite à l'invention de la diode laser par Léo Esaki, chercheur chez I.B.M. et prix Nobel en 1973 ; la présentation, un an après cela, du premier disque dur amovible de l'histoire, l'I.B.M. *Model 1311*⁷⁰⁹ ; l'invention de la *Cyclical Redundancy Check* (ou C.R.C.) en 1964, une méthode de contrôle automatique permettant à un disque dur de s'autovérifier et d'autocorriger la très grande majorité de ses (éventuelles) erreurs de contenu ; enfin, un peu plus tard (1973), l'introduction de l'I.B.M. *Model 3340* « Winchester⁷¹⁰ », le premier disque dur doté de têtes de lecture/écriture de masse réduite, de disques autolubrifiés et d'un boîtier scellé. Remarquons ici que le modèle 3340 devint à ce point populaire que pendant un temps, le terme « Winchester » fut employé de façon générique pour désigner tout disque dur, quel que soit par ailleurs son fabricant (exactement comme on disait « Univac » pour parler d'un ordinateur de marque quelconque au cours des années cinquante). Une des plus importantes innovations dans ce domaine se produisit toutefois en 1961. Cette année là les chercheurs d'I.B.M. conçurent en effet un dispositif d'enregistrement multidisques comprenant autant de têtes de lecture/écriture qu'il y avait de faces de disques. Grâce à cet arrangement particulier (voir figure *n*, ci-dessous), les équipages mobiles supportant les têtes ne devaient plus subir qu'un seul type de déplacement (horizontal), en lieu et place des deux sortes de mouvements autrefois accomplis. Par rapport à la celle initialement employée sur la *Disk Storage Unit*, cette nouvelle façon de procéder permettait de diminuer considérablement le temps d'accès aux informations (de 8 fois en moyenne).

⁷⁰⁸ Entre 1956 et 1961, année qui marqua l'arrêt de sa production, plus d'un millier d'unités R.A.M.A.C. furent construites et louées à autant d'utilisateurs. Il n'est peut-être pas inutile de préciser ici que le coût de la location mensuelle d'un système I.B.M. 305 équipé d'une *Disk Storage Unit* s'élevait à 3200 dollars américains de l'époque.

⁷⁰⁹ Amovibilité qui permettait, au moins en droit, de disposer d'une capacité de stockage infinie (comme avec les bandes magnétiques).

⁷¹⁰ Ainsi nommé car il possédait deux ensembles de disques d'une capacité individuelle de 30 mégabits, d'où la référence directe à la célèbre carabine à armement par levier de calibre 30/30.

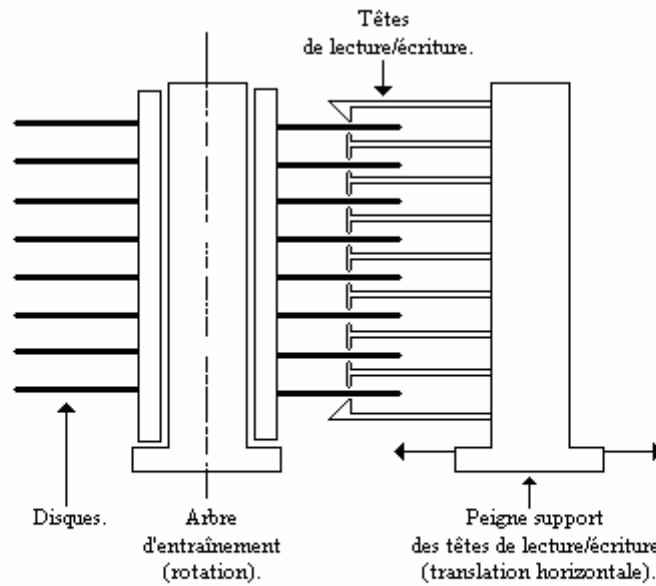


Fig. 27: principe du système d'enregistrement magnétique multidisques/multitêtes (disque dur).

En 1984, l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* a été déclarée *International Mechanical Engineering Landmark* par les membres de l'*American Society of Mechanical Engineers*. Dans l'introduction de la petite brochure commémorative que cette prestigieuse société édita au mois de février 1984 afin de célébrer le système inventé par les ingénieurs d'I.B.M., on pouvait lire la proclamation suivante :

« *It is difficult to overstate the impact the 350's disk technology has had upon the world since its announcement. Making information directly available for computer processing on demand meant that no longer would processors stand idle while searches were made through reels of magnetic tapes or data was punched into card and sorted for processing. Removing these obstacles helped turn the promise of the computer into reality and set the stage for what has come to be called the Information Age. The 350 was the first step in the evolution of many direct access storage devices. It launched a technology that has been improved and refined during the past three decades, but never superseded. In strictly economic terms, the 350 launched a direct access disk industry whose size goes far beyond disk drive hardware sales and into the worlds of high speed-processors, programming and computer services. There is no way to estimate, for example, other hardware, software, and service revenues which would not have been generated if low cost direct access disk devices did not exist. It is sufficient to say that fixed and flexible disk drives alone – all derivatives of the basic 350 technology – generated an estimated \$12.5 billion in sales worldwide in 1983*

*for the 72 manufacturers of fixed disk drives and the 52 manufacturers of flexible disk drives.*⁷¹¹ ».

Il nous semble assez difficile d'imaginer pouvoir exprimer en des termes plus explicites et mieux choisis que ceux-là l'impact réel qu'eurent l'I.B.M. 350 *Disk Storage Unit* et ses nombreuses descendantes sur le secteur informatique dans son ensemble. Dotée d'une capacité d'enregistrement proprement impressionnante (en tout cas pour l'époque), offrant un accès rapide et aléatoire à l'information, peu coûteuse à produire et à exploiter, très fiable, la mémoire auxiliaire mise au point par les chercheurs d'I.B.M. entre 1952 et 1956 conduisit à une véritable révolution dans le domaine du traitement automatique de l'information. Pour un rapport coût/densité d'information stockée relativement intéressant, son mode opératoire inédit autorisait en effet un temps d'accès extrêmement bref à toute séquence de bits donnée, quel qu'ait été pu être par ailleurs l'emplacement spécifique où elle avait été initialement enregistrée. Jusqu'à l'apparition de la *Disk Storage Unit* et des systèmes encore plus performants qui devaient bientôt en être dérivés, les utilisateurs d'ordinateurs n'avaient généralement eu d'autre choix que celui de voir leur précieuse machine provisoirement mais systématiquement immobilisée lors des multiples accès aux données commandés par le programme en cours d'exécution. Rappelons ici que les organes périphériques de stockage des premiers ordinateurs, quant il ne s'agissait pas de tambours magnétiques (ce qui certes impliquait une certaine rapidité d'opération mais aussi une forte limitation en terme de capacité d'enregistrement), étaient constitués soit de dispositifs à cartes perforées, soit de dispositifs à bandes, voire même parfois des deux systèmes simultanément. La vitesse de fonctionnement et le temps d'accès moyen aux informations autorisés par ces deux sortes de mémoires périphériques étant très peu élevés – l'une et l'autre, électromécaniques, travaillaient en mode sériel – ils constituaient fatalement un important facteur de ralentissement pour la machine électronique à laquelle elles étaient rattachés. Or c'est précisément cet obstacle lourdement handicapant que l'I.B.M. *Model 350*, pour la première fois de la courte histoire de l'informatique, permettait de lever. Pour une somme relativement modique, et sans rien sacrifier à la capacité d'enregistrement, à la fiabilité ou à la rapidité d'opération – tout au contraire – il permettait d'optimiser de façon tout à fait spectaculaire l'exploitation de ces machines alors rarissimes et dispendieuses qu'étaient les ordinateurs.

⁷¹¹ « The IBM 350 RAMAC Disk File », *The American Society of Mechanical Engineers*, 27 février 1984, p. 4. Cette petite brochure illustrée de très belles photographies d'époque peut être téléchargée aux formats PDF (5 Mo) et Djvu (517 Ko) à l'U.R.L. suivant : <http://www.asme.org/history/brochure.html>

Ainsi que le soutiennent avec force justesse les rédacteurs du petit livret évocatoire précité, la place occupée dans l'histoire de l'informatique par la *Disk Storage Unit* et, plus généralement, par le disque dur, est à la fois centrale et fondamentale : puisque ces dispositifs à accès aléatoire permettaient d'augmenter singulièrement la vitesse à laquelle les informations pouvaient être écrites et lues par l'ordinateur et qu'en outre, ils autorisaient une diminution phénoménale du coût de son stockage tout en l'accroissant⁷¹², ils devaient contribuer très fortement, au gré de leurs perfectionnements successifs, à la diffusion de l'extraordinaire invention de John Von Neumann dans les domaines scientifiques et commerciaux. Preuve irréfutable de leur excellence et de leur durabilité technologique, aujourd'hui, tous les ordinateurs, qu'ils soient simples PC, stations de travail ou supercalculateurs, sont livrés d'office avec un ou plusieurs disques durs de très grande capacité. Tous les autres systèmes d'enregistrement périphériques conçus à la même époque, à l'exception peut-être des cartouches à bandes magnétiques qui tendent tout de même à se faire de plus en plus rares, ont totalement disparu...

La mise sur le marché, en 1956, du tout premier ordinateur doté d'un disque dur constitua assurément un moment décisif dans l'histoire de l'informatique. Pourtant, contre toute attente, il fallut attendre la seconde moitié de la décennie suivante pour voir ce formidable instrument d'enregistrement commencer à s'imposer. De conception contemporaine, voire légèrement antérieure à celle du R.A.M.A.C., les ordinateurs qui permirent à I.B.M. de conserver sa position de domination dans le domaine des applications commerciales à la fin des années cinquante étaient en fait fort loin d'afficher le même degré d'innovation que lui. Tandis que, sur les grosses machines utilisées dans les centres scientifiques civils ou militaires, l'enregistrement permanent des données devait assez rapidement se voir confié à des lecteurs/enregistreurs de bandes magnétiques (et non à des disques durs), jusque dans la première moitié des années soixante, les petits ordinateurs équipés de lecteurs/perforateurs de cartes constituèrent pour ainsi dire la « norme en vigueur » dans la sphère du business. Il faut bien voir ici qu'I.B.M. peina énormément à faire admettre à ses très nombreux clients la nécessité d'une migration rapide vers l'ordinateur (mutation radicale des méthodes et des habitudes de travail de laquelle dépendait en très grande partie sa survie industrielle à moyen terme). Même l'I.B.M. 650 *Magnetic Drum Calculator*, machine surnommée la « Ford T » de l'informatique tant fut large sa diffusion, ne permit pas

⁷¹² A la fin des années cinquante, un utilisateur de R.A.M.A.C. devait déboursier 130 dollars par mois pour louer un espace de stockage d'un mégaoctet. En 1983, pour disposer de la même capacité, il lui fallait payer un dollar à peine. Au jour où nous écrivons, un disque dur I.B.M. d'une capacité de 80 gigaoctet - 80 milliards d'octets ! - coûte environ 150 euros...

à la firme de T. J. Watson Sr. d'effectuer la percée rapide et générale qu'elle espérait voir se réaliser au départ. En effet, loin d'être accueilli comme la machine « miracle » qu'après tout, il était, l'ordinateur devait se heurter ici à de très vives résistances. A ceci plusieurs raisons différentes dont la plupart relevait en tout premier lieu de préoccupations économiques somme toute fort recevables. En 1958, un utilisateur d'I.B.M. 650 devait déboursier 3250 dollars par mois pour sa location. Aujourd'hui cette somme peut sans doute nous paraître énorme mais au regard de ce que coûtait un ordinateur à l'époque, elle était presque dérisoire. Ce qu'il nous faut retenir ici, c'est que pour le même prix, cet utilisateur pouvait louer *plusieurs* machines à cartes perforées traditionnelles capables d'effectuer le même type de tâches tout aussi bien, si ce n'est mieux que le modèle 650. Ensuite, le *Magnetic Drum Calculator* avait beau être l'ordinateur commercial le plus fiable de son époque, il n'en demeurait pas moins que ses éléments actifs étaient des tubes électroniques. Dans l'absolu, c'est-à-dire à l'épreuve du temps, un instrument électromécanique se révélerait donc toujours plus robuste et fiable qu'il ne pouvait prétendre l'être. Une troisième chose qui a son importance ici est le fait qu'à la fin des années cinquante, I.B.M. ne fournissait presque aucun support logiciel à sa clientèle commerciale : non content d'avoir à payer plusieurs milliers de dollars par mois pour louer un ordinateur, son « possesseur » devait de surcroît engager une équipe de programmeurs – lesquels, comme on dit, ne couraient pas les rues – afin de développer mais aussi de réactualiser les applications spécifiques dont il avait forcément besoin pour pouvoir travailler. C'était là un luxe que seuls les entrepreneurs les plus fortunés, mais aussi les plus aventureux, pouvaient alors s'autoriser. Enfin, les périphériques livrés avec le modèle 650 – lecteurs et perforateurs de cartes, imprimantes – n'étaient en fait que des versions moins performantes des instruments électromécaniques de même type déjà en service. Pour la très grande majorité des clients d'I.B.M., son ordinateur 650 n'apparaissait donc que comme une machine à cartes perforées un peu plus sophistiquée que les autres qui en définitive présentait nettement plus de désagréments qu'elle n'offrait d'avantages réels. Dernière chose, et non des moindres, permettant de comprendre la résistance affichée par ces consommateurs à la pénétration de l'ordinateur sur la scène commerciale, ce que nous conviendrons de nommer ici le facteur « psychologique ». Il nous faut bien voir que des décennies durant, les informations vitales stockées, manipulées et traitées qui par les compagnies d'assurance, qui par les grandes officines gouvernementales et militaires ou encore les gestionnaires de champs de course avaient trouvé dans la carte perforée standardisée leur mode de support unique et privilégié. Loin de constituer un médium de stockage idéal – après tout elles s'usaient rapidement, nécessitaient des espaces conséquents

pour être entreposées, n'étaient pas particulièrement faciles à utiliser et étaient en outre très vulnérables au feu – les cartes perforées offraient néanmoins un avantage absolument considérable : elles *matérialisaient* littéralement les diverses informations dont elles autorisaient à la fois la conservation et la transformation. Ainsi l'opérateur d'une machine à cartes perforées pouvait-il *voir et toucher* les données qu'il manipulait. Pour peu qu'il ait été vraiment expérimenté, celui-ci pouvait même les interpréter « à vue » (tel trou fait à tel emplacement particulier de la carte correspondant par exemple au genre sexuel d'un assuré). L'emploi du support cartonné conférait ainsi à l'information – le « sang » de l'entreprise - une tangibilité, une concrétude qui, si elle s'accompagnait effectivement d'inconvénients nombreux, n'en demeurait pas moins profondément *rassurante* pour ceux dont la survie économique en dépendait directement. Or ce qu'impliquait précisément l'adoption de l'I.B.M. 650 et, plus généralement, celle de l'ordinateur, était la nécessité d'accepter de voir s'opérer une dématérialisation momentanée de cette réalité, une dissolution passagère de cette espèce de solidité informationnelle apparemment si fondamentale sur le plan psychologique. Certes, en amont et en aval du traitement proprement dit, l'information – sous forme de cartes perforées – était toujours là, bien palpable, bien visible. Mais dès lors que les données étaient passées en machine, elles disparaissaient totalement dans les méandres *invisibles* du système informatique où là, à des vitesses dépassant l'entendement humain, elles se voyaient simultanément confiées à la garde de « grains » de matériau magnétique imperceptibles et à celle de fragiles tubes à vide pour le temps que devait durer leur modification automatique. Confronté à la perspective de son exclusion partielle de la boucle du traitement de l'information, à l'évanouissement éphémère des données et à leur réapparition quelquefois incertaine – donc à sa perte de contrôle sur une partie du déroulement des opérations - l'entrepreneur des années cinquante n'avait en fait d'autre alternative ici que celle consistant à accepter de voir s'intercaler entre lui et son « gagne-pain » cet instrument opaque, dispendieux, délicat et difficilement compréhensible qu'était l'ordinateur ou de s'en tenir à ce qu'il connaissait et maîtrisait déjà parfaitement depuis plus d'un demi-siècle: les robustes machines de gestion électromécaniques à cartes perforées. Dans une très large mesure – « seuls » 800 systèmes 650 furent finalement installés dans le monde entier – on s'en tint généralement à cette dernière solution, laquelle, pour les différents motifs que nous venons d'évoquer, semblait de loin être la plus prudente et la plus économique. Ainsi, jusqu'à la fin des années cinquante, la machine de comptabilité électromécanique modèle 407 – un système à cartes introduit en 1949 - demeura le produit phare de la gamme « grand public » d'I.B.M. Les choses commencèrent à changer véritablement quant, au mois d'octobre 1959, I.B.M.

annonça la mise sur le marché imminente d'un tout nouvel ordinateur à vocation commerciale, le modèle 1401 *Data Processing System*. Plus rapide, plus fiable et surtout moins chère que l'I.B.M. 650, cette machine équipée d'un processeur transistorisé et d'une mémoire centrale à tores de ferrite devait permettre à I.B.M. de littéralement écraser ses principaux concurrents industriels entre 1960 et 1965 (notons que c'est à partir de ce moment là que l'on commença à surnommer I.B.M. « Blanche Neige » et ses concurrents les « sept nains »). Les premières livraisons du système informatique 1401 eurent lieu au début de l'année 1960 et son succès – 12000 machines furent finalement arrentées en lieu et place du petit millier initialement conjecturé par le département prévisionnel d'I.B.M. - ne fut rien de moins que fulgurant. Son coût de location extrêmement bas (2500 dollars par mois, soit l'équivalent d'un prix d'achat de 150000 dollars ou celui de la location mensuelle de deux machines de comptabilité modèle 407), n'est pas l'unique facteur permettant de rendre compte de cette colossale réussite. Outre le fait évident qu'il fallait impérativement diminuer le montant de son « loyer » mensuel pour l'imposer – ce qu'ils firent- les gens d'I.B.M. avaient en effet compris que pour faire de l'ordinateur un produit commercialement attractif et psychologiquement rassurant, il fallait que celui-ci, en plus de ses atouts « naturels », dispose également de certaines caractéristiques empruntées aux anciens dispositifs électromécaniques. En se voyant pour ainsi dire répétées dans la structure de la nouvelle machine ces « constantes familières », bien que considérablement améliorées, avaient pour rôle de faciliter la migration de la clientèle vers l'ordinateur et donc de lui éviter un dépaysement professionnel qui autrement aurait été trop brutal, trop déstabilisant, voire même franchement rédhibitoire. L'emploi de « nouveaux » composants, des transistors pour le C.P.U. et des matrices à tores de ferrites pour la mémoire principale, devait tout d'abord conférer au *Data Processing System* 1401 cette fiabilité *sine qua non* qui avait tellement fait défaut à son prédécesseur à tubes et à tambour magnétique. Ensuite la présence en série de périphériques ultra performants mais de type déjà connu sur le modèle 1401, dont une imprimante capable d'écrire 600 lignes à la minute⁷¹³ et des lecteurs/perforateurs de cartes de nouvelle génération, devait contribuer à former cette espèce d'interface « transtechnologique » destinée à rendre plus aisée l'acceptation de l'ordinateur par les utilisateurs de machines classiques de traitement de l'information. Pour une somme très voisine de celle dont il avait du jusque-là s'acquitter afin de louer des dispositifs à cartes perforées, le client « lambda » d'I.B.M. pouvait désormais disposer d'un ordinateur rapide, fiable, et équipé d'organes périphériques perfectionnés dont il maîtrisait déjà pleinement les

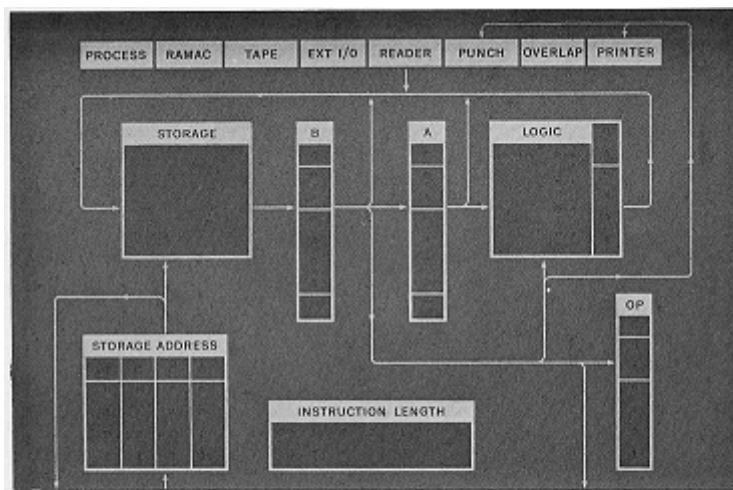
⁷¹³ Il s'agissait de l'I.B.M. *Model* 1403 *Chain Printer*. A simple titre de comparaison, on signalera que le système d'impression de l'*Accounting Machine* 407 n'était capable d'écrire que 150 lignes à la minute.

subtilités du maniement. Il y avait là en même temps réalisation d'un processus de différenciation technologique essentiel – l'ordinateur cessait en quelque sorte d'apparaître comme une machine à cartes perforées de luxe pour devenir ce qu'il était réellement - et affirmation complètement revendiquée d'un certain lien de parenté avec les anciens systèmes (finalement, il n'était pas si éloigné d'eux). Enfin les ingénieurs d'I.B.M. étaient parvenus à résoudre le « point dur » du problème – à savoir la programmation *ad hoc* de l'ordinateur - d'une manière particulièrement originale. Ils mirent en effet au point un générateur d'applications simplifié, le *Report Program Generator* (ou R.P.G.), spécialement conçu afin que les opérateurs familiers du paramétrage par liaisons câblées des machines électromécaniques puissent facilement et rapidement développer leurs propres *business applications*. Etant donné que le R.P.G. reposait sur un système de notation et un ensemble de techniques fort proches de ceux dont ils étaient déjà coutumiers, ces opérateurs ne rencontraient en général aucune espèce de difficulté pour « apprivoiser » très vite l'ordinateur 1401. Ordinairement, une ou deux journées de formation seulement étaient suffisantes pour acquérir une complète maîtrise du *Report Program Generator*. En plus de cela, et puisque ses clients n'étaient pas tous désireux de s'investir dans le domaine de la programmation, I.B.M. devait mettre à leur disposition une bibliothèque de programmes – assurément une des premières du genre - censée répondre aux besoins habituellement rencontrés dans des secteurs professionnels majeurs tels que la banque, l'assurance, la vente au détail ou encore l'industrie de fabrication. Evidemment, il s'agissait d'applications génériques, ce qui supposait que les entreprises particulières qui choisissaient d'y avoir recours étaient fréquemment contraintes de leur apporter des modifications mineures au moyen du R.P.G. en vue de les adapter exactement à leurs besoins spécifiques. Mais tout le monde y trouvait son compte : cette suite logicielle étant fournie *gratuitement* par I.B.M. à ses clients, ceux-ci trouvaient dans l'ordinateur 1401 une machine immédiatement prête à l'emploi tandis que les énormes coûts de développement y afférents étaient totalement pris en charge par la firme de New York (à l'inverse de ses concurrents, elle seule pouvait alors s'autoriser une pareille politique commerciale tant son bassin de clients était important). Le système informatique 1401, bien plus que le *Magnetic Drum Calculator* ou le R.A.M.A.C., est indubitablement celui qui devait faire d'I.B.M. le leader incontesté du marché des ordinateurs commerciaux dans les années soixante. En même temps c'est cette machine qui précipita la disparition des dispositifs à cartes perforées et qui généralisa définitivement l'usage de l'ordinateur dans la sphère économique. Pour un tarif locatif équivalent à celui de deux systèmes électromécaniques de type 407 – le plus populaire à l'époque - l'utilisateur privé pouvait pour la toute première fois

de l'histoire disposer d'un ordinateur fiable, facile à utiliser et à programmer (R.P.G.), qui en outre était nanti d'un répertoire complet d'applications professionnelles offertes gracieusement par son constructeur. De plus, son imprimante 1403 était quatre fois plus rapide que le périphérique de sortie du modèle 407. A coûts d'exploitation égaux, on pouvait donc imprimer deux fois plus de données avec l'I.B.M. 1401 qu'on ne le pouvait en utilisant simultanément deux systèmes 407. Pour parvenir à un rendement équivalent avec les anciennes machines, il eut fallu en employer quatre, ce qui serait revenu deux fois plus cher. Inutile de préciser que face à de tels arguments de vente, l'appréhension ou la méfiance après tout légitimes dont avaient pu faire montre jusqu'ici la plupart des chefs d'entreprises à l'endroit de l'ordinateur se dissipèrent bien vite...

Ainsi que nous l'affirmions déjà plus haut, l'I.B.M. 1401 *Data Processing System* connut un succès commercial absolument sans précédent au début des années soixante (réussite d'ailleurs très largement due aux performances exceptionnelles de son imprimante modèle 1403). Parfaitement représentative de ce que Jérôme Ramunni a pu appeler ailleurs⁷¹⁴ la troisième phase de l'informatique – la première phase correspondant selon cet auteur à la démonstration de la réalisabilité du calcul électronique, la deuxième à la recherche de méthodes et de technologies fiables – cette machine se distinguait non seulement par le fait qu'elle reposait sur de nouveaux types d'éléments pour l'élaboration de sa partie électronique et de sa mémoire principale mais aussi parce qu'en plus d'un langage de programmation facile d'accès et d'applications logicielles diverses, elle était dotée en série de périphériques d'entrée/sortie et de mémoires secondaires particulièrement performants et novateurs. Pourtant, au cours des premières années qui suivirent sa mise sur le marché, aucun disque dur ne devait équiper le *Data Processing System*. C'est très vraisemblablement à partir de 1963-64 que des unités auxiliaires de stockage de ce genre commencèrent à être proposées à titre *optionnel* pour le système 1401.

⁷¹⁴ In [Ramunni, 1989], pp.169-170.



Photographie 1: partie supérieure du panneau de contrôle d'un ordinateur I.B.M. 1401 *Data Processing System*, circa 1965.

La photographie⁷¹⁵ présentée ci-dessus et prise au cours de cette période montre la partie haute du panneau de contrôle d'un I.B.M. 1401. On voit qu'entre les indicateurs « *Process* » et « *Tape* » de sa bande de contrôle supérieure, ce panneau comprenait également un indicateur « RAMAC », lequel permettait de surveiller visuellement l'activité d'un disque dur « *one-arm bandit* » 1405⁷¹⁶.

A la fin des années cinquante, et si l'on excepte le système R.A.M.A.C., les rares ordinateurs équipés de disques durs n'étaient pas à proprement parler des « petites » machines à vocation commerciale. Si l'on songe par exemple aux I.B.M. 7030/*Stretch*, 7070 et 7074, il s'agissait plutôt de superordinateurs à la pointe de la technologie d'alors – tous étant transistorisés et équipés de mémoires internes à tores de ferrite – capables d'effectuer des tâches de gestion et de logistique ou bien spécifiquement dédiés à la réalisation de travaux scientifiques et d'ingénierie. Parmi ces quelques dispositifs, seul l'I.B.M. 7030/*Stretch* ambitionnait en fait de couvrir simultanément ces deux catégories d'activités jusque-là bien distinctes. Ainsi que le résume parfaitement Michael R. Williams, avec le *Stretch*, « *il s'agissait en fait d'unifier les capacités scientifiques des ordinateurs I.B.M. 704 et 709 avec*

⁷¹⁵ Document photographique reproduit ici avec la très aimable autorisation de M. Paul Pierce, collectionneur d'ordinateurs, propriétaire et administrateur du site américain : <http://www.piercef fuller.com/collect/>.

⁷¹⁶ Le disque dur de type 1405 était en fait une version améliorée de la *Disk Storage Unit 350* du R.A.M.A.C. Proposé en deux versions différentes, le *Model I* (25 disques) et le *Model II* (50 disques), il doublait ou quadruplait – selon le cas – la capacité de stockage du modèle 350. Utilisé pour la première fois à la fin de l'année 1962 sur le système de recherche de données informatisé de la C.I.A. (« *Walnut* »), il fut ensuite proposé à la location pour servir de mémoire secondaire à divers ordinateurs commerciaux de marque I.B.M., dont le modèle 1401 et son successeur, le 1410. On sait également qu'un peu plus tard, un disque dur amovible, l'I.B.M. 1311, fut également mis sur le marché pour l'ordinateur 1401.

*les capacités de traitement de données propres au système 705*⁷¹⁷ ». Comme on le sait, le projet *Stretch*, démarré au mois d'août 1955, se solda par un échec commercial cuisant. Cependant, et c'est bien ce que sa dénomination un peu insolite était censée dénoter, sa conception permit de faire considérablement progresser le *state of the art* de la technologie informatique. Grâce à cette machine formidablement ambitieuse – elle devait être la plus rapide de son époque – des progrès notables purent être enregistrés dans le domaine des mémoires à tores de ferrite ainsi que dans celui des transistors et de leur *packaging* (notamment grâce à la définition de la norme *Standard Modular System*, une nouvelle manière de fabriquer et de présenter les transistors qui autorisait l'automatisation de leur production en masse ainsi que leur maintenance à bas coûts). Il fallut en réalité attendre avril 1964, et l'annonce officielle de la mise sur le marché imminente de la gamme d'ordinateurs I.B.M. *System/360*⁷¹⁸ pour voir les deux grandes familles de machines – les scientifiques et les commerciales – commencer à se rejoindre vraiment. Héritiers technologiques du *Stretch*, les ordinateurs 360 se caractérisaient par leur intercompatibilité et leur compatibilité descendante avec certaines machines introduites antérieurement (notamment le système 1401 et son successeur, le 1410), ainsi que par leur modularité. Comprendre que l'acquéreur, ou plutôt le « locataire », d'un ordinateur 360 pouvait choisir à la carte les équipements d'entrée/sortie dont il souhaitait le voir spécifiquement pourvu au moment de sa livraison. Bien entendu, au fur et à mesure de l'évolution de ses besoins, l'utilisateur bénéficiait d'une totale liberté pour ajouter et/ou retirer d'autres dispositifs auxiliaires. Au nombre de ces derniers figuraient des lecteurs/perforateurs de cartes, des imprimantes, des lecteurs/enregistreurs de bandes magnétiques et plusieurs disques durs, notamment les modèles 2302 et 2311 *Disk Storage Drive*, affichant des performances et des caractéristiques techniques diverses. C'est au travers de l'énorme succès commercial rencontré par les machines de la série 360 que le disque dur, un dispositif dont la diffusion était restée jusqu'ici relativement confidentielle, commença à s'imposer comme un instrument d'enregistrement incontournable dans les sphères de la recherche scientifique et du *business*. Pourtant sa soudaine montée en puissance ne devait pas être synonyme de domination absolue. En effet, pendant de très longues années, le disque dur, mémoire secondaire fiable, performante, rapide et abordable eut encore à partager la « vedette » avec les lecteurs/enregistreurs de bande magnétiques, lesquels, même s'ils étaient

⁷¹⁷ In [Williams, 1997], p. 394.

⁷¹⁸ A l'origine, la famille d'ordinateurs *System/360* comprenait six modèles différents : le 30, le 40, le 50, le 60, le 62 et le 70. Plus le nombre désignant une machine donnée était élevé, plus importants étaient sa puissance, sa mémoire et ses équipements auxiliaires. Nous reviendrons sur le rôle fondamental du *System/360* ainsi que sur ses liens étroits avec le *Stretch* un peu plus tard.

moins chers que ce dernier, étaient tout de même plus lents et moins robustes. Comprendre les raisons profondes de cette situation impose que nous nous tournions à présent vers l'étude de ces systèmes afin d'en mettre en lumière les atouts et les inconvénients.

2.2.8.4.7. Les dispositifs auxiliaires de stockage à bandes magnétiques.

Quiconque a eu la chance de posséder un micro-ordinateur au cours de la première moitié des années 80 ne manquera certainement pas de se souvenir que sur la plupart de ces petites machines, il était nécessaire de recourir à un magnétophone à cassettes audio⁷¹⁹ pour charger et enregistrer les programmes qui leur étaient destinés (un simple cordon muni d'une prise DIN à sept broches et de trois jacks de commande permettait généralement de connecter un magnétocassette à un micro-ordinateur). Tout sentiment de nostalgie mis à part, il nous faut bien reconnaître avec le recul que cette modalité de stockage était en fait tout aussi malcommode qu'elle pouvait se révéler intéressante sur le plan financier (les cassettes n'étaient vraiment pas très chères). A de rares exceptions près, le « poids » moyen des programmes écrits à cette époque n'excédait pas quelques dizaines de kilooctets (pour des mémoires internes allant de 1 à 48 Ko). Ainsi, et afin d'éviter tout gaspillage de place inutile, il était fréquent que concepteurs et éditeurs d'applications enregistrent plusieurs programmes sur une seule et même cassette. Le mode opératoire de ce médium de stockage étant sériel – en temps normal la bande magnétique se déroulait régulièrement depuis son secteur d'amorce jusqu'à son secteur final – l'utilisateur disposait de deux méthodes (éventuellement cumulables) pour trouver ou retrouver un programme particulier parmi tous ceux qui avaient pu être inscrits sur une cassette donnée : soit le magnétophone disposait d'un compte-tours analogique et là, il lui fallait consigner par écrit les chiffres ou les nombres correspondant à l'emplacement physique de ce programme sur la bande de façon à pouvoir le retrouver facilement par la suite⁷²⁰, soit il n'en possédait pas et il lui fallait alors se fier à sa seule oreille pour en découvrir les séquences de départ et de fin. En phase de lecture, cette procédure d'identification ou de triage ne présentait d'autre inconvénient que celui d'être terriblement

⁷¹⁹ Quelques fabricants devaient proposer des cassettes spécialement conçues pour l'informatique. En fait seule leur durée, 5, 10, 15 ou 30 minutes, permettait de les distinguer des cassettes audio ordinaires (60 ou 90 minutes).

⁷²⁰ Ce qui supposait que l'on cale systématiquement le compte tour du magnétocassette sur la valeur 000 en tout début de bande. Le premier nombre servait à signaler le début du programme, le second à indiquer sa fin. Par mesure de sécurité, on laissait habituellement la bande se dévider de quelques tours (de quelques « chiffres »), entre deux programmes afin de prévenir tout risque de superposition accidentelle.

lente (pour compenser cela, on pouvait d'ailleurs toujours essayer de « jouer » avec les touches Rwd et Fwd du magnétocassette). En phase d'écriture en revanche, il fallait se montrer extrêmement précautionneux car tout manquement aux règles de base (*e.g.* réglage erroné du compte-tour, mauvaise « interprétation auditive » du signal sonore, erreur de face lors de l'insertion de la cassette dans son compartiment), aboutissait souvent à un positionnement de la tête magnétique de l'appareil sur un segment de bande déjà usité et se soldait donc presque obligatoirement par un écrasement et une perte des données antérieurement enregistrées. Il ne s'agissait pas là, on s'en doute, du seul et unique défaut présenté par les cassettes audio. Relativement fragiles, celles-ci avaient fâcheusement tendance à se dévider ou à se démagnétiser accidentellement si l'on n'y prenait pas garde. De plus il n'était pas rare que la tête du magnétophone s'encrasse au point de rendre difficile, voire impossible, tout processus de lecture ou d'enregistrement (d'aucun se souviendront que l'utilisation d'un coton tige imbibé d'alcool à 90° ou d'une cassette spéciale de nettoyage permettait généralement de remédier à cela). Il arrivait même quelquefois qu'une cassette enregistrée avec tel magnétophone ne puisse être lue avec tel autre et inversement, cela dépendait essentiellement de la façon dont avaient été réglées leurs têtes respectives. En contrepartie ce médium offrait un rapport coût/densité de stockage extrêmement intéressant. D'une part les magnétophones étaient des produits de grande consommation qui, en plus de pouvoir servir accessoirement en micro-informatique, pouvaient également et surtout être utilisés pour écouter ou enregistrer diverses sortes de séquences sonores (de la musique, des notes, etc.). D'autre part, et à cause de cette polyvalence justement, on trouvait des cassettes audio quasiment partout. Enfin, leur compacité autorisait un entreposage aisé et puisqu'elles étaient interchangeables, on disposait avec elles d'un espace de stockage théoriquement infini.

Si l'on s'en tient à la considération de leur seul principe d'opération, et non à celle de leurs dimensions ou de leur niveau de performances particulier, force est de constater que les magnétophones et les cassettes que nous utilisions jadis pour charger et enregistrer les programmes de nos micro-ordinateurs ne différaient guère des lecteurs/enregistreurs et des bobines à bande magnétique qui, dès l'apparition des premiers ordinateurs, commencèrent à être employés pour délivrer ou conserver les données nécessaires à leur fonctionnement. La mise en application de l'idée consistant à recourir à une bande magnétique pour stocker des informations codées là où, autrefois, on avait exclusivement employé des cartes perforées est due à Presper J. Eckert et à John W. Mauchly. Quelques années avant l'éclatement de la deuxième guerre mondiale, on sait toutefois que Ralph L. Palmer, alors superviseur du laboratoire d'électricité I.B.M. à Endicott, avait dirigé quelques projets de recherche visant à

explorer et à définir les capacités de stockage propres à diverses sortes de supports magnétisables. Dans cette perspective, son équipe et lui devaient tout particulièrement s'intéresser aux cartes, aux bandes et aux tambours magnétiques (et dans une moindre mesure à la photo détection de points imprimés sur des pièces cartonnées). L'entrée en guerre des Etats-Unis mit un terme prématuré aux recherches de Palmer - lesquelles avaient d'ailleurs été plus tolérées que réellement encouragées par ses supérieurs - permettant ainsi aux systèmes à cartes perforées de régner sans partage pendant plusieurs années encore sur les scènes du calcul et du traitement automatisés de l'information. Cependant une chose demeure parfaitement assurée : en 1937-38, certains chercheurs d'I.B.M. avaient déjà commencé à travailler sur le principe de la sauvegarde et de la lecture d'informations au moyen de dispositifs à bandes magnétiques. Evidemment puisqu'à cette époque l'ordinateur n'existait pas, on cherchait - sans y consacrer trop de ressources non plus - à développer des systèmes susceptibles de venir remplacer un jour les lecteur/perforateurs de cartes équipant la totalité des machines produites par I.B.M. Pourtant, une fois la paix restaurée (et les grands principes logiques de l'E.D.V.A.C. rendus publics par Von Neumann et Goldstine), les gens d'I.B.M. ne cherchèrent pas vraiment à tirer partie des résultats des travaux précurseurs que Palmer et son groupe avaient conduits avant-guerre. Nous avons déjà longuement insisté sur le conservatisme féroce qui caractérisait alors la Maison I.B.M. Dominant outrageusement, et depuis fort longtemps, les secteurs du traitement de l'information et du calcul scientifique avec ses « *business machines* » et ses calculateurs électromécaniques ou électroniques, la firme dirigée par T. J. Watson Sr. s'était peu à peu élevée à une position quasi monopolistique dans ces deux domaines notamment grâce à la vente massive de cartes perforées, lesquelles étaient bien entendu absolument nécessaires au fonctionnement de ces deux familles voisines d'instruments. Pour les hauts responsables d'I.B.M., cette situation de rente obligée présentait assurément tous les signes d'une inébranlabilité, d'une immuabilité, que rien ne semblait pouvoir venir sérieusement bousculer. Les machines du géant américain étant omniprésentes dans le monde entier, la pérennité de leur écrasante hégémonie et surtout la vente de consommables extrêmement rentables leur apparaissaient donc comme des choses allant complètement de soi. Pendant un temps au moins, il est certes vrai qu'on envisagea chez I.B.M. la possibilité de mettre au point des instruments de bureau et de laboratoire utilisant des systèmes d'entrée/sortie à bandes magnétiques en lieu et place des classiques lecteurs/perforateurs de cartes. Pourtant cette voie technologique assurément novatrice devait assez rapidement se voir écartée. Les traditionnels équipements à cartes perforées permettaient en effet de réaliser très bien des fonctions telles que la sauvegarde, la restitution,

le triage, la collation d'informations ou encore les opérations arithmétiques élémentaires - toutes bien sûr essentielles dans le cadre de tâches telles que l'établissement des registres salariaux, des inventaires, des polices d'assurance ou des recensements – pour un coût d'exploitation somme toute fort intéressant. Pourquoi, dans ce cas, songer à leur apporter des modifications techniques radicales et, du même coup, bouleverser les habitudes bien ancrées d'une clientèle commerciale ou scientifique déjà nombreuse et solidement fidélisée ? Pourquoi, pour formuler cela encore autrement, les dirigeants d'I.B.M. auraient-ils pris ici le risque de « scier la branche » sur laquelle ils se trouvaient « confortablement assis » depuis si longtemps ? Vouloir substituer aux habituelles cartes perforées un nouveau médium de stockage, quand bien même aurait-il été réellement performant, revenait dans l'absolu à remettre en question la garantie d'une source de revenus absolument considérable sans assurance aucune de retrouver après-coup la position d'hégémonie économique antérieurement occupée. Dans ce cas, on le comprend, mieux valait alors préserver le *statut quo*, privilégier le standard consacré et renoncer par là même à introduire de la nouveauté. En réalité, T. J. Watson Sr. et ses équipes d'ingénieurs ne comprirent pas en quoi les bandes magnétiques pouvaient se révéler supérieures aux cartes perforées et échouèrent dans le même temps à saisir l'essence, et donc la portée véritable, qui étaient celles de la récente invention de Von Neumann. Ils ne virent pas que l'ordinateur – le *computer* comme on avait commencé à le désigner quelque peu trompeusement – n'était pas seulement un calculateur démesurément puissant mais qu'à l'instar de la plupart des machines I.B.M., il était aussi et surtout un instrument destiné à traiter de l'information. Pour eux, une tâche mécanographique typique, qu'elle ait été du reste de nature administrative ou scientifique, se résumait *grosso modo* à la suite d'opérations suivante : prendre une séquence d'informations ordonnée d'une certaine manière, la passer en machine, et obtenir en sortie une séquence informationnelle ordonnée différemment (par exemple par ordre alphabétique alors qu'initialement elle ne l'était pas). Herman Hollerith, en son temps, avait compris que pour faire cela, l'usage de cartes perforées serait beaucoup mieux adapté que celui de bandes de papier (essentiellement pour des raisons de robustesse, de maniabilité et de rangement...). Thomas J. Watson Sr., fort des recommandations de ses conseillers, parvint peu ou prou aux mêmes conclusions que celles auxquelles son illustre prédécesseur était arrivé avant lui à propos des bandes de papier sachant que si les bandes magnétiques ne furent pas jugées ici inférieures aux cartes perforées, on ne les considéra pas non plus comme leur étant techniquement supérieures. On estima donc que le projet de coupler des lecteurs/enregistreurs de bandes magnétiques (ou *tape drives*) aux machines I.B.M. existantes, lesquelles faisaient déjà très bien leur travail, n'apporterait aucun

bénéfice substantiel à l'entreprise. En outre, en tentant d'imposer aux clients un nouveau support d'enregistrement, on risquait fortement de se heurter à une résistance tout à fait légitime de leur part étant bien entendu qu'habités depuis très longtemps à utiliser des équipements à cartes, ils risquaient de voir arriver d'un très mauvais œil des systèmes forcément plus coûteux et pas nécessairement plus performants que ceux auxquels ils étaient déjà accoutumés. Une autre chose qui jouait ici lourdement en la défaveur de l'introduction des bandes magnétiques était le fait que la totalité des informations manipulées à l'époque par les entreprises privées, les grandes officines gouvernementales ou les centres de recherches étaient enregistrées sur des cartes. Or puisqu'il n'était pas question ici de faire *tabula rasa* des pratiques courantes des utilisateurs ni non plus de renoncer à la formidable manne financière que représentait la vente des cartes perforées – il eut fallu être suicidaire pour envisager sérieusement le contraire - des calculateurs ou des instruments de traitement de l'information classiques équipés de lecteurs/enregistreurs de bandes auraient impérativement exigé que l'on emploie à leur entrée et à leur sortie des convertisseurs cartes/bandes et bandes/cartes de manière à pouvoir transférer indifféremment le contenu informationnel d'un type de support à l'autre. C'était là bien sûr une disposition particulière qui n'aurait pas manqué d'entraîner pour ces différentes structures un accroissement de leur temps de travail ainsi qu'une augmentation du prix de la location de leurs appareils (en raison de la nécessaire adjonction de tels transducteurs). De plus, et sans qu'elles soient assurées d'y trouver un quelconque avantage concret, elles auraient désormais été contraintes d'acquérir deux sortes de médium d'enregistrement alors qu'autrefois un seul suffisait. C'est essentiellement à cause de cela – et non pour des motifs techniques puisqu'au sortir de la deuxième guerre mondiale cette technologie était déjà pleinement opérationnelle - que la direction d'I.B.M. prit finalement la décision de ne pas proposer à sa clientèle des machines dotées de lecteurs/enregistreurs de bandes. On se gardera bien d'affirmer qu'I.B.M. commit ici une erreur de stratégie : après tout, quant on examine les choses de près, il est vrai que le projet d'utiliser des systèmes de stockage à bandes magnétiques avec des machines mécanographiques traditionnelles présentait plus d'inconvénients et de risques commerciaux pour cette firme qu'il n'était susceptible de lui apporter un quelconque bénéfice. Il en allait cependant tout autrement si l'on envisageait de les employer avec un ordinateur...

Ainsi que nous l'avons déjà indiqué plus haut, après la guerre, I.B.M. tarda à s'investir réellement dans le secteur naissant des ordinateurs. Bien qu'en 1948-49, deux petits ordinateurs – la *Tape Processing Machine* et le *Magnetic Drum Calculator* – aient effectivement été à l'étude dans le laboratoire de Ralph L. Palmer à Poughkeepsie, il fallut

néanmoins attendre le début de la guerre de Corée, et avec celui-ci la mise en chantier du *Defense Calculator* (I.B.M. 701), pour voir le leader mondial du traitement de l'information commencer à amorcer ce qui devait finalement constituer un des virages les plus importants de toute son histoire. Et encore ! De l'aveu même de Thomas J. Watson Jr., au moment même où la construction du *Defense Calculator* débutait (1951), on n'avait pas encore véritablement compris chez I.B.M. quel était le potentiel réel de l'ordinateur. Pour le plus grand nombre, il s'agissait en fait d'un supercalculateur électronique – tout comme l'E.N.I.A.C. et le S.S.E.C.– et non d'une machine à traiter l'information également capable d'effectuer un grand nombre de transformations mathématiques complexes en très peu de temps. Le coup de semonce décisif qui, en 1951, devait définitivement faire émerger I.B.M. de sa « torpeur technologique » provint de l'*Eckert-Mauchly Computer Corporation* et de son U.N.I.V.A.C. I. (en fait de la *Remington Rand* puisque l'E.M.C.C. avait été rachetée par ce concurrent direct d'I.B.M. au mois de mars 1950).

Les co-inventeurs, avec John Von Neumann, de l'E.N.I.A.C. et de l'E.D.V.A.C. furent comme on le sait les premiers à prendre la pleine mesure du potentiel commercial que recelait l'ordinateur. Pour avoir plus que largement contribué au processus de sa conceptualisation en 1945 - on a malheureusement souvent tendance à oublier cela quant on évoque la rédaction du *First Draft of a Report on the EDVAC* - Presper J Eckert et John W. Mauchly savaient pertinemment que le pouvoir de l'ordinateur ne se limitait pas seulement à son extraordinaire puissance de calcul. Cet instrument d'un tout nouveau genre, ils en avaient parfaitement conscience, était en effet bien plus qu'un formidable calculateur : il s'agissait avant toute chose d'une *machine universelle*. Compte tenu de cela, et puisque les plans de l'ordinateur, suivant la volonté de Von Neumann et au grand dam des deux hommes, avaient été versés au domaine public, ils estimèrent qu'il n'y avait aucune espèce de raison pour accepter de voir sa diffusion restreinte à quelques rares centres de recherche scientifique. Eckert et Mauchly, à l'inverse de Von Neumann et de Goldstine, souhaitaient en effet rentabiliser financièrement « leur » invention. On a souvent tendance à souligner le caractère noble, désintéressé, des sentiments qui animaient Von Neumann par rapport à cette question et à réprover dans le même temps les visées mercantiles que nourrissaient Eckert et Mauchly vis-à-vis de l'ordinateur. Mais si les deux américains ne s'étaient pas engagés dans cette entreprise somme toute très hasardeuse dans la seconde moitié des années quarante, d'autres, assurément, auraient certainement sauté le pas : de fait, en 1950 et sur la base de la *Manchester Machine*, le britannique Ferranti se lançait dans la construction du *Ferranti Mark I* (ou *Manchester Electronic Computer Mark II*), le tout premier ordinateur commercial anglais. L'ordinateur

étant par essence une machine à traiter de l'information – chose absolument essentielle que n'avaient pas encore compris les dirigeants d'I.B.M. - Eckert et Mauchly se rendirent compte qu'il était tout aussi bien susceptible d'intéresser ces utilisateurs majeurs de machines mécanographiques qu'étaient les gouvernements et les grandes entreprises privées. A un moment où aucun prototype d'ordinateur scientifique n'avait encore vu le jour, l'idée consistant à fabriquer et à louer des ordinateurs à vocation commerciale pouvait certes paraître incroyablement audacieuse, formidablement risquée, voire même irrémédiablement vouée à l'échec. Pourtant, même s'ils connurent nombre de déboires financiers avec leurs différentes sociétés, l'histoire allait rapidement donner raison aux deux visionnaires américains: il existait bel et bien un marché civil pour l'ordinateur. En vérité, ce devait même être une des niches économiques - nous devrions plutôt dire ici une des industries - les plus florissantes à avoir jamais été dans l'histoire de l'humanité. Nous reviendrons un peu plus tard sur l'aventure – car c'en fut bien une – de l'*Electronic Control Company* et de l'*Eckert-Mauchly Computer Corporation*. Pour l'heure ce qui nous intéresse vraiment ici est le fait qu'Eckert et Mauchly furent les premiers à avoir l'idée d'utiliser des lecteurs/enregistreurs de rubans magnétiques sur un ordinateur. L'intuition géniale qu'eurent les deux hommes peut être résumée de la sorte : il était possible de charger dans la mémoire interne d'un ordinateur une séquence informationnelle enregistrée sur bande magnétique, de réarranger automatiquement ces informations dans la mémoire, puis de réenregistrer le résultat de cette transformation sur un autre ruban en sortie de machine. Bien entendu, de nombreuses « allées et venues » entre ces bandes pouvaient être requises avant que la totalité des informations que l'on désirait voir ordonnées ou calculées soit traitée. On peut alors très légitimement s'interroger sur les avantages réels que pouvait présenter un tel mode opératoire. Après tout le tout-puissant I.B.M. n'avait-il pas renoncé quelques temps auparavant à employer des systèmes à bandes sur ses machines de bureau et ses calculateurs, leur préférant les habituels lecteurs/perforateurs de cartes ? Ce qu'il faut bien voir ici, c'est qu'à la différence des machines mécanographiques traditionnelles, l'ordinateur disposait d'une *mémoire interne* et qu'en raison même de cela, il était *programmable*. En d'autres termes toutes ces opérations – chargement du contenu de la bande magnétique d'entrée dans la mémoire centrale de l'ordinateur, traitement des données, déchargement du contenu de la mémoire interne sur la bande de sortie, bascule d'un lecteur/enregistreur de bandes à l'autre, etc. – pouvaient se voir confiées à un programme de contrôle et donc être réalisées de manière totalement automatique aux extraordinaires vitesses permises par l'électronique. En outre, les lecteurs/enregistreurs de rubans magnétiques offrant un taux de transfert de l'information

nettement plus élevé que celui des lecteurs/perforateurs de cartes, l'ensemble de ce processus ne pouvait s'en trouver que considérablement accéléré. Preuve était donc faite qu'il était tout à fait possible – et même souhaitable - de substituer aux systèmes à cartes des dispositifs à bandes. Le tout était d'employer ces derniers avec un ordinateur.

Curieusement la première machine produite par l'*Eckert-Mauchly Computer Corporation*, qui fut également la première de l'histoire à recevoir une mémoire auxiliaire à bandes magnétiques, n'était pas un ordinateur commercial mais un système informatique militaire. Construit pour le compte de la *Northrop Aircraft Company* à partir d'octobre 1947, le B.I.N.A.C. - pour BINary Automatic Computer - devait servir au guidage du *Snark* (ou N-25), un engin balistique appartenant à la famille des missiles de type G.L.C.M. (*Ground-Launched Cruise Missile*). Dans *La physique du calcul*, Jérôme Ramunni a donné une excellente description du B.I.N.A.C. : « *Sa conception, écrit-il, était révolutionnaire : il s'agissait en effet de deux ordinateurs, c'est-à-dire de deux unités de calcul et de deux mémoires qui, tout au long des opérations, procédaient en parallèle pour vérifier, par la confrontation des résultats, le bon fonctionnement de l'ensemble en pariant sur le fait qu'une même défaillance, sur un même composant et en même temps, avait une probabilité extrêmement réduite de se produire*⁷²¹ ».

Comme a pu le souligner encore cet auteur, le B.I.N.A.C. était en avance sur son temps ; ne lui manquait finalement que la miniaturisation (il fut livré à la *Northrop* en septembre 1949, soit presque deux ans après l'invention du transistor par les chercheurs des *Bell Labs*). Outre le fait qu'il disposait d'une architecture massivement redondante autorisant une comparaison automatique du résultat des calculs – une précaution bien utile quant il est question de guider un missile de croisière – le B.I.N.A.C. avait ceci de tout à fait étonnant qu'il s'agissait d'un ordinateur *embarqué*. Ces deux dernières caractéristiques – contrôle du vol d'un vecteur militaire aérien et installation à bord d'un aéroplane – impliquaient bien entendu le respect draconien d'un certain nombre de contraintes. Tout d'abord, et nonobstant le fait qu'il s'agissait d'un double ordinateur, ses dimensions physiques devaient rester relativement modestes de façon à ce qu'il puisse être logé à l'intérieur de la carlingue d'un avion militaire (très vraisemblablement un B-29 spécialement aménagé pour la circonstance). Ensuite sa fonction très particulière, on le comprend, exigeait de lui qu'il soit extrêmement rapide (même si le travail en temps réel n'était pas encore à l'ordre du jour). Equipé d'une mémoire interne à lignes délai au mercure d'une capacité de 512 mots de 31 bits, de deux

⁷²¹ In [Ramunni, 1989], pp. 95-96.

processeurs à tubes à vides (1400 tubes au total), le B.I.N.A.C. était capable d'effectuer 3500 additions et soustractions ou 1000 multiplications et divisions à la seconde. La place occupée par la machine et sa vitesse d'opération constituant ici, bien plus qu'ailleurs, des facteurs contraignants absolument cruciaux, Eckert et Mauchly choisirent ne pas utiliser de systèmes à cartes perforées pour fabriquer les mémoires auxiliaires du B.I.N.A.C. Fidèles à leur idée de départ, ils leur préférèrent des lecteurs/enregistreurs de rubans magnétiques, des dispositifs certes tout aussi volumineux que les lecteurs/perforateurs de cartes mais de loin beaucoup plus rapides que ces derniers. De toute façon, le volume restreint dans lequel l'ordinateur devait trouver place ne permettait pas que l'on recoure à ces deux types d'instruments simultanément (chose qui sera faite un peu plus tard avec l'U.N.I.V.A.C. I). C'était là assurément une première technologique car les périphériques de stockage de l'*Electronic Delay Storage Automatic Calculator* de Maurice Wilkes – l'ordinateur anglais qui devait ravir au B.I.N.A.C. le titre de « premier ordinateur de l'histoire » de quelques mois seulement - étaient des lecteurs/perforateurs de bande papier et des téléimprimeurs électromécaniques, non des dispositifs exploitant les propriétés magnétiques de certains matériaux. En dépit de son caractère singulièrement novateur et du sérieux qui présida indubitablement à son élaboration, le B.I.N.A.C. ne fut pas une réussite: sa construction dura bien plus longtemps que prévu tandis que les coûts liés à son développement dépassèrent très largement la somme qui avait été convenue à l'origine dans le contrat signé par l'E.M.C.C. et la *Northrop Aircraft Company*⁷²². En outre, son niveau de fiabilité était loin d'être un modèle du genre. Certains commentateurs ont ainsi pu affirmer qu'il n'était pleinement opérationnel qu'une heure par semaine. On ne sera donc pas surpris d'apprendre ici que la *Northrop* n'utilisa jamais le B.I.N.A.C. pour le guidage de son missile Snark... Quoiqu'il en soit, si le B.I.N.A.C. peut dans une très large mesure se voir qualifier d'insuccès technologique, on ne saurait en revanche dire de lui qu'il fut synonyme d'échec total pour la petite entreprise fondée par Eckert et Mauchly. D'une part, et ce n'est pas une moindre chose dans un secteur où tout restait encore à faire, il permit à l'*Eckert-Mauchly Computer Corporation* d'établir fermement sa réputation de constructeur civil d'ordinateurs. D'autre part, il convient également de se souvenir que dans la courte histoire de l'E.M.C.C., la construction du B.I.N.A.C. ne représentait qu'une sorte d'épisode transitoire (et coûteux), et non une fin en soi. A l'origine, Eckert et Mauchly avaient en effet constitué leur affaire dans un but bien précis : produire un

⁷²² Initialement le B.I.N.A.C. devait coûter 100000 dollars. Il en coûta finalement 278000, ce qui conduisit l'E.M.C.C. au bord de la banqueroute et contraint Eckert et Mauchly à céder leur affaire à la *Remington Rand* en 1950.

ordinateur commercial de type E.D.V.A.C., l'U.N.I.V.A.C., dont le principal trait distinctif était qu'il devait être équipé de mémoires auxiliaires à rubans magnétiques (également envisagée pour l'E.D.V.A.C., cette solution fut finalement écartée en raison de trop grandes difficultés techniques). Fin 1946, les deux associés approchèrent plusieurs gros clients potentiels, dont l'U.S. *Census Bureau* et le *National Bureau of Standards*, lesquels se montrèrent vivement intéressés par leurs propositions. Il résulta de ces négociations un contrat préliminaire portant sur l'étude des tubes à retard au mercure et sur la possibilité de construire un U.N.I.V.A.C. pour chacune de ces deux institutions à la seule condition qu'un prototype opérationnel de cette machine existât déjà. Ce prototype, qu'Eckert et Mauchly n'avaient absolument pas les moyens de réaliser par eux-mêmes, devait être le B.I.N.A.C. (ainsi l'armée, ou plutôt un de ses sous-traitants, contribua-t-elle indirectement à faire démarrer l'industrie informatique civile). Le B.I.N.A.C., nous l'avons déjà dit ne fut certes pas une réussite. Toujours est-il que sa présentation officielle consacra l'E.M.C.C. et que plusieurs contrats portant sur la production d'U.N.I.V.A.C. - en plus de ceux déjà passés avec le *Census Bureau* et le N.B.S. - purent être signés avec divers partenaires quelques temps après cette cérémonie. Ce fut là un bien curieux retournement de situation puisque la machine qui avait conduit l'E.M.C.C. au bord de la faillite était celle-là même sur laquelle se fondait désormais sa toute nouvelle notoriété. Tout aussi important que cela, si ce n'est plus, était le fait que le B.I.N.A.C. avait pour ainsi dire servi de banc-test grandeur nature aux idées révolutionnaires d'Eckert et Mauchly. Cette machine devait ainsi permettre de prouver que le principe consistant à lire et à enregistrer des informations sur une bande magnétique était parfaitement viable. Elle devait également permettre de démontrer que ce nouveau médium de stockage offrait un rapport coût/performances supérieur à celui des dispositifs à cartes perforées. Pour la construction de leurs U.N.I.V.A.C., Eckert et Mauchly ne manquèrent pas de tirer une leçon importante de l'expérience que leur avait apportée le B.I.N.A.C. Le *converter*, ainsi que se nommait l'unité de lecture/écriture de cette machine, utilisait en effet des bandes magnétiques audio dont le substrat était constitué en mylar (une nouveauté à l'époque). Puisqu'ils étaient soumis en quasi permanence à d'importantes contraintes mécaniques – il le fallait bien pour être en mesure d'acquérir et d'enregistrer une grande quantité de données à très haute vitesse - ces rubans de matière plastique avaient toutefois tendance à se distendre exagérément avec le temps et donc à provoquer de plus en plus d'erreurs lors des multiples accès en lecture ou en écriture commandés par la machine. Un défaut de ce genre ne pouvant raisonnablement être toléré sur un ordinateur tel que l'U.N.I.V.A.C. – le montant total des contrats passés entre l'E.M.C.C. et ses divers clients s'élevait tout de même ici à 1,2 million de dollars – Eckert et

Mauchly décidèrent de monter un petit laboratoire de chimie afin de développer des bandes magnétiques spéciales pour leur nouvelle machine. Ils mirent finalement au point un ruban de bronze enrobé de nickel d'un demi pouce de large qui permettait de stocker 128 caractères alphanumériques par pouce et d'atteindre une vitesse de transfert de 12800 caractères en entrée et en sortie de machine sans risques d'étirement ou de rupture aucuns. Dans le même temps, ils perfectionnèrent le lecteur/enregistreur de bandes qu'ils avaient construit pour le B.I.N.A.C. en lui ajoutant des servomoteurs plus puissants que ceux précédemment employés : les nouvelles bandes métalliques étant forcément plus solides mais aussi plus massives que les anciens rubans en mylar, ce dispositif – qu'ils nommèrent UNISERVO - permettait donc de les mettre en branle et les stopper quasi instantanément en fonction du déroulement du programme exécuté, nonobstant l'inertie due à leur poids assez important. Enfin, et ceci témoigne parfaitement de la compréhension profonde qu'Eckert et Mauchly avaient du marché du traitement de l'information des années cinquante, ils conçurent pour l'U.N.I.V.A.C. un certain nombre de périphériques additionnels qui autorisaient : 1°) la copie du contenu d'une bande magnétique sur une autre bande ; 2°) l'enregistrement direct d'informations (programmes ou données) sur une bande via une machine à dactylographier électrique (la saisie s'opérant ici manuellement) ; 3°) le transfert automatisé du contenu d'une bande de papier perforée à une bande magnétique et inversement ; 4°) le transfert automatisé des données stockées sur cartes perforées sur rubans magnétiques et inversement. De tous ces systèmes, le dernier était très certainement le plus intéressant et surtout le mieux « senti » sur le plan de la stratégie d'implantation commerciale de l'E.M.C.C. En matière de stockage, les cartes perforées, nous l'avons vu, constituaient le standard absolu de l'époque et ce tant dans le domaine du calcul scientifique que dans celui du traitement de l'information. Proposer, pour l'U.N.I.V.A.C., un convertisseur automatique cartes perforées/bandes magnétiques et bandes magnétiques/cartes perforées revenait par conséquent à éviter de se couper d'emblée de l'immense majorité des acteurs de ce secteur, lesquels auraient plus que sûrement hésité à franchir le pas – c'est-à-dire acquérir un ordinateur – si ce dernier ne leur avait pas offert la possibilité d'exploiter rapidement et facilement la quantité de données généralement impressionnante qu'ils possédaient déjà sur cartes perforées. Ces convertisseurs, comprenons-le bien, n'avaient pas vocation à supprimer définitivement l'usage des cartes perforées ; plutôt, ils constituaient une interface technologique assurant la compatibilité de l'ordinateur avec les « anciennes » machines mécanographiques et inversement. En outre, et ceci, une fois de plus, rend remarquablement compte de l'intelligence des concepteurs de l'U.N.I.V.A.C., ces systèmes furent proposés en deux versions. La première d'entre elles permettait de traiter les

cartes I.B.M. à 80 colonnes, de loin les plus répandues, tandis que la seconde autorisait la conversion des cartes *Remington Rand* à 90 colonnes (on ne s'étonnera pas vraiment de cela puisque la *Remington Rand*, principal concurrent d'I.B.M. sur le marché du traitement de l'information, devait racheter l'E.M.C.C. en 1950). Ainsi l'acquéreur d'un U.N.I.V.A.C. pouvait-il choisir, en fonction du type d'équipement mécanographique qu'il possédait déjà, le convertisseur de format convenant précisément à ses besoins.

C'est grâce à l'U.N.I.V.A.C. I, une machine extrêmement innovante qui, en plus d'être le premier ordinateur commercial au monde, connut un succès retentissant – 46 exemplaires en furent vendus - que la bande magnétique s'imposa comme un support d'enregistrement de l'information absolument incontournable au début des années cinquante. Dans une très large mesure, cette réussite qui devait marquer les débuts de l'industrie informatique aux Etats-Unis et signer en même temps la fin du règne des instruments mécanographiques fut même due à la présence sur cette machine de lecteurs/enregistreurs de bandes et de convertisseurs de formats. Bientôt I.B.M., puis les nouveaux venus dans le secteur de la construction d'ordinateurs emboîtèrent le pas à la division U.N.I.V.A.C. de la *Remington Rand* en équipant systématiquement leurs machines de mémoires secondaires à rubans magnétiques. Notons qu'il n'était pas rare non plus que les ordinateurs scientifiques conçus à la même époque que l'U.N.I.V.A.C. I reçoivent après coup ces systèmes de stockage auxiliaires de façon à accroître leur niveau de performance. Si les cartes perforées mirent fort longtemps à disparaître totalement du paysage informatique – en 1965, le fabuleux système I.B.M./360 les utilisait encore – la bande magnétique, bien plus que le disque dur, demeura pendant plusieurs décennies encore le médium de stockage auxiliaire de référence pour les ordinateurs. Preuve de l'excellence de leur rapport coût/performance, il fallut en réalité attendre la fin des années 80, et avec elle l'apparition de disquettes à haute densité et de disques durs de grande capacité peu onéreux, pour assister à leur progressive disparition.

2.2.8.4.8. Principe général de fonctionnement des lecteurs/enregistreurs de rubans magnétiques.

En débutant cette section, nous avons évoqué les magnétophones et les cassettes audio qui étaient utilisés au début des années 80 pour lire et enregistrer les programmes sur les micro-ordinateurs personnels (on songera par exemple aux Sinclair ZX80, ZX81, ZX Spectrum, à l'Oric 1, ou encore au célèbre Amstrad CPC464). Quel rapport, se demandera-t-on peut-être, entre ces petits dispositifs de stockage somme toute très ordinaires,

très sommaires, et les énormes mémoires de masse à bandes qui devaient être employées de manière croissante dans la sphère informatique (dirons-nous la sphère « proto-informatique » ?), à partir de 1951-52 ? Si l'on s'intéresse seulement à leurs dimensions spécifiques, ou bien encore à leurs performances respectives, il n'est évidemment aucune espèce de comparaison possible entre eux. Les premiers étaient beaucoup plus petits, beaucoup moins performants, mais aussi nettement moins dispendieux que les seconds. Toutefois, certaines de ces différences ont beau être flagrantes – pour ne pas dire directement perceptibles - elles ne doivent pas non plus nous induire en erreur. Fondamentalement, le principe général d'opération sur lequel reposaient ces deux sortes d'appareils était en effet strictement identique...

En étudiant le *modus operandi* des tambours rotatifs magnétiques, il nous a été donné de voir que leur capacité totale de stockage se trouvait d'emblée bornée par une double contrainte physique essentielle : l'opposition capacité/temps d'accès. De fait, avec ce type de mémoire auxiliaire, il était nécessaire de trouver un compromis optimal entre le nombre maximum de bits pouvant être enregistrés sur leurs pistes cylindriques individuelles et la vitesse à laquelle il était possible d'accéder à ces informations lors de l'effectuation automatique des processus de lecture ou d'écriture. En d'autres termes, augmenter cette capacité revenait à accroître les dimensions du cylindre, donc sa masse, ce qui supposait en contrepartie que l'on diminue sa vitesse de rotation, donc que l'on rallonge le temps d'accès aux données, en vue de limiter les effets néfastes causés par l'intensification de la force centrifuge. A partir du début des années cinquante, l'apparition et la diffusion rapides des ordinateurs scientifiques et des systèmes à vocation commerciale aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne conduisirent à une diversification et à une multiplication des applications confiées à ces machines. Cette inexorable montée en puissance de l'outil informatique devait en même temps s'accompagner d'une complexification notable des problèmes à traiter : les programmes se faisaient ainsi plus variés et plus longs, les données de base et les résultats intermédiaires de plus en plus nombreux. Assez rapidement, on devait toucher aux limites ultimes des cylindres magnétiques (il était certes toujours possible d'augmenter leur capacité de stockage mais au détriment systématique de leur vitesse de rotation). Quant aux dispositifs à cartes perforées, bien que sollicités en permanence, ils étaient extrêmement lents. Beaucoup trop lents en tout cas pour pouvoir servir de mémoire auxiliaire principale à un ordinateur électronique. En testant avec succès une mémoire de masse à bandes magnétiques sur le B.I.N.A.C. puis en introduisant sur le marché une machine commerciale dotée d'un tel système de stockage en 1951 (il s'agissait bien sûr de l'U.N.I.V.A.C. I.), Presper J. Eckert et

John W. Mauchly résolurent de manière magistrale un problème qui s'annonçait pourtant bien délicat : alors que « l'ancêtre » du disque dur n'existait pas encore, comment parvenir à enregistrer et à lire une quantité toujours plus importante d'informations – entendons par là les milliers voire les millions de bits constituant son programme et ses données - sans que cela nuise exagérément aux performances globales de l'ordinateur et à son coût d'achat ou de location ? La bande magnétique, pendant plusieurs décennies au moins, devait représenter la réponse « idéale » à cette épineuse question.

Une bande d'enregistrement informatique n'était rien de plus qu'un long ruban souple en métal ou en matière plastique s'enroulant sur une bobine et sur lequel on avait disposé une fine couche uniforme de matériau magnétique (les magnétophones, tout le monde en conviendra sûrement, nous ont depuis longtemps familiarisés avec cette sorte de médium). A la différence du magnétophone qui, comme on le sait, est manœuvré manuellement par son utilisateur, les lecteurs/enregistreurs de bandes informatiques – ou « ensembles dérouleurs » - étaient toutefois entièrement pilotés par l'ordinateur. Ainsi le dévidement de la bande, en avant ou en arrière selon le cas, était géré de façon totalement automatique en fonction des instructions que la machine rencontrait lors de l'exécution de son programme. Du fait de leur configuration géométrique particulière, le mode opératoire des rubans magnétiques était sériel (tout comme celui des mémoires à lignes au mercure). Ceci signifie donc qu'il n'était pas possible ici de synchroniser le défilement des millions de bits stockés sur la bande avec les opérations de lecture et d'écriture commandées par l'ordinateur. L'unique moyen dont on disposait alors pour repérer un bit ou un bloc de bits spécifiques sur la bande consistait tout simplement à lire tous ceux qui le précédaient. En effet, contrairement aux *Selectrons* ou aux matrices à tores de ferrites, ces mémoires secondaires n'étaient pas adressables (il ne s'agissait pas de mémoires à accès aléatoire, de *Random Access Memory*). Autrement dit chacun des bits ou des ensembles de bits qui y étaient enregistrés ne possédaient pas d'adresse spécifique. En conséquence on ne pouvait atteindre ces informations directement d'où un temps moyen d'accès aux données variable mais souvent assez important. De plus, la capacité de stockage d'une bande se trouvait limitée par trois facteurs convergents : sa longueur, sa largeur ainsi que le nombre de têtes dont était pourvu son système de lecture/écriture. S'il n'était pas rare que la longueur des rubans magnétiques atteigne plusieurs centaines de mètres, il faut bien voir qu'on ne pouvait pas non plus augmenter celle-ci *ad libitum* : devaient impérativement être pris en considération des éléments tels que la dimension de la bobine qu'elles formaient une fois enroulées, la masse de cette dernière, et le fait que plus ce rouleau était volumineux, plus le temps d'accès aux données augmentait. En contrepartie ces bandes

n'étaient pas chères et elles étaient interchangeables, ce qui fait qu'on disposait avec elles d'une capacité de stockage théoriquement infinie à moindre coût.

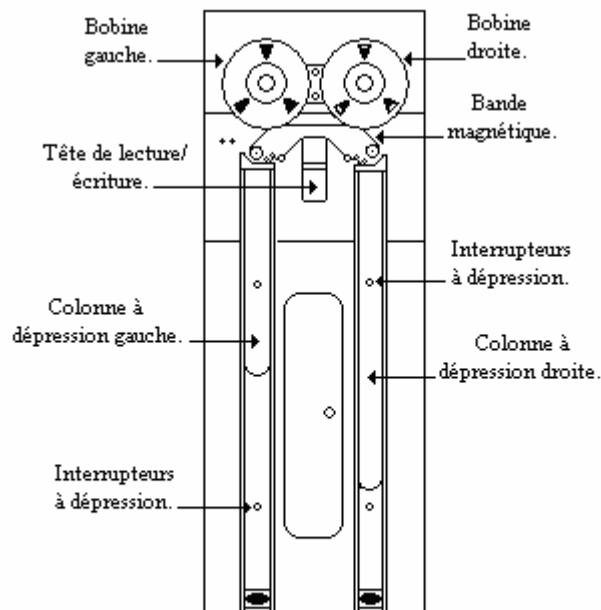


Fig. 28: représentation schématique d'un lecteur/enregistreur de bandes magnétique de type I.B.M. 2415 (S/360).

Ci-dessus, nous avons représenté un lecteur/enregistreur de bandes magnétiques I.B.M. *Model 2415/2*. Cet appareil fut introduit en même temps que le système informatique I.B.M. *S/360*, c'est-à-dire en 1965. Notons qu'à cette époque, d'autres dispositifs de ce genre existaient déjà sur le marché. Plus lents que la série des *tape drives 2415*, ils étaient aisément reconnaissables par la moindre longueur de leurs colonnes à dépression. Des systèmes tels que les modèles 2415/2 et 2415/3 permettaient respectivement de lire 60000 et 90000 bytes par seconde. La densité d'information stockée par pouce linéaire était de 800 bits pour une longueur de bande dépassant généralement les 700 mètres (ce qui bien sûr autorisait une capacité de stockage énorme). Ces dispositifs étaient en outre pourvus d'interrupteurs de paramétrage qui leur permettaient le cas échéant de travailler avec des bandes de densité moins importante. Une compatibilité descendante avec les anciens modèles se trouvait ainsi assurée (au sein d'une même installation informatique, il n'était donc pas rare de voir cohabiter plusieurs *tape drives* appartenant à des générations différentes). On peut décrire le mode opératoire générique de ces appareils comme suit : au cours des phases de récupération et d'enregistrement des données, la bande magnétique défilait au dessus des têtes de lecture/écriture du dispositif à vitesse élevée mais constante. Afin de limiter l'impact des phénomènes inertiels causés par la masse des bobines lors des multiples démarrages et arrêts

ordonnés par l'ordinateur, la bande magnétique formait en permanence deux grandes boucles entre le mécanisme d'entraînement du système et les bobines. Ces boucles étaient ensuite placées dans deux colonnes à dépression où deux interrupteurs – des capteurs à dépression dans la colonne de gauche et des capteurs de pression atmosphérique dans celle de droite – permettaient de commander automatiquement le mouvement des bobines. La bobine de gauche alimentait la bande dans la colonne correspondante quand la boucle se situait au dessus du premier interrupteur à dépression tandis que la bande était extraite de la colonne de droite lorsque la boucle s'y trouvant passait en dessous du second capteur de pression atmosphérique. Ainsi était-il possible d'éviter de perdre un temps évidemment précieux au démarrage et à l'arrêt du système sachant que ces deux opérations pouvaient parfaitement être répétées plusieurs milliers de fois au cours de l'exécution d'un seul et unique programme.

Les lecteurs de bandes magnétiques ont à ce jour presque totalement disparu du monde informatique. Sur les gros systèmes, et après une assez longue période de cohabitation, ils se sont vus remplacés par des disques durs. La miniaturisation spectaculaire qu'ont subis ces périphériques depuis trois décennies a en effet permis de mettre au point des appareils ultrarapides, peu coûteux, peu volumineux et offrant en outre une capacité de stockage extrêmement importante (celle-ci s'évalue présentement en dizaines de gigaoctets). Evidemment, dans le même temps, les rubans magnétiques et les *tape drives* devaient subir le même genre de transformations : les lecteurs se firent de plus en plus rapides, de plus en plus petits tandis que les bandes gagnaient considérablement en compacité et en densité jusqu'à pouvoir finalement être conditionnées sous forme de mini cartouches de plusieurs centaines de mégaoctets de capacité. Ces perfectionnements notables ne devaient toutefois pas les débarrasser de leur principal défaut, à savoir le fait qu'ils opéraient toujours en mode sériel. En revanche, ils contribuèrent à préserver et même à améliorer nettement les caractéristiques qui avaient fait leur succès depuis 1951 : les lecteurs/enregistreurs et les rubans magnétiques demeuraient très peu onéreux et il devenait de plus en plus facile et rapide de remplacer une bande par une autre lorsque la nécessité s'en faisait effectivement sentir. L'apparition de disques durs *extractibles* sur le marché puis celle de supports d'enregistrement adressables et « remplaçables » encore plus performants – le Cd-rom réinscriptible par exemple - ont sans nul doute joué un rôle déterminant dans la disparition des *tape drives*. Offrant les mêmes avantages que les bandes – ils étaient bon marché et interchangeables, d'où une capacité d'enregistrement en principe infinie – ces derniers permettaient en plus d'accéder aux informations de manière aléatoire et donc d'optimiser les temps de réponse de l'ordinateur.

2.2.8.5. Les mémoires à tores de ferrite.

A propos des mémoires à tores de ferrite – *core memory* en anglais – Herman H. Goldstine a pu écrire: « *The development of the magnetic core was one of the most important steps in making computers reliable and capable of having very large memories*⁷²³ ». De fait, leur mise au point puis leur utilisation de plus en plus intensive, couplées avec celles du transistor, devait constituer un des moments les plus fondamentaux de toute l'histoire de l'informatique. Nous allons à présent nous efforcer de démontrer en quoi les matrices à tores rompaient radicalement avec tout ce qui avait pu être réalisé auparavant en matière de mémoire interne et pourquoi, au juste, elles révolutionnèrent l'informatique. Les premières mémoires à tores de ferrite ont été fabriquées à la fin des années quarante en Angleterre et en plusieurs endroits des Etats-Unis. Différentes personnes, comme il n'est pas rare que cela se produise dans pareil cas, ont pris part à ces diverses réalisations. Si des historiens de l'informatique aussi réputés que le sont Paul. E. Ceruzzi, Martin Campbell-Kelly, William Aspray et Jérôme Ramunni ne manquent jamais de mentionner les travaux d'An Wang, de Jay W. Forrester, de Jan Rajchman, de Munro K. Haynes ou de William Papiian dès lors qu'ils procèdent à l'examen de ces dispositifs, les noms d'Andrew D. Booth et de Frederick Viehe sont en revanche fréquemment omis (Herman H. Goldstine, par exemple, cite A. D. Booth mais ne parle pas de F. Viehe tandis que M. R. Williams, lui, mentionne F. Viehe sans évoquer l'inventeur britannique). Plus étonnant, et peut être aussi plus inquiétant, est le passage sous silence presque systématique du rôle essentiel de précurseur que joua ici Presper J. Eckert. Nous reviendrons sur cela un peu plus loin. A la complète décharge de la plupart de ces auteurs, il nous faut bien reconnaître que les travaux de F. Viehe et d'A. D. Booth sont à la fois très mal connus et très mal documentés. Du premier, qui occupait le poste d'inspecteur de la voirie au *Los Angeles Department of Public Works*, on sait qu'il possédait un petit laboratoire à son domicile personnel et qu'il passait le plus clair de son temps libre à inventer des appareils de toutes sortes. En 1947, F. Viehe déposa ainsi un brevet qui incluait la description de l'usage d'une mémoire à tores de ferrite pour stocker de l'information. Neuf ans après cela, I.B.M. racheta ce brevet à prix d'or, ce qui permit à Viehe de quitter définitivement son emploi. L'inventeur américain, malheureusement pour lui, n'eut guère le loisir de profiter de sa fortune soudaine puisqu'en 1960, il trouva la mort par insolation dans le désert Mohave (Cal.), alors qu'il testait une combinaison de survie de sa conception. Des

⁷²³ In [Goldstine, 1972], p. 310.

caractéristiques techniques de la mémoire à tores qu'il avait mise au point 13 ans auparavant, on ne sait strictement rien. Quant à A. D. Booth, et sans préciser quoi que ce soit d'autre, H. H. Goldstine affirme de lui qu'il donna une conférence sur les matrices à tores en 1947 (très probablement à la *London University*). En dépit des recherches que nous avons réalisées, nous n'avons pas été en mesure de découvrir quoi que ce soit qui fut susceptible de confirmer ou d'infirmer cette assertion. Dans ce qui suit, et par la force des choses, nous nous intéresserons donc surtout aux réalisations d'An Wang, de Jay Forrester et de Jan Rajchman.

Rappelons brièvement qu'à la fin des années quarante, deux sortes de dispositifs étaient en cours d'étude pour servir de mémoire principale aux ordinateurs : les tubes Williams et les Selectrons. Fonctionnant l'un et l'autre sur le principe de l'iconoscope, ces instruments, outre leur extrême fragilité, présentaient deux défauts majeurs. D'une part, « laissés à eux-mêmes », ils étaient incapables de retenir l'information⁷²⁴, ce qui nécessitait par conséquent qu'on les couple avec des appareils permettant de régénérer les données enregistrées tous les 1/30^e de seconde. D'autre part, leur capacité individuelle de stockage étant fort limitée – malgré des dimensions tout à fait respectables - on devait impérativement en utiliser plusieurs en même temps (la modalité distributive offrant le meilleur rendement consistait ici à les placer sur les mailles d'un réseau quadratique). Tandis que l'on commençait à monter des mémoires à iconoscopes sur les premiers ordinateurs (tels l'I.A.S.C. ou le Whirlwind), on songeait déjà à leur substituer des systèmes qui offriraient conjointement stabilité renforcée et moindre fragilité. Evidemment, pour les motifs que nous venons d'exposer, tout recours à une solution électrostatique se trouvait d'emblée exclue. Ne restait plus alors que l'électromagnétisme. Compte tenu de l'objectif que l'on cherchait précisément à atteindre ici, deux critères spécifiques devaient présider à l'élection des matériaux qui pourraient éventuellement être employés : « [leurs] états d'aimantation rémanente devaient être stables et leur induction magnétique devait varier de manière linéaire en fonction du champ magnétisant⁷²⁵ ». On dit des substances ferromagnétiques qui présentent ces deux propriétés qu'elles ont un cycle d'hystérésis rectangulaire. Pour exprimer cela de façon beaucoup plus simple, il s'agit en fait de matériaux possédant deux états magnétiques stables et bien définis qui sont par conséquent susceptibles d'être utilisés pour représenter de l'information codée sous forme binaire. C'était exactement ce genre de substance que les chercheurs de la *Kriegsmarine* avaient développé durant la seconde guerre mondiale pour

⁷²⁴ Comme le rappelle J. Ramunni, « un système chargé électrostatiquement perd ses charges par polarisation de l'air. Il faut donc opérer sous vide poussé mais cette obligation a des conséquences sur la durée de vie de l'élément. », in [Ramunni, 1989], p.115, note 1.

⁷²⁵ In [Ramunni, 1989], p.115.

fabriquer les circuits des systèmes de contrôle de tir des pièces d'artillerie embarquées sur leurs bâtiments de surface. Or depuis fin 1945, le *Permenorm 5000-Z* (un alliage de fer et de nickel encore connu sous les noms de *Deltamax* ou d'*Hipernik*), était aux mains des services scientifiques de la marine militaire américaine. A la fin des années quarante, des chercheurs issus de l'Université d'Harvard, de l'Université de l'Illinois, du *Massachusetts Institute of Technology*, de la *Radio Corporation of America* et d'I.B.M. commencèrent donc à étudier indépendamment les propriétés du *Permenorm 5000-Z* afin de voir s'il pouvait être employé pour construire des dispositifs d'enregistrement magnétiques.

Contrairement à ce qu'on peut lire quelquefois, voire même un peu trop souvent, les mémoires à tores de ferrite n'ont pas été *inventées* en 1948-49. Elles ont commencé à être *fabriquées* à partir de cette date, ce qui, on nous l'accordera, est totalement différent. C'est en 1945, alors qu'il travaillait sur l'E.D.V.A.C. à la *Moore School of Electrical Engineering*, que Presper J. Eckert proposa d'utiliser pour la première fois une matrice bidimensionnelle à tores pour enregistrer magnétiquement de l'information binaire. Au cours des derniers mois de cette année, le scientifique américain publia même un article décrivant comment on pourrait fabriquer une matrice 2-D à noyaux de ferrite toroïdaux et l'employer ensuite comme mémoire d'ordinateur. Dans un ouvrage qu'il a entièrement consacré à l'histoire des mémoires d'ordinateurs, *Memories that Shaped an Industry*⁷²⁶, Emerson W. Pugh a démontré l'influence indéniable qu'avait exercé P. J. Eckert sur au moins deux des personnes que l'on présente comme faisant partie des principaux « inventeurs » des matrices à tores de ferrite : Jay W. Forrester, du M.I.T., et Jan Rajchman, de la R.C.A. L'un comme l'autre ont d'ailleurs confessé sans difficulté que l'orientation de leurs travaux de recherche avait été profondément marquée par l'idée originale d'Eckert. Ainsi, si le premier eut effectivement l'occasion de lire l'article d'Eckert, le second en entendit parler par personne interposée. Compte tenu de la diffusion relativement importante que connut ce papier dans la communauté scientifique américaine, gageons qu'ils ne furent pas les seuls dans ce cas. Presper J. Eckert – le fait que son nom soit si fréquemment « oublié » dans cette affaire en témoigne justement – n'implémenta jamais son idée géniale. Dans l'incapacité d'obtenir un poste de professeur à la *Moore School*, il décida, avec John W. Mauchly, son compère de toujours, de fonder une entreprise pour fabriquer des ordinateurs commerciaux. Les moyens financiers fort modestes dont disposait l'*Electronic Control Corporation* au moment où elle fut créée (octobre 1946), en plus du fait que le marché civil qu'elle cherchait à conquérir était à la fois réduit et

⁷²⁶ Emerson W. Pugh. *Memories that Shaped an Industry*, Cambridge, Mass., MIT Press, 1984. Cet ouvrage est malheureusement épuisé et au jour où nous écrivons, il n'est pas prévu qu'il soit réédité.

extrêmement conservateur, représentèrent autant de facteurs qui contraignirent les deux hommes à limiter drastiquement leurs dépenses en matière de recherche et de développement. Tant pour le B.I.N.A.C. que pour l'U.N.I.V.A.C. I, ils privilégièrent donc l'utilisation de technologies déjà éprouvées (lignes délai au mercure pour la mémoire interne), et la mise au point de systèmes périphériques innovants mais néanmoins dotés d'une totale compatibilité avec les supports d'enregistrement qui constituaient le standard d'alors (lecteur de rubans magnétiques et convertisseurs bandes/cartes). Ceci permet de comprendre pourquoi aucun des ordinateurs que fabriqua l'E.M.C.C. ne reçut de mémoire à tores de ferrite alors que c'est bel et bien un de ses cofondateurs qui les inventa en 1945...

Finalement, c'est An Wang, collaborateur d'Howard Aiken au *Harvard Computational Laboratory* et futur fondateur des *Wang Laboratories*, qui, comme on le dit, montra la voie en ce domaine. Après avoir achevé la construction du Harvard Mark III⁷²⁷ au mois de septembre 1949, Aiken accepta de fabriquer une version entièrement électronique de cette machine pour le compte de l'U.S. *Air Force*. Calculateur électromécanique composé de 5000 tubes à vide et de 2000 relais, le Mark III était pourvu de caractéristiques techniques extrêmement innovantes. On mentionnera notamment son « interpréteur », ou *mathematical button board*, une espèce de clavier dont chacune des touches correspondait à autant de symboles mathématiques ordinaires et qui permettait à l'opérateur de générer rapidement une suite d'instructions puis de la perforer sur une bande de papier ainsi que son système de contrôle particulièrement élaboré, lequel faisait appel pour la toute première fois aux concepts de registre d'adresse et d'adressage indirect⁷²⁸. Malgré les remarquables nouveautés dont il était porteur, l'Harvard Mark III devait souffrir de très sérieux problèmes de fiabilité. La faute en revenait naturellement à ses nombreux tubes à vide mais aussi aux huit tambours magnétiques et aux bandes de papier qui étaient utilisés pour enregistrer ses instructions et ses données. Notons bien que le Mark III n'était pas un ordinateur mais un calculateur électromécanique. Pour l'ensemble des systèmes de la classe Mark, Howard Aiken devait ainsi se montrer inflexible quant à la nécessité de toujours maintenir bien séparées données et instructions. De fait ces machines – et tout particulièrement les modèles les plus tardifs - ne

⁷²⁷ Ou *Aiken-Dahlgren Electronic Calculator*. Le nom de *Dahlgren* désigne le lieu où le Mark III fut installé définitivement en mars 1950, à savoir le *Naval Proving Ground* de *Dahlgren*, dans l'état de Virginie.

⁷²⁸ Rappelons qu'en informatique, un registre peut être défini comme une mémoire intermédiaire et ultrarapide de très petite taille directement liée à l'unité centrale de traitement de l'ordinateur. Un registre d'adresse est donc une petite mémoire dans laquelle on peut stocker temporairement l'adresse d'une instruction ou celle d'une donnée. Quant à l'adressage indirect, il s'agit d'une méthode permettant la localisation d'un élément d'information à partir d'index numériques dont certains correspondent à des quantités fixes et d'autres à des quantités variables. En additionnant celles-ci les unes aux autres, le système peut alors gérer le déplacement et la réallocation des zones de la mémoire interne en fonction du déroulement du programme en cours d'exécution.

furent jamais pourvues d'une mémoire interne : leurs tambours magnétiques servaient à stocker les séquences d'instructions les plus utilisées (les routines), tandis que leurs bandes étaient employées pour conserver soit les données des problèmes, soit les codes machines (éventuellement dans l'attente de leur transfert sur tambour). Bien qu'Aiken ait toujours privilégié le niveau de précision de ses calculateurs à leur vitesse d'opération – exécuter une multiplication avec le Mark III prenait tout de même 12,75 millisecondes – il se montra néanmoins d'accord pour construire une version totalement électronique de cette machine pour l'armée de l'air américaine. De façon évidente, c'est le facteur vitesse qui devait désormais primer ici (bien qu'à notre connaissance il n'ait jamais été question de diminuer la précision). Dans cette perspective, Aiken chargea An Wang, un de ses jeunes assistants, de résoudre le problème de la lecture de l'information sur un support magnétique. La mission confiée à Wang consistait à mettre au point un dispositif entièrement magnétique qui serait susceptible de remplacer avantageusement les relais électromécaniques avec lesquels on avait fabriqué les registres du Mark III. Dans sa récente autobiographie⁷²⁹, Wang a d'ailleurs résumé comme suit ce que son supérieur hiérarchique attendait précisément de lui : « *Aiken wanted [me] to devise a way to record and read magnetically stored information without mechanical motion* ». En d'autres termes, aucune sorte d'intervention mécanique, quelle qu'elle fut, ne pouvait être tolérée ici si l'on désirait vraiment atteindre un niveau de performance satisfaisant. Tout, par conséquent, devait être magnétique. Le problème, comme le note justement J. Ramunni, est qu'ici, toute opération de lecture anéantit invariablement l'information enregistrée. Il fallait donc découvrir un moyen permettant non pas pour supprimer ce phénomène dissipatif – c'était impossible – mais autorisant son contournement d'une manière qui se révélât vraiment efficace. Après avoir mûrement réfléchi à la question et connu plusieurs tentatives infructueuses, An Wang eut une idée à la fois simple et remarquable: même si l'information était systématiquement détruite lors des accès en lecture commandés par le système, il suffisait de la réenregistrer électriquement, c'est-à-dire à très grande vitesse, à l'emplacement exact où elle venait d'être lue (et effacée !) pour pouvoir en disposer à nouveau. Le matériau permettant d'accomplir ce genre de « prouesses » était déjà tout trouvé puisqu'il s'agissait du *Deltamax*. Wang devait ensuite profiter d'un symposium sur les ordinateurs organisé par l'Université d'Harvard au mois de septembre 1949 pour exposer les singulières propriétés magnétiques de cette substance et présenter officiellement son invention. On est absolument certain que J. W. Forrester et M. K. Haynes assistèrent à la

⁷²⁹ An Wang, *Lessons, An Autobiography*, Wang Institute of Graduate Studies, 1986, p. 52.

conférence que donna le jeune chercheur... Malheureusement pour lui, si l'on ose le formuler de la sorte, Wang rata quelque peu le coche avec les mémoires à tores de ferrite. Pour élaborer les registres du Mark IV, il devait en effet s'inspirer de l'architecture et du fonctionnement des lignes délai au mercure, autrement dit de systèmes d'enregistrement opérant en mode sériel. Les tores magnétiques avaient beau offrir un taux de fiabilité et un temps de réponse nettement plus élevés que ceux des lignes délais acoustiques, il n'en demeurait pas moins que le fait de les distribuer linéairement revenait à transposer au sein d'un système entièrement digital la plupart des défauts qui caractérisaient ces dispositifs analogiques : ainsi retrouver une séquence de bits particulière dans un registre mémoire à fonctionnement sériel impliquait que l'on passe auparavant en revue tout ou partie de son contenu informationnel sachant qu'au fur et à mesure que ce module gagnait en capacité, ce processus prenait de plus en plus de temps. Même s'il convient de saluer le travail d'An Wang comme il se doit – c'était assurément une première - on ne saurait en revanche raisonnablement parler ici de changement de paradigme ou de révolution technologique. Pour cela, il eut fallu non seulement passer d'un support analogique à un support digital, ce qui fut bien le cas, mais également définir pour ce dernier une architecture et un *modus operandi* inédits permettant de tirer pleinement parti de cette mutation radicale. De fait, même si l'emploi des tores de ferrite pouvait autoriser ici un gain de vitesse notable, l'adoption, pour la mémoire qu'ils étaient appelés à constituer, d'une organisation linéaire et d'un accès sériel n'apportait strictement rien de nouveau. Peut-être s'étonnera-t-on maintenant de ce que An Wang, à l'époque, se soit montré impuissant à saisir la portée véritable de ses propres travaux de recherche ou, ce qui revient sensiblement au même, qu'il ne soit pas parvenu à établir un lien direct entre ceux-ci et l'ordinateur. Rappelons alors que lorsqu'il solutionna le problème que lui avait confié H. Aiken, Wang n'avait rejoint le laboratoire de calcul de l'Université d'Harvard que depuis deux mois seulement. Or il est évident que si la résolution de ce problème technique très spécifique nécessitait que l'on possède une solide maîtrise de la physique et de l'électronique, elle n'exigeait en revanche aucune espèce de connaissance relative à l'architecture logique des ordinateurs digitaux (ni non plus des calculateurs). Que Wang ait très sérieusement envisagé de commercialiser son invention pour le stockage momentané de données télégraphiques en attente d'impression ou encore le contrôle du transfert d'impulsions dans diverses sortes de machines électriques nous incite fortement à penser qu'il ne songeait pas spécifiquement à l'ordinateur quant il la mit au point (au moins est-on certain qu'il n'avait pas eu vent de l'article d'Eckert). Pour le jeune scientifique, la construction de registres pour un calculateur électronique ne représentait qu'une application possible, parmi bien d'autres

également envisageables, de la technologie qu'il avait développée. Quant aux mémoires d'ordinateurs, on l'aura compris, elles ne figuraient pas en tête de sa liste de priorités, loin s'en faut. Rétrospectivement, Wang a exprimé ses regrets de ne pas avoir cherché – et surtout de ne pas avoir pu - pousser plus loin ses investigations quant aux applications potentielles du concept de mémoire à tores. Dans son *Autobiography*, et comme pour se dédouaner partiellement, il a ainsi indiqué que la ligne politique suivie alors par Harvard en matière de recherche et de développement consistait à « *stopper le développement d'une technologie dès lors que celle-ci atteignait un niveau de maturité suffisant pour qu'elle devienne commercialement exploitable.*⁷³⁰ ». Où l'on voit donc qu'en certaines circonstances, la volonté de rentabilité affichée par un institut de recherches peut constituer un obstacle épistémologique à part entière. Quant, à la fin de l'année 1949, An Wang prit peu à peu conscience de son « erreur » et qu'il commença en même temps à comprendre que le *Computing Laboratory* d'Harvard ne construirait jamais d'ordinateurs, il songea à démissionner pour aller créer sa propre compagnie informatique. Chose qu'il se décida enfin à faire en 1951.

Au mois de janvier 1950, soit cinq mois après que l'Union Soviétique ait testé sa première bombe atomique sur le site expérimental de Semipalatinsk (Kazakhstan), une étude commandée par le gouvernement américain - elle fut conjointement réalisée par l'*Air Defense System Engineering Committee* de l'*U.S. Air Force* et par le *Weapon System Evaluation Group* du *Department of Defense* - recommanda la mise en place sans délais d'un système de surveillance antiaérien informatisé et distribué sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis (à l'origine le nom de ce réseau était *Continental Air Defense System*). Bien que le réseau radar mis en place aux U.S.A. au cours de la deuxième guerre mondiale ait été immédiatement remis en opération à la suite de cet événement inquiétant, son organisation et ses capacités, estima-t-on, était loin d'être satisfaisantes. En cinq années seulement, la nature des menaces militaires potentielles planant sur les Etats-Unis avait en effet dramatiquement changée : on parlait désormais de vecteurs nucléaires à moyen et long rayon d'action, des bombardiers bien sûr, mais aussi des missiles balistiques, ainsi que d'avions de chasse à réaction (les premiers engagements aériens avec de tels appareils auront en effet lieu à peu près même moment en Corée). Il fallait donc se trouver en mesure de détecter ces différentes sortes de porteurs très rapidement et de mettre en place tout aussi vite une série de contre-mesures visant à les neutraliser définitivement avant qu'ils ne puissent frapper. La nouvelle solution défensive

⁷³⁰ La phrase exacte est: « [*Harvard's policy consisted*] *in not pursuing research in developing technologies once they had matured to the point where they had commercial applications.* », in [Wang, 1986], p. 61.

préconisée ici par l'A.D.S.E.C. et le W.S.E.G. consistait à connecter les uns aux autres des dizaines de gros ordinateurs, des unités radars ainsi que des instruments spéciaux permettant d'acquies, d'analyser et de restituer en *temps réel* les données relevées par ces derniers. Était également prévue la création de centres de commandement informatisés capables de communiquer entre eux, de recevoir et d'évaluer les informations reçues depuis les sites radars puis, le cas échéant, de définir et de coordonner à l'échelon national une réponse défensive adaptée à la menace aéromobile venant d'être détectée. Ce rapport ultra confidentiel devait ainsi marquer les débuts du futur réseau de veille militaire S.A.G.E. (pour *Semi Automatic Ground Environment*). Cependant, au moment où cet ambitieux projet fut entériné par les plus hautes autorités civiles et militaires américaines, la plupart des méthodes et des techniques sur lesquelles il était censé s'appuyer n'existaient pas ou bien se trouvaient encore dans une phase de développement plus ou moins avancée (à commencer bien entendu par les ordinateurs devant constituer les nœuds maîtres de cette structure réticulaire). Le système informatique retenu pour former la base technologique de ce dispositif était le Whirlwind - « Tourbillon » - un ordinateur développé au *Massachusetts Institute of Technology* depuis 1946. Nous reviendrons sur l'histoire et les spécificités techniques du Whirlwind un peu plus loin. Pour l'heure, le concernant, contentons-nous de fournir les quelques indications suivantes, lesquelles nous paraissent absolument nécessaires pour comprendre le rôle essentiel que joua le Whirlwind dans le développement des mémoires à tores de ferrite. Ce projet fut démarré en 1943, c'est-à-dire en pleine deuxième guerre mondiale, à l'initiative du directeur de la *Special Devices Division* de l'U.S. *Navy Bureau of Aeronautics*, le capitaine Luis de Florez. Au départ, il s'agissait de développer un *flight trainer* capable de simuler différents types d'aéroplanes militaires pour entraîner les pilotes de l'aéronavale au sol. Après que le Cpt. de Flores ait minutieusement examiné son idée initiale avec des représentants officiels des *Bell Telephone Laboratories* et du M.I.T. (institut duquel il était d'ailleurs issu), il fut décidé que le simulateur devrait également remplir la fonction d'analyseur de contrôle et de stabilité embarqué (d'où le nom qui lui fut donné : *Airplane Stability and Control Analyzer* ou A.S.C.A.). Puisque, fondamentalement, il était question ici de simuler, d'analyser et de contrôler le comportement d'avions de guerre en situation dynamique, on ne sera pas surpris d'apprendre qu'un des attributs principaux de ce dispositif était qu'il devait impérieusement fonctionner en *temps réel*. Le projet Whirlwind – bien qu'il ne se nommât pas encore ainsi - fut officiellement lancé au mois de décembre 1944 lorsque la réalisation d'une étude de faisabilité de cette machine portant sur un montant de 75000 dollars fut confiée au *Servo-mechanisms Laboratory* du M.I.T. La personne qui hérita de la charge de cette étude n'était

autre que l'assistant directeur de ce laboratoire, Jay W. Forrester. Un an et demi après cela, le même Forrester parvint à décrocher un contrat définitif de 875000 dollars avec la *Navy* pour construire cet appareil (son temps de fabrication ayant été estimé à 18 mois). A peu près à la même période, Forrester et son groupe commencèrent à prendre conscience du fait que le niveau de performance et de flexibilité de l'équipement spécial qu'ils étaient en train de développer était loin d'être à la hauteur de leurs attentes. Rappelons, pour mémoire, que si la *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie pouvait être considérée à cette époque comme l'institut leader en matière de calcul automatique digital (l'E.N.I.A.C. y était en cours de fabrication), le M.I.T., lui, représentait plutôt le chef de file de l'école analogique (on songera bien sûr aux fameux analyseurs différentiels qui y furent mis au point par Vannevar Bush). Or on se souvient que les calculateurs analogiques, outre leur relative lenteur et leur caractère éminemment spécialisé, affichaient également une fâcheuse tendance au dérèglement dès lors qu'ils étaient placés en opération. Les méthodes analogiques ne pouvaient donc permettre de réaliser un appareil aussi « sensible » qu'un simulateur de vol, lequel, en plus de devoir être suffisamment générique pour pouvoir reproduire le comportement de plusieurs sortes d'appareils de combat⁷³¹, exigeait en permanence, on le comprend, précision, stabilité et rapidité. Profondément stimulé par le succès de l'E.N.I.A.C., mais aussi par la lecture du *First Draft of a Report on the EDVAC*, Forrester décida d'abandonner l'approche analogique qu'il avait jusqu'alors adoptée et de s'investir totalement dans le nouveau champ des ordinateurs électroniques digitaux. Au mois de mars 1946, et non sans avoir mené au préalable de longues négociations avec la *Navy*, il proposa une révision radicale des objectifs de la mission qui lui avait été confiée en décembre 1944. Il s'agissait désormais de construire un ordinateur capable de prendre en charge les fonctions de l'analyseur de contrôle et de stabilité des appareils de combat – donc de respecter la contrainte du traitement en temps réel - et d'intégrer cette machine à l'équipement auxiliaire du système (*i.e.* le « cockpit »). Malgré un coût de production colossal - les premières projections devaient ainsi faire état d'un chiffre de 2,4 millions de dollars - la marine, séduite, accepta de financer le nouveau projet de Forrester. Cet ordinateur, cela vaut peut-être la peine d'être précisé ici car à l'époque les machines étaient toutes désignées au moyen d'acronymes, fut dénommé « Whirlwind », en référence à deux autres ordinateurs

⁷³¹ Le comportement en vol d'un Curtiss P-40, pour prendre ce seul exemple, est en effet très différent de celui d'un Vought F4U-59 ou d'un Boeing B-29 (on s'en rendra aisément compte en utilisant un logiciel de simulation aérienne militaire historique). En conséquence, les modèles mathématiques permettant de décrire ces comportements le sont aussi. Pour pouvoir être qualifié de générique, un simulateur de vol doit pouvoir faire tourner indifféremment, comme on dit, n'importe lequel de ces modèles.

commandités au même moment par la *Navy*, le « Tornado » et l' « Hurricane ». En juin 1948, Forrester et son équipe achevèrent la construction du cockpit et de tous les autres dispositifs secondaires du simulateur. Ne restait plus alors « que » l'ordinateur – le centre névralgique du système - à fabriquer. L'affaire semblait donc en bonne voie quant un an après cela, un rapport prévisionnel réalisé par une commission d'experts du *Department of Defense* démontra, données à l'appui, que le Whirlwind coûterait trois fois plus cher que ce qu'il avait été prévu à l'origine. Or cela représentait une somme supérieure aux coûts⁷³² combinés de l'I.A.S.C. (Princeton), de l'U.N.I.V.A.C. (E.M.C.C.) et de l'E.D.V.A.C. (*Moore School*) ! Notons bien que ce rapport ne remit jamais en cause la qualité du travail effectué jusque-là au M.I.T. Au contraire, il devait tout particulièrement insister sur l'excellence de ses équipes de chercheurs et d'ingénieurs ainsi que sur le caractère remarquable de leurs rapports scientifiques. Toutefois, il devait également conclure qu'en l'état, aucune espèce d'application civile ou militaire n'était envisageable qui fut susceptible de justifier une dépense pareillement exorbitante. La conclusion était donc claire : ou l'on découvrait rapidement une telle application, ou bien le projet Whirlwind était voué à connaître une fin brutale. C'est dire si l'explosion de la première bombe atomique soviétique tomba à point nommé car c'est cet événement historique, et lui seul, qui sauva l'ordinateur du M.I.T. de son échouage programmé. Candidat idéal pour former les principaux nœuds opérationnels du futur réseau militaire S.A.G.E. – n'avait-il pas été prévu dès le départ qu'il devrait travailler en temps réel ? – c'est tout naturellement vers le Whirlwind que les membres de l'A.D.S.E.C. et du W.S.E.G. se tournèrent quant il fut question de désigner un ordinateur pour remplir cette fonction. C'est donc dans un climat géostratégique particulièrement préoccupant – pour la première fois la menace d'une frappe nucléaire soviétique aérienne sur le sol des Etats-Unis se précisait - qu'une seconde chance fut donnée à l'ordinateur du M.I.T. Les phases d'assemblage et de test préliminaires du Whirlwind se déroulèrent durant les derniers mois de 1950. Très semblable à l'E.D.V.A.C. sur plan architectural, le Whirlwind se distinguait cependant de cet ordinateur en ceci qu'il avait été prévu qu'il fonctionnerait en mode parallèle (alors que l'E.D.V.A.C. travaillait en mode sériel). Fondamentalement, il était donc plus proche de l'I.A.S.C. que John Von Neumann était en train de construire à l'*Institute for Advanced Study* de Princeton qu'il ne l'était de la machine de la *Moore School of Electrical Engineering*. Au moment où le prototype du Whirlwind fut testé, c'est-à-dire fin 1950, ses caractéristiques techniques étaient

⁷³² Il s'agissait là encore d'une estimation basée sur une série d'évaluations (nous étions, rappelons-le, en 1949). A l'époque, les coûts de développement de l'I.A.S.C., de l'E.D.V.A.C. et de l'U.N.I.V.A.C. furent respectivement estimés à 0.65, à 0.47 et à 0.45 million de dollars. Quant à la construction de l'ordinateur Whirlwind, la commission spéciale du D.O.D. calcula qu'elle coûterait entre 3 et 5 millions de dollars...

les suivantes : son unité arithmétique et logique et ses unités de contrôle comportaient 4500 tubes à vide et 14800 diodes électroniques ; sa mémoire interne se composait de huit tubes à rayon cathodique (des tubes Williams) autorisant au total le stockage de 2048 mots d'une longueur individuelle de 16 bits ; quant à ses périphériques d'entrée/sortie, on comptait des lecteurs/enregistreurs de bandes papier, des dispositifs à bandes magnétiques (très vraisemblablement inspirés des systèmes similaires employés sur l'U.N.I.V.A.C. I), ainsi qu'un tambour magnétique fabriqué par E.R.A. Les dimensions du Whirlwind étaient telles qu'il fut nécessaire de l'installer dans un immeuble à deux étages. Les divers équipements électriques destinés à l'alimenter en énergie furent ainsi placés au rez-de-chaussée de l'édifice, sa mémoire interne (les C.R.T. Williams) et ses circuits de communication au premier étage tandis que tout le reste, c'est-à-dire son C.P.U., sa console, ses systèmes de contrôle ainsi que l'appareillage servant à la dissipation de l'énorme chaleur qu'il dégagait en fonctionnant fut disposé au dernier étage. Bien que le prototype du Whirlwind fonctionnât relativement bien, la fiabilité de sa mémoire interne représentait incontestablement une des sources d'inquiétude les plus importantes et les plus constantes pour Forrester et son équipe. A condition que plusieurs d'entre eux soient employés en parallèle – ce qui était bien le cas ici - les tubes électrostatiques de type Williams étaient à l'époque les seuls systèmes de stockage permettant d'enregistrer une grande quantité d'informations et d'offrir en même temps un accès aléatoire ultra rapide à celles-ci (ni les lignes délai sérielles, ni les mémoires à cylindre magnétique ne permettaient de faire cela). Il s'agissait là, on le comprend, de deux critères, ou plutôt de deux contraintes techniques, qu'il fallait impérativement voire satisfaites si l'on ambitionnait de fabriquer un système travaillant en temps réel. Cependant les C.R.T. avaient beau être réputés pour leur excellente fiabilité, il n'en demeurait pas moins qu'ils n'étaient pas parfaits. Compte tenu de la façon dont il étaient fabriqués, il arrivait en effet quelquefois que la mince couche de matériau actif appliquée sur la surface interne de leur écran présente de minuscules irrégularités susceptibles de perturber très fortement, voire même d'empêcher, l'écriture, la conservation ou la lecture des informations qu'ils étaient pourtant censés sauvegarder. En temps de paix, on conçoit parfaitement que pareille perte de données puisse avoir quelques conséquences fâcheuses. Cependant, même dans le pire des cas, on aura toujours ici la possibilité de remplacer l'élément défaillant, de relancer la machine et le programme, puis de recommencer les calculs. Maintenant, lorsqu'une flotte de bombardiers stratégiques se dirige à très grande vitesse vers un pays et que le système informatique militaire distribué qui est chargé de détecter et de contribuer à neutraliser cette menace vient à faire défaut pour les mêmes raisons, la latitude dont on dispose pour remédier au problème, si elle n'est pas tout

bonnement inexistante, se voit très considérablement réduite (avec des conséquences que l'on n'ose imaginer). C'est bien cette terrifiante perspective qu'il avait en tête lorsqu'en septembre 1950, c'est-à-dire trois mois après avoir installé et testé intensivement la première banque mémoire à tubes électrostatiques du Whirlwind, Forrester écrivit : « *final testing and alignment of the storage bank is moving along steadily*⁷³³ ». Selon Emerson W. Pugh qui rapporte là une remarque consignée en 1947 par le jeune ingénieur du M.I.T., celui-ci avait pris conscience très tôt du fait que les tubes cathodiques de type Williams étaient loin de représenter l'expédient suprême en matière de dispositif de stockage⁷³⁴. Pour Forrester, la solution idéale à ce problème consistait en fait à disposer de petits éléments actifs faiblement espacés les uns par rapport aux autres dans un volume tridimensionnel de taille réduite. On sait avec certitude qu'en 1947-48, il s'essaya à la mise au point d'un tel système en utilisant des petits tubes au néon et que sa tentative se révéla infructueuse (très sûrement à cause de leurs caractéristiques électriques, lesquelles étaient inappropriées). En 1949, année où il devait assister à la conférence donnée par An Wang à l'Université d'Harvard, Forrester vit une publicité de presse passée par l'*Arnold Engineering Company*. Celle-ci vantait les propriétés physiques inhabituelles d'un matériau ferromagnétique produit par cette firme de Chicago, le *Deltamax*. Le seuil de commutation magnétique exceptionnellement précis du *Deltamax* conduisit rapidement Forrester à le considérer comme une substance idéalement adaptée pour la fabrication de la mémoire compacte qu'il avait à l'esprit depuis deux ans. Bien entendu, l'idée consistant à enregistrer des informations en utilisant des éléments magnétiques discrets n'était pas neuve. Ce qui l'était, en revanche, c'était la manière dont on envisageait à présent de distribuer ces éléments. S'inspirant directement du design et du fonctionnement des traditionnelles lignes délai acoustiques, nous avons vu qu'An Wang avait choisi de les disposer de façon linéaire pour construire les registres du Mark IV. En conséquence, si le support matériel employé pour stocker des données au sein de ces petites mémoires changeait du tout au tout, leur mode opératoire, lui, demeurait fondamentalement sériel : l'influx magnétique représentant l'information devait en effet se propager dans le système à la manière d'une onde. Il n'y avait donc rien, ici, de vraiment nouveau sous le soleil. Le dispositif imaginé par Forrester se différençait radicalement de cela : au lieu de placer des petits anneaux de matériau ferromagnétique le long d'un unique fil électrique – un peu comme on aurait enfilé des perles à intervalles réguliers le long d'une cordelette – il

⁷³³ K. C. Redmond et T. M. Smith, *Project Whirlwind: The History of a Pioneer Computer*, Bedford, Mass..., Digital Press, 1980, pp. 168-178; Cité in [Pugh, 1995], p. 204.

⁷³⁴ « *Storage tubes do not represent the ultimate in data storage devices* », *Ibidem*.

envisageait en effet de les disposer individuellement aux nœuds d'un treillis filaire tridimensionnel. Chaque paire de fils conducteurs perpendiculaires (ceux, horizontaux et verticaux, formant la structure matricielle), devait alors servir à contrôler - modifier, rétablir - électriquement l'état magnétique actuel du tore placé à son intersection tandis qu'un troisième fil électrique passé au centre même de cet anneau permettait d'en détecter - d'en lire - l'état courant. Avant de passer effectivement à la construction de sa matrice tridimensionnelle à tores de ferrite, Forrester eut à dissiper quelques difficultés d'ordre technique. Pour commencer, il confia la preuve théorique de sa faisabilité à un de ses étudiants, William N. Papiian, qui en fit le sujet de sa thèse de doctorat. De fait, Papiian démontra que cette organisation inédite était quelque chose de parfaitement possible et viable. Ensuite, Forrester avait quelques doutes quant au comportement électromagnétique du *Deltamax*. Si la précision du seuil de commutation magnétique de cette substance particulière ne devait pas se trouver remise en cause ici, la vitesse à laquelle cette bascule était susceptible de s'effectuer faisait toutefois problème. A juste titre d'ailleurs, Forrester soupçonnait que la charge électrique résiduelle des tores faits de *Deltamax* ne manquerait pas de représenter un facteur de ralentissement relativement important pour la réalisation de ce processus. Après que ce doute ait été transformé en certitude grâce à la conduite de quelques expériences en laboratoire, Forrester, en plus de déposer un brevet pour protéger son invention, lança un programme de recherches au M.I.T. afin de développer de nouveaux matériaux ferromagnétiques qui présenteraient exactement les mêmes qualités que le *Deltamax* tout en étant dépourvus de ses défauts (puisque'il s'agissait ici d'une question de sécurité nationale de tout premier plan, l'argent nécessaire à l'établissement et au fonctionnement de ce projet n'était pas un problème). Plusieurs contrats furent alors conclus entre le M.I.T., la *Navy* et des partenaires industriels - notamment l'E.R.A. et la *General Ceramics and Steatite Corporation* (Keasbey, New Jersey) - en vue de fabriquer ces nouveaux matériaux. Au mois de mai 1952, une matrice à tores de ferrite de 16 pouces par 16 pouces fut testée avec succès. Un an après cela, une mémoire du même type mais offrant une plus grande capacité de stockage (elle permettait en effet d'enregistrer 17408 bits dans un volume spatial extrêmement réduit), fut installée sur un petit ordinateur que le M.I.T. avait spécialement fabriqué pour la circonstance. Ici aussi, les essais se révélèrent extrêmement concluants et en septembre 1953, la mémoire principale à C.R.T. du Whirlwind fut désassemblée pour se voir aussitôt remplacée par deux exemplaires de la mémoire à tores qui avait été éprouvée en 1953. Au mois de juin 1952, c'est-à-dire au moment même où les premières matrices à tores de ferrite étaient testées en conditions réelles, Forrester et son équipe entamèrent une série de négociations destinées à déterminer qui, parmi

divers grands industriels américains, fabriquerait en définitive les ordinateurs du système militaire S.A.G.E. (le M.I.T. étant un centre de recherche universitaire, il est évident qu'il ne disposait pas des moyens matériels qui lui auraient permis de mener à bien cette ultime phase du projet). Les entreprises postulantes étaient la *Bell Telephone Laboratories*, la *Radio Corporation of America*, I.B.M., la *Remington Rand* et la *Raytheon Corporation*. Après avoir minutieusement évalué les capacités de production et le savoir-faire de chacune de ces firmes en matière de recherche et de développement, il fut décidé que seuls I.B.M. et la *Remington Rand* pouvaient rester en lice pour l'obtention du contrat. La société dirigée par James H. Rand Jr. étant à cette époque en pleine phase de restructuration – elle venait tout juste de racheter l'*Engineering Research Associates* ainsi que l'*Eckert-Mauchly Computer Corporation* - il fut finalement jugé plus prudent de confier la fabrication des Whirlwind de série à I.B.M. (septembre 1953). Les machines I.B.M. à tores de ferrite devant être intégrées au S.A.G.E. furent rebaptisées AN/FSQ-7 (pour *Army Navy/Fixed Special Equipment*). La *Mc Guire Air Force Base* (New Jersey) en reçut le tout premier exemplaire au mois de juin 1956. Cinq ans après, les 27 unités restantes du *Semi Automatic Ground Environment* étaient installées et pleinement opérationnelles. Rapidement, les fabricants d'ordinateurs commencèrent à doter les principales machines de leurs gammes scientifiques et commerciales de mémoires à tores de ferrite. Ce fut par exemple le cas de l'E.R.A. (avec l'E.R.A. 1103A), de la *Sperry Rand* (avec l'U.N.I.V.A.C. II et l'U.N.I.V.A.C. 1103), de la R.C.A. (avec le B.I.Z.M.A.C.), mais aussi d'I.B.M. qui, en 1954, annonça la mise sur le marché d'une version améliorée de ses ordinateurs 701 et 702 (les modèles 704 et 705). Peu à peu, les mémoires à tores de ferrite remplacèrent les mémoires à tubes cathodiques et les mémoires à lignes délai acoustiques (quant on ne leur avait pas déjà substitué des dispositifs à C.R.T.). De plus en plus petites, de plus en plus performantes, elles devaient ainsi être massivement utilisées par l'industrie informatique jusqu'à la fin des années soixante, période où les semi-conducteurs à base de silicium commencèrent à être employées pour fabriquer des mémoires R.A.M.

Dans ce qui précède, nous nous sommes efforcés de démontrer quand et dans quelles circonstances les mémoires à tores de ferrite avaient été inventées. En retraçant les grandes lignes de cette aventure technologique relativement méconnue, il nous a ainsi été possible de préciser un peu mieux quel avait été le rôle exact tenu par chaque acteur ayant de près ou de loin contribué à leur création, qu'il se soit agi de scientifiques (P. J. Eckert, Andrew D. Booth, Frederick Viehe) d'instituts de recherche (Université d'Harvard, M.I.T.), de firmes industrielles (E.R.A., *Remington Rand*, R.C.A., I.B.M.), ou bien encore de corps militaires

(U.S. Navy, U.S. Air Force). Une chose, cependant, ressort clairement de cette analyse. Si les mémoires à tores de ferrite ont été en grande partie imaginées par des universitaires entre 1945 et 1950, c'est bien l'armée américaine qui, en finançant leur développement dans le cadre du projet S.A.G.E., a rendu possible leur concrétisation et leur production en masse à partir 1952-53. L'E.R.A. 1103A et le Whirlwind, les deux premiers ordinateurs à s'en trouver pourvus, résultaient en effet de commandes militaires. C'est ensuite, et ensuite seulement, que cette technologie de pointe commença à diffuser dans l'espace civil (principalement via des produits commercialisés par des firmes ayant collaboré ou collaborant avec l'armée). Si ce que nous venons d'exposer nous a permis de comprendre où, comment et pourquoi les mémoires à tores de ferrite ont vu le jour, il nous faut en revanche reconnaître que cela nous a laissés dans une certaine expectative quant au caractère *révolutionnaire* que l'on se plait si souvent à prêter à ces dispositifs. En quoi, alors, les matrices à tores de ferrite se différenciaient-elles radicalement des autres systèmes mémoire existant à l'époque ? Quelles sortes de propriétés exceptionnelles possédaient-elles donc qui leur permirent, pendant presque vingt ans, d'occuper le devant de la « scène » des mémoires informatiques ? Répondre à ces interrogations exige à présent que nous nous intéressions plus en détail au fonctionnement des mémoires à tores.

2.2.8.6. Mode opératoire des mémoires à tores de ferrite.

Dans un petit ouvrage remarquable qu'il a fort judicieusement intitulé *Mémoire pour l'avenir*, le philosophe François Dagognet a noté que le fonctionnement des matrices à tores de ferrite – c'est un exemple de dispositif d'enregistrement magnétique que cet auteur prend parmi d'autres possibles - repose sur « *les propriétés électromagnétiques et l'exploitation de l'hystérésis des oxydes de fer*⁷³⁵ ... ». La notion d'hystérésis, et plus particulièrement celle de cycle d'hystérésis rectangulaire (ou quasi rectangulaire), apparaît ici comme étant à la fois centrale et essentielle. Quiconque se donne pour tâche de comprendre comment fonctionnent les matrices bidimensionnelles ou tridimensionnelles à tores doit donc préalablement procéder à son éclaircissement. Qu'est-ce, alors, qu'un cycle d'hystérésis rectangulaire ? De quelle manière pouvons-nous définir cette propriété physique qui caractérise les matériaux tels que le *Deltamax* ? Pour toutes les substances ferromagnétiques existantes, une courbe d'hystérésis peut être représentée qui permet de définir et de visualiser les variations de l'induction dans

⁷³⁵ In [Dagognet, 1979], p. 75.

ces matériaux en fonction du champ magnétique variable auquel ils sont soumis. Les éléments toroïdaux des matrices mémorielles que nous avons décrites, rappelons-le, sont en fait de petits anneaux de matière ferromagnétique installés fixement à l'intersection de deux fils conducteurs perpendiculaires. Ce sont ces deux fils de contrôle qui, en fonction du courant électrique qu'ils transportent simultanément, permettent de modifier la rémanence - l'état d'aimantation persistant – dudit anneau.

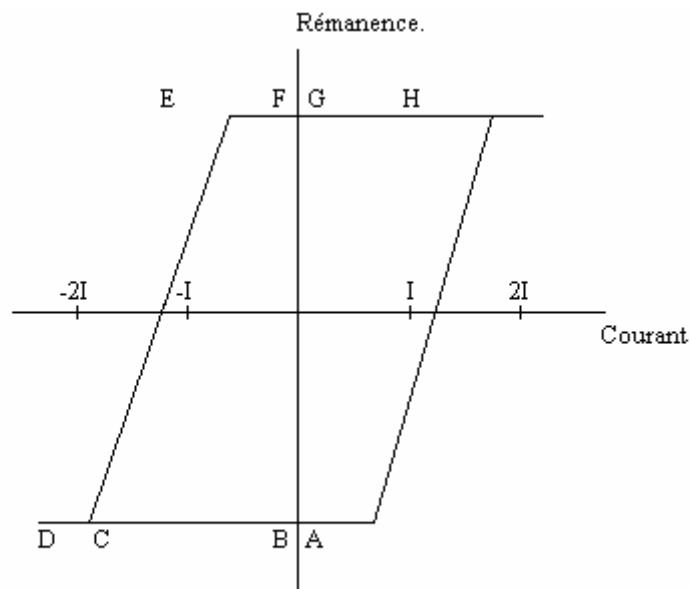


Fig. 29: un cycle (ou boucle) d'hystérésis rectangulaire.

Ci-dessus, nous avons représenté schématiquement un cycle d'hystérésis rectangulaire. Si un courant électrique positif I traverse en même temps les fils de contrôle horizontaux et verticaux à l'intersection desquels se trouve placé un tore T , l'état magnétique rémanent de ce dernier tend graduellement mais rapidement à se modifier et à se déplacer en direction de H sous l'effet du champ électromagnétique induit par ce courant (le tore finit par atteindre son seuil de saturation magnétique). Lorsque le courant cesse, cette rémanence se déplace alors vers F et cet état magnétique persiste. De la même manière, si un courant négatif $-I$ est appliqué⁷³⁶ simultanément aux deux fils conducteurs qui contrôlent T , son état magnétique rémanent se déplace d'abord en direction de D , puis de B quand le courant est coupé. Là aussi, il y a persistance de l'état magnétique qui a été induit électriquement. On constate donc qu'un

⁷³⁶ Il va de soi que l'intensité des courants de polarité positive ou négative appliqués aux paires de conducteurs de contrôle doit être strictement inférieure à l'intensité capable de faire passer l'un quelconque des tores de la matrice de l'état magnétique représentant un 0 à l'état magnétique représentant un 1 et inversement. Ainsi, puisque nous avons affaire ici à un réticulum seul le tore placé à l'intersection des deux fils activés subira, par sommation des flux électriques élémentaires, une action magnétique d'intensité suffisante pour basculer brusquement d'un état magnétique rémanent donné à l'autre. Ceci, sous un mode simplifié, n'est pas sans nous rappeler le fonctionnement des neurones.

flux électrique de polarité positive ou négative, selon le cas, peut être conservé dans un matériau magnétique (*e.g.* un tore en *Deltamax*) sans qu'il soit pour cela nécessaire de constamment alimenter celui-ci en énergie. On comprend également que puisqu'il existe ici deux états d'aimantation persistants bien définis et bien distincts, il est parfaitement possible de les utiliser pour représenter l'un ou l'autre de deux états informationnels : l'état magnétique rémanent F pourra par exemple servir à représenter un « 1 » tandis que l'état B pourra être employé pour figurer un « 0 » (ou inversement). Toutes ces opérations, bien entendu, se déroulent à des vitesses extrêmes et font intervenir des phénomènes électromagnétiques qui sont bien plus complexes que ce nous avons laissé supposer. Toutefois, c'est bien sur ce principe que repose fondamentalement le fonctionnement des mémoires à tores de ferrite. Comme nous pouvons le voir en examinant la figure ci-dessous, une mémoire à tores (ici elle est bidimensionnelle et correspond par conséquent à une sous unité ou « plan » de matrice tridimensionnelle), est constituée par un treillis de n fils parallèles équidistants et de m fils qui, en plus de posséder les mêmes caractéristiques géométriques que les premiers, leur sont aussi perpendiculaires. Cet arrangement métallique réticulaire, cette « simple trame cristalline » ainsi que la définit François Dagognet, nous autorise à calculer très aisément la capacité de stockage qui peut être celle d'une mémoire de ce genre. Il suffit pour cela d'effectuer le produit du nombre de fils conducteurs appartenant à ses groupes de fils horizontaux (n) et verticaux (m).

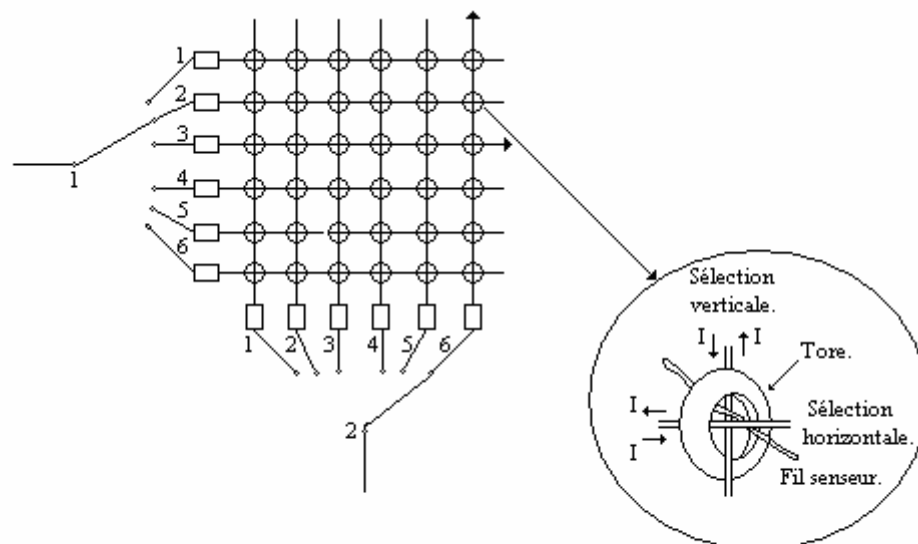


Fig. 30: matrice mémoire bidimensionnelle en tores de ferrite (plan élémentaire) et détail d'une unité de stockage.

Dans l'exemple ci-dessus – qui est parfaitement arbitraire – n et m sont égaux à la valeur 6. La capacité d'enregistrement d'un plan de cette sorte est donc de 36 bits, ce qui correspond finalement au nombre de tores (ou d'intersections filaires) qu'il comprend. En superposant un certain nombre de plans identiques à celui-ci (et en ajoutant bien sûr les circuits de contrôle nécessaires), on peut obtenir une matrice mémoire tridimensionnelle. Connaître alors la capacité de ce nouveau dispositif exige simplement que l'on réalise le produit suivant : $n \times m \times p$, où p désigne le nombre de plans bidimensionnels composant sa structure. Pour illustrer cela de façon plus concrète, il est possible de se référer à un exemple historique. On sait ainsi que les deux mémoires à tores qui furent montées sur le Whirlwind au mois de septembre 1953 possédaient une capacité individuelle de stockage de 17408 bits. Un rapide calcul montre que chacun des plans de ces mémoires comprenait 1024 nœuds (soit 32×32 ou 2^{10} tores), et que celles-ci comportaient 17 treillis élémentaires superposés ($32 \times 32 \times 17 = 17408$). Puisque la mémoire centrale du Whirlwind était constituée de deux de ces unités, elle permettait donc de stocker 34 816 bits. Passons à présent à l'étude des tores de ferrite. Chaque anneau de ce type (voir bulle détail de la figure n), est traversé en son centre par deux fils conducteurs disposés perpendiculairement. Ces anneaux étant fabriqués à partir d'un matériau ferromagnétique présentant un cycle d'hystérésis rectangulaire, ils peuvent prendre, en fonction du champ magnétique auquel ils se trouvent momentanément soumis, l'un ou l'autre de deux états magnétiques rémanents lequel permet à son tour de représenter une valeur binaire parmi deux possibles (1 ou 0). On remarque également que le tore est traversé par un troisième fil appelé « fil senseur ». A la différence des autres fils conducteurs qui n'autorisent le contrôle que d'un certain nombre d'anneaux (par opération de sélection), ce dernier est commun à l'ensemble des tores de la matrice : il passe en leur centre en décrivant une sorte de chemin sinusoïdal qui dessert la totalité des nœuds du treillis bidimensionnel. C'est ce conducteur qui permet en fait de lire la valeur binaire que stocke un tore. Evidemment, ici, ce ne sont pas à proprement parler des 1 ou des 0 que l'on lit. Ce sont plutôt des changements d'états magnétiques que l'on détecte. Comme le rappellent Pierre Demarne et Max Rouquerol, « *un conducteur qui traverse un tore aimanté est le siège d'une force électromotrice si l'aimantation du tore change brusquement de signe.*⁷³⁷ ». C'est cette propriété physique qui est directement mise à contribution ici pour détecter le sens de l'aimantation du tore et donc lire la valeur binaire qu'il sert à mémoriser. Dès lors, s'il est possible de faire basculer l'état d'aimantation persistant qui représente le 0 à l'état

⁷³⁷ In [Demarne et Rouquerol, 1985], p. 38.

d'aimantation qui représente le 1 en envoyant sur les fils de contrôle des tores un courant électrique de polarité inverse à celui qui a été spécifiquement utilisé durant la phase de magnétisation, on peut effectuer la lecture comme suit sachant que deux cas de figure peuvent être rencontrés : 1°) le tore se trouve dans l'état 1, son sens d'aimantation ne change pas, aucun signal électrique n'apparaît sur le fil senseur, un 1 est lu par l'ordinateur ; 2°) le tore est dans l'état 0, il passe à l'état 1 avec induction dans le fil de lecture d'un signal électrique caractéristique de cet état, un 0 est lu par l'ordinateur. Le problème est que cette façon de procéder entraîne la destruction des informations qui sont lues (cette méthode impliquait en effet que l'on altère le champ magnétique du tore accédé afin d'en récupérer le contenu informationnel). Il était donc impératif de doter les ordinateurs de circuits de régénération capable de reconstituer automatiquement l'enregistrement initial aussitôt celui-ci dégradé (lu). Toutefois le temps requis pour effectuer ces différentes opérations – écriture, lecture/restauration – était généralement de l'ordre de la microseconde. La vitesse de fonctionnement de l'ordinateur ne s'en trouvait donc que très modérément ralentie et tout demeurait quasiment transparent pour l'utilisateur. Ceci ayant été précisé, il nous reste encore à voir comment il était possible de sélectionner un tore particulier au sein d'une matrice planaire et comment, de la même manière, on pouvait sélectionner un mot de n bits dans une mémoire tridimensionnelle à n couches. Avec les mémoires à tores de ferrite, l'ordre dans lequel les anneaux étaient choisis puis utilisés était absolument indifférent. Ces dispositifs appartenaient par conséquent à la classe des mémoires à accès aléatoire (*random access memory*). Cet ordre, en fait, dépendait de l'ordre dans lequel les paires de fils de contrôle orthogonaux du système se voyaient automatiquement connectées par l'ordinateur aux différentes sources de courant disponibles. L'adresse individuelle d'un tore était ainsi spécifiée par deux identifiants numériques, un pour chaque fil conducteur le traversant (tel ou tel fil de contrôle traversait il est vrai tel « colonne » ou telle « ligne » de tores mais une paire de fils donnée ne se croisait qu'au centre d'un anneau bien déterminé). En fonction des opérations particulières ordonnées par le programme, la machine utilisait alors ce couple de coordonnées pour sélectionner un anneau particulier sans risque d'erreur. Remarquons qu'un bloc mémoire typique était en réalité constitué d'un certain nombre de plans superposés de mémoires à tores de ferrite (ceux que nous avons nommés jusque là « matrices bidimensionnelles»). L'ensemble des tores codant pour une information donnée (un caractère alphanumérique, un nombre, une instruction, etc.), se trouvait situé sur une même ligne verticale imaginaire traversant la structure matricielle de part en part: par exemple le tore d'adresse 1-4 du plan numéro 1 - en général il s'agissait du plan placé le plus au dessus de la

pile - aurait pu servir à représenter le premier bit d'un caractère alphanumérique, le tore d'adresse 1-4 du deuxième plan le deuxième bit de ce caractère, le tore d'adresse 1-4 du troisième plan le troisième bit de ce caractère et ainsi de suite (voir figure *n*, ci-dessous). En fonction du nombre de bits (de tores) susceptibles d'être lus (accédés) simultanément, on disait que la « voie d'accès » à la mémoire était plus ou moins « large ». Cette largeur de voie de la mémoire, ainsi que son temps d'accès, revêtaient une importance considérable puisque ce sont ces paramètres qui déterminaient en très grande partie les performances et le prix de l'ordinateur. En général, les mémoires à tores des machines les plus modestes possédaient une voie d'accès étroite, ce qui, pour manipuler un volume d'information de taille donnée, exigeait que l'on multiplie les accès à celle-ci. Les machines plus puissantes – qui étaient parfois dotées de plusieurs blocs mémoires à l'instar du Whirlwind – pouvaient effectuer des transferts d'information en quantités plus importantes. En contrepartie elles exigeaient des circuits de contrôle plus nombreux et plus complexes, ce qui les rendait inévitablement plus coûteuses. Ces quelques explications ont peut être contribué à faire entrevoir en quoi les mémoires à tores de ferrite étaient des dispositifs réellement révolutionnaires. Premièrement, et même si l'échelle employée ici pour composer les différents diagrammes que nous avons successivement présentés afin d'illustrer nos propos ne permet pas du tout de s'en rendre compte, il s'agissait de dispositifs extrêmement petits. Pour donner un simple ordre d'idée, Emerson W. Pugh⁷³⁸ a révélé qu'en 1952, la firme I.B.M. (en collaboration avec le M.I.T.) avait réussi à fabriquer des tores de 0,23 centimètre de diamètre extérieur et de 0,15 centimètre de diamètre intérieur. A la fin des années cinquante, un bloc mémoire se présentait donc sous la forme d'un cube d'une quinzaine de centimètres - parfois plus, parfois moins – d'arête. On réalise sans peine le gain spatial colossal que cela permettait de réaliser au sein d'une installation informatique (surtout par rapport aux volumineux tubes Williams, lesquels devaient de surcroît être employés en nombre). Deuxièmement, les mémoires à tores étaient de conception relativement simple. Elles ne nécessitaient aucunement l'usage de matériaux coûteux et le caractère élémentaire de leur structure finit même par autoriser une automatisation presque intégrale de leur production (chose absolument inimaginable avec les C.R.T. tant était délicate leur fabrication). Leur coût devait bien évidemment être ajusté en conséquence. Troisièmement, elles étaient d'une exceptionnelle fiabilité. On se souvient que les tubes cathodiques – leurs principaux « concurrents » - étaient des instruments onéreux et très fragiles.

⁷³⁸ In [Pugh, 1995], p. 210.

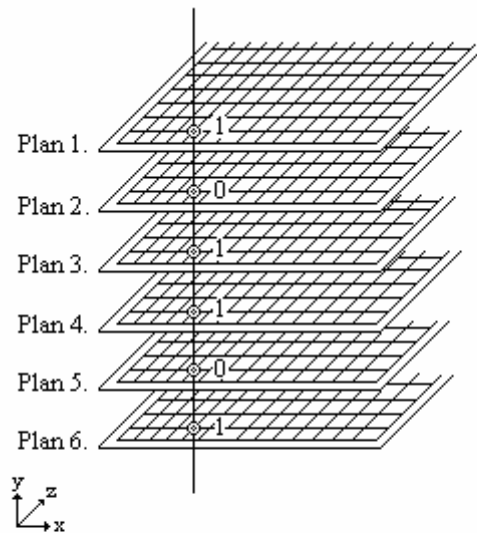


Fig 31: représentation schématique d'un bloc mémoire à tores. Sa voie d'accès est de six bits. La valeur binaire stockée sur l'ensemble de tores identifié par la ligne verticale imaginaire est : 101101.

Malgré les vérifications d'usage, il arrivait quelquefois qu'une petite irrégularité sur le revêtement de leur surface d'enregistrement demeure indécélable : à cause de ce défaut mineur, l'écriture ou la lecture des données pouvaient alors se voir gravement compromis et c'est un tube d'une valeur approximative de 1500 dollars qui devenait soudainement inutilisable. Or ce type d'incident ne se produisait quasiment jamais avec les mémoires à tores. Quand bien même un anneau - ou un groupe d'anneau - auraient par extraordinaire présenté quelques signes de défaillance, il était toujours possible de les remplacer individuellement – ou de remplacer le module planaire auquel ils appartenaient – à moindres frais. Quatrièmement, ces mémoires étant adressables (à la différence des lignes délai acoustiques ou des tambours magnétiques), elles offraient un temps d'accès extrêmement réduit à n'importe quelle information enregistrée, quel qu'ait été par ailleurs son emplacement précis au sein du réticulum tridimensionnel. Leurs dimensions physiques minimales permettaient encore d'améliorer ces performances puisque les « chemins » qu'avaient à parcourir les impulsions électriques représentant les informations binaires étaient de longueur proportionnelle. Lors des multiples accès qu'il effectuait à sa mémoire, l'ordinateur ne subissait donc que d'imperceptibles ralentissements d'où une amélioration pour le moins sensible des performances générales de l'installation informatique. Enfin, contrairement à tous les autres instruments de stockage employés à l'époque, il s'agissait de mémoires non volatiles. En d'autres termes, une fois que l'information avait été enregistrée, celle-ci

« persistait » indéfiniment dans le dispositif sans qu'il soit nécessaire pour cela d'alimenter ce dernier en énergie (comme c'était effectivement le cas avec les lignes délai, les C.R.T. ou les tambours). Non seulement ceci permettait d'économiser de l'électricité, mais en plus cela contribuait grandement à diminuer la quantité de chaleur dégagée par le système (une source importante de pannes comme on le sait). Evidemment, le nombre d'appareils destinés à la dissipation thermique pouvait être réduit en conséquence (d'où un gain financier, spatial, etc.).

Si l'on se remémore maintenant « le cahier des charges de la mémoire idéale » défini en 1948 par Sir Frederic Calland Williams et Tom Kilburn, on se rend compte que les mémoires à tores de ferrite, à un degré ou un autre, en satisfaisaient tous les points. Ainsi, elles permettaient de stocker les données de façon permanente (non volatilité), elles possédaient une capacité d'enregistrement importante, il était possible d'effacer tout ou partie de leur contenu et de le remplacer immédiatement par de nouvelles informations, leur temps d'accès en écriture et en lecture était extrêmement bref, l'effectuation de ces deux processus était précise et fiable (accès digital aléatoire), leur consommation énergétique était faible, elles pouvaient encore être produites en série et leur coût était peu élevé. Seul bémol à ce tableau idéal, et encore, Williams et Kilburn avaient en outre recommandé que la lecture d'une quelconque information ne devait jamais se solder par sa destruction (son effacement). Or, nous l'avons vu, c'est bien ce qui arrivait lorsqu'un tore quelconque était lu. Mais puisque la matrice mémoire comportait des circuits de régénération permettant de restaurer automatiquement et à très haute vitesse l'élément d'information accédé aussitôt la charge magnétique du tore le stockant détectée (effacée), ce dernier critère peut aussi être considéré comme pleinement satisfait. En raison de cet ensemble de propriétés extrêmement attractives – idéales ? - les matrices à tores de ferrite s'imposèrent comme *Le* dispositif de référence pour fabriquer les mémoires internes des ordinateurs de 1954 à 1970. Dans l'intervalle bien sûr, elles ne cessèrent de faire l'objet de perfectionnements successifs : la taille des tores diminua de plus en plus, celle des matrices aussi tandis que leur prix s'abaissait au fur à mesure que leur capacité de stockage et leur diffusion augmentaient. Dans l'intervalle, d'autres instruments reposant sur les mêmes principes physiques que ceux régissant le fonctionnement des mémoires à tores furent mis au point. On citera notamment les systèmes à aiguille, les films magnétiques fins ou encore les mémoires à bulles magnétiques. Aucun d'entre eux, cependant, ne parvint à détrôner le système inventé par Jay W. Forrester en 1952. Il fallut attendre la fin des années soixante et les toutes premières utilisations « mémorielles » des matériaux semi-conducteurs pour que cela se produise.

2.3. Transistors, circuits intégrés et ordinateur.

Avant d'entamer cette section, nous ferons part ici d'un « dilemme » qui concerne l'opportunité et la justesse qu'il peut y avoir ou non à vouloir parler du transistor – et plus généralement des matériaux semi-conducteurs – dans une partie spécifiquement consacrée à l'étude des mémoires centrales et auxiliaires des ordinateurs. Aujourd'hui tout un chacun peut se rendre chez un détaillant de matériel informatique pour acquérir une barrette de S.D.R.A.M. ou de D.D.R.A.M. - selon la nature de son équipement - afin d'augmenter la capacité de la mémoire de son ordinateur ou encore remplacer un module défaillant. La valeur marchande de ce type de produits est certes très fluctuante⁷³⁹ mais pour quelques centaines de francs à peine, il est généralement possible d'acheter 256, 512 Mo ou 1 Go de R.A.M. Il n'en fut pas toujours ainsi et lorsque nous écrivons cela, nous ne songeons ni aux performances, ni au coût, ni à la taille, ni non plus à la facilité avec laquelle il est désormais possible de se procurer ces éléments (sauf pénurie accidentelle ou organisée s'entend). Tout au long de cette partie, nous nous sommes employés à étudier l'histoire et le fonctionnement des divers sortes d'appareillages qui, dès la naissance de l'ordinateur, ont commencé à être développés en vue fabriquer sa mémoire interne et ses périphériques de stockage auxiliaires. Si certains de ces systèmes – nous pensons évidemment ici aux mémoires à tores de ferrite – en ont bien vite chassé d'autres tant ils étaient technologiquement révolutionnaires et économiquement profitables, il n'en demeure pas moins que l'ordinateur des années cinquante et soixante se présentait systématiquement comme une entité technique particulièrement hétérogène et complexe. En passant délibérément sous silence le cas des ordinateurs les plus « anciens », lesquels étaient parfois susceptibles de se voir modernisés, on constate que telle machine pouvait par exemple posséder une unité de traitement à tubes et une mémoire à tores tandis que telle autre, pourtant contemporaine de la première, était dotée d'une A.L.U. transistorisée et d'une mémoire à tores, etc. (cette combinatoire technologique étant évidemment rendue possible par la nature *logique* de l'architecture Von Neumann). Bref, sans qu'il soit même nécessaire ici d'invoquer l'impressionnant bestiaire des mémoires auxiliaires pour compliquer davantage la chose, force est de remarquer qu'en matière de construction d'ordinateurs, toutes sortes de configurations technologiques pouvaient être imaginées et que nombre d'entre elles furent effectivement actualisées. On comprend alors qu'à l'époque, une des principales préoccupations des scientifiques et des ingénieurs travaillant à l'élaboration des ordinateurs

⁷³⁹ Celle-ci tend en effet à subir des inflations infondées plus souvent qu'à son tour.

ait consisté à définir une solution permettant d'homogénéiser mais aussi de mieux contrôler cet ensemble excessivement composite. Une des premières tentatives allant dans ce sens fut l'œuvre de Munro K. Haynes (Université de l'Illinois/I.B.M.). En se basant sur les travaux de recherche exposés dans sa thèse de doctorat (thèse intitulée « *Magnetic Tores as Elements of Digital Computing Systems* »), M. K. Haynes rédigea fin 1950 un rapport qui démontrait que l'utilisation de tores de ferrite pour réaliser la partie arithmétique et logique des ordinateurs – et plus seulement leur mémoire interne - était chose théoriquement possible (tout comme cela devait être le cas quant on commença à utiliser des transistors, cette opération aurait tout de même nécessité un profond remaniement du design des circuits arithmétiques et logiques de la machine). A plus ou moins court terme, on souhaitait donc substituer aux A.L.U. à tubes à vide des systèmes fonctionnellement équivalents équipés cette fois de noyaux de ferrite⁷⁴⁰. Cette évolution projetée aurait ainsi permis d'augmenter notablement la fiabilité et la durée de vie des composants des unités centrales tout en autorisant une homogénéisation technologique presque intégrale des différentes parties de l'ordinateur. S'en serait ensuivies une simplification de la structure de la machine, une réduction de son encombrement et de sa consommation énergétique, un accroissement de ses performances, une baisse de son coût et une meilleure maîtrise de sa gestion. Cette standardisation des matériaux usités pour concevoir les unités principales de l'ordinateur – harmonisation matérielle que nous nous plaisons parfois à voir comme une sorte de « Saint Graal » de l'informatique - dû néanmoins attendre le début des années soixante-dix et avec elle la commercialisation des premières *puces mémoires* par la firme américaine *Intel* pour se voir effectivement réalisée. Nous n'établirons pas ici de liste exhaustive de machines pour démontrer cela mais on peut toutefois avancer avec certitude qu'entre la fin des années cinquante et le moment où apparurent les premiers modules mémoire en matériaux semi-conducteurs, la très grande majorité des ordinateurs comprenaient une mémoire interne à tores de ferrite et une unité arithmétique et logique composée, selon les phases spécifiquement considérées, de transistors ou bien de circuits intégrés.

Nous en revenons maintenant au « dilemme » que nous évoquions ci avant. Dans l'histoire des mémoires d'ordinateurs, les transistors et leur descendance, c'est-à-dire les circuits intégrés et les puces microélectroniques, constituent véritablement un cas à part. En ne perdant pas de vue le fait qu'une puce, quel que soit son niveau d'intégration, n'est « rien de plus » qu'une plaquette de silicium sur laquelle sont photogravés plusieurs dizaines de

⁷⁴⁰ Bien que certaines A.L.U. hybrides mêlant technologie des transistors et technologie magnétique aient vu le jour à partir de 1955, à notre connaissance, aucun système entièrement en ferrite ne fut jamais fabriqué.

millions de transistors, on constate la chose suivante : depuis soixante ans que l'ordinateur existe, les éléments transistorisés sont les seuls et uniques dispositifs à avoir été conjointement employés pour fabriquer l'unité arithmétique et logique de l'ordinateur *et* sa mémoire interne. Peut-être nous objectera-t-on ici que cette affirmation n'est pas entièrement vraie : les « mémoires » et les circuits logico-arithmétiques de l'E.N.I.A.C. n'étaient-ils pas les uns et les autres constitués d'un même type de composants élémentaires, à savoir des tubes à vide ? Interrogation à laquelle nous ne pouvons bien évidemment que répondre par l'affirmative. Cependant il convient ici de se rappeler deux choses. Premièrement, l'E.N.I.A.C. n'était pas un ordinateur mais un calculateur électronique. Deuxièmement, n'étant pas un ordinateur, ses accumulateurs numériques n'étaient pas à proprement parler des mémoires – ils ne constituaient surtout pas une mémoire interne – mais plutôt de simples registres offrant une capacité de stockage très modeste. En conséquence, on ne saurait considérer l'argument avancé ci-dessus comme légitimement recevable. Reste alors les ordinateurs à A.L.U. et mémoire interne en ferrite dont M. K. Haynes a démontré la possibilité théorique à la fin de l'année 1950. En négligeant délibérément le fait qu'aucune machine de ce genre n'a jamais été construite – l'apparition des premiers ordinateurs transistorisés en 1954-55 devait en effet étouffer *in ovo* cette filière tout aussi hypothétique que techniquement concevable – qu'est-il permis de remarquer maintenant ? Les tores de ferrite ont tout d'abord été utilisés pour fabriquer des blocs mémoires et c'est *ensuite* – peu de temps après certes mais ensuite quand même – qu'on a imaginé les employer pour fabriquer les circuits arithmétiques et logiques des machines. Or en ce qui concerne les transistors et les éléments transistorisés, c'est exactement l'inverse qui s'est (effectivement) produit : on a d'abord recouru à ces composants pour concevoir des A.L.U. *puis* on s'est tourné vers eux afin d'élaborer des unités mémoires. Cette particularité tout à fait unique dans l'histoire de l'informatique fait alors surgir un certain nombre de questions auxquelles il nous semble impératif d'apporter une réponse avant de poursuivre notre étude. Le transistor, comme chacun le sait, a été inventé aux *Bell Telephone Laboratories* en 1947 (le brevet correspondant ayant été déposé l'année suivante). Il était donc contemporain des tubes à vide, des lignes délai acoustiques, des tubes Williams ou des Selectrons. S'agissant de sa première mise en œuvre (connue) sur un ordinateur, elle date du mois de janvier 1954 : la machine en question était le *TRansistorized Airborne Digital Computer* (TRADIC), un système conçu par les *Bell Labs* à la demande de l'U.S. *Air Force*. En décembre de la même année elle fut suivie par le *TRANSistor Automatic Computer* (TRANSAC), de la *Philco Corporation* (une version améliorée du TRANSAC basée sur le dessin de l'U.N.I.V.A.C. 1103, le TRANSAC S-1000, fut d'ailleurs commandée peu de temps

après par la désormais célèbre *National Security Agency*). L'archétype technologique instancié par ces deux machines extrêmement novatrices mit à peu près une demi-décennie pour s'imposer totalement. Mais au début des années soixante, ainsi que l'a parfaitement remarqué J. Ramunni, la rupture paradigmatique introduite par le TRADIC et le TRANSAC était pour ainsi dire consommée et deux tendances fondamentales pouvaient alors se voir dégagées permettant de caractériser un secteur informatique entré en pleine phase de maturation et d'explosion économique. D'une part, sur le plan technique, « *deux éléments formaient la structure de base [des ordinateurs] : la mémoire principale construite en tores de ferrite et les semi-conducteurs de la partie électronique*⁷⁴¹ ». Concernant l'élaboration de cette dernière, il ne fut donc plus du tout question de recourir aux tubes à vide à partir de ce moment là. Quant à la solution du « tout en ferrite » définie par M K. Haynes, nous avons déjà fait mention de ce point, on ne chercha jamais à l'implémenter. On constate par conséquent que cette période cruciale correspondit à une phase d'homogénéisation des matériaux et de stabilisation des techniques de fabrication des machines. D'autre part, concepteurs et groupes d'utilisateurs devaient désormais s'efforcer de mieux maîtriser l'ordinateur, ensemble technique devenu nettement moins hétéroclite qu'auparavant, en développant des langages de programmation et des structures logiques de contrôle à même d'en simplifier et d'en optimiser à la fois le fonctionnement et l'usage. Pendant plus d'une dizaine d'années, les tores de ferrite représentèrent ainsi la technologie de référence en matière de conception de mémoires d'ordinateurs tandis que la technologie des transistors, elle, devait régner sans partage sur celle des unités arithmétiques et logiques. Si l'ordinateur, à cette date, constituait toujours une structure extraordinairement complexe – du reste, et bien évidemment, il l'est encore aujourd'hui – les différents types de composants élémentaires jusqu'ici employés pour le construire avaient vu leur nombre soudainement réduit au point que dans les années soixante, il n'en restait plus que deux. C'est alors qu'en 1970, la société *Intel* (ce nom fut forgé à partir de la contraction des termes *Integrated* et *Electronics*) annonça officiellement que ses chercheurs étaient parvenus à mettre au point la toute première puce mémoire⁷⁴² de l'histoire, la *Dynamic Random Access Memory Chip 1103*⁷⁴³. Révolution

⁷⁴¹ In [Ramunni, 1989], p. 170.

⁷⁴² La puce *Intel* D.R.A.M. 1103 fut en réalité précédée de deux modèles de type S.R.A.M., l'un et l'autre conçus entre 1968 et 1970 : la S.R.A.M 3101 (64 bits de capacité) et la S.R.A.M.1101 (256 bits de capacité). Rappelons que les puces appartenant à la catégorie des *Dynamic Random Access Memory* nécessitent un rafraîchissement périodique des informations qu'elles contiennent. Les *Static Random Access Memory*, elles, ne requièrent pas un tel processus pour fonctionner. Elles sont donc plus faciles à utiliser. En contrepartie, leur fabrication est plus complexe et leur coût plus élevé.

⁷⁴³ La chip *Intel* à accès aléatoire dynamique modèle 1103 permettait de stocker 1024 bits d'information. Il est intéressant de préciser que la même année, la *Fairchild Semiconductors*, société que Robert Noyce, Gordon

technologique au cœur même d'une révolution technologique amorcée quelques 17 ans auparavant, les mémoires internes intégrées à base de matériaux semi-conducteurs allaient métamorphoser la sphère informatique aussi sûrement que les matrices à tores de ferrite et les A.L.U. transistorisées l'avaient fait au début et au milieu des années cinquante. Leur apparition, on le comprend, devait entraîner pour ce domaine déjà inscrit dans une phase d'expansion explosive un certain nombre de transformations et d'évolutions radicales mais la plus importante de toutes, celle à partir de laquelle la totalité des autres devait finalement découler, était que l'ordinateur, pour la première fois depuis son invention, se présentait enfin comme un ensemble technique complètement homogène : son unité arithmétique et logique et sa mémoire centrale étaient faits *des mêmes matériaux*.

2.3.1. Le circuit intégré : l'idée monolithique, l'Année Géophysique Internationale et la « surprise » d'octobre.

Le principe du circuit intégré (*Integrated Circuit* ou *IC* en anglais) a été décrit pour la première fois en juillet 1958 par Jack St Clair Kilby, un ingénieur électronicien diplômé des universités de l'Illinois et du Wisconsin qui avait fait ses classes professionnelles comme concepteur de circuits électroniques à la division *Centralab* de la *Globe-Union Inc.* avant de rejoindre *Texas Instruments* au mois de mai 1958. Mais « l'humble géant », comme les gens avaient affectueusement coutume de le surnommer, ne devait pas être le seul à se voir officiellement crédité de l'invention du circuit intégré. Originaire de l'état d'Iowa, c'est en 1953 que Robert Norton Noyce décrocha son doctorat de physique au *Massachusetts Institute of Technology*. Presque immédiatement, il fut embauché par *Philco*. Trois ans durant, il exerça ainsi les fonctions d'ingénieur au sein de l'usine de transistors que cette firme avait installée à Philadelphie. En 1956, Noyce quitta son employeur et la Pennsylvanie pour intégrer la société que William H. Shockley venait tout juste d'établir en Californie du Nord. Cette expérience professionnelle fut toutefois de courte durée puisque qu'excédés par le caractère et les façons tyranniques de l'inventeur du transistor, Noyce et sept autres jeunes employés – dont Gordon Moore et Jean Hoerni – abandonnèrent le *Shockley Semiconductors Laboratory* pour fonder leur propre entreprise, la *Fairchild Semiconductors*. C'est là qu'en janvier 1959, soit six mois après que Kilby ait couché son idée dans les pages de son carnet de laboratoire, Noyce, de façon absolument indépendante, proposa sa propre version du circuit

Moore, and Andrew Grove avaient quittée en 1968 pour fonder *Intel*, annonça qu'une puce mémoire de type S.R.A.M. offrant une capacité de stockage de 256 bits avait été mise au point dans ses laboratoires.

intégré. Le fait que ces deux inventions qui, au fond, ne constituaient que des interprétations matérielles légèrement dissemblables d'un seul et même concept fondamental aient été isolément réalisées par deux individus à quelques mois d'intervalle est très révélateur. Evidemment, on ne saurait se laisser aller ici à interpréter cette « contiguïté chronologique » comme le fruit d'un hasard aussi heureux que bien improbable. Comme nous entendons le démontrer incessamment, il ne s'agissait pas d'une coïncidence. Prétendre encore que la notion de circuit intégré était « dans l'air » au(x) moment(s) où Kilby, puis Noyce, s'en « saisirent » respectivement se révélerait par ailleurs bien peu utile pour notre entreprise actuelle (même si c'est juste selon un certain point de vue). Ce serait simplement une manière bien commode de présenter les choses qui, en disant tout, n'expliquerait strictement rien...

A l'échelle de temps qui nous intéresse maintenant – c'est-à-dire la décennie des années cinquante – on peut affirmer avec entière certitude que l'idée consistant à fabriquer un circuit électronique miniature était déjà assez ancienne. On sait par exemple qu'au cours de l'été 1944, l'*Ordnance Development Division* (O.D.D.) de l'*U.S. National Bureau of Standards* travailla à l'élaboration d'une fusée de proximité pour le mortier lourd M1 de calibre 81 (3,18 pouces). La principale particularité de ces projectiles antipersonnel résidait dans le fait qu'ils étaient censés détoner aux environs immédiats de leur cible, en détectant celle-ci, et non en la percutant directement ainsi que le faisaient les roquettes de type conventionnel. Ce mode opératoire inhabituel nécessitait donc que leur système de mise à feu soit miniaturisé au maximum afin de pouvoir être logé dans un volume dont l'essentiel, comme de bien entendu, se trouvait déjà occupé par la charge militaire de l'arme. Un des partenaires industriels de l'O.D.D., la division *Centralab* de *Globe-Union*, suggéra alors l'emploi d'une solution technique inédite: celle-ci consistait à réaliser le dispositif de mise à feu de la roquette en utilisant un circuit électronique « sérigraphié ». Les composants de base de ce dernier devaient être des tubes à vide de très petites dimensions et leur support, un substrat constitué de céramique. Des tests furent bientôt conduits en ce sens qui devaient se révéler très encourageants. Après la guerre l'*Ordnance Development Division* et *Centralab* – firme qui rappelons-le employa Jack Kilby de 1947 à 1958 – poursuivirent leurs recherches sur les « *ceramic-base silk-screen circuits* » et produisirent diverses sortes d'appareils, notamment des prothèses auditives, reposant sur leur emploi. A notre connaissance le travail effectué en 1944 par l'O.D.D. et *Centralab* sur les projectiles spéciaux du mortier M1 représente un des tout premiers efforts engagés en vue de réduire notablement la taille d'un circuit électronique. En réalité ce travail avant-coureur devait annoncer la montée en puissance imminente du processus de miniaturisation, une évolution technologique

ininterrompue depuis lors dont les éléments déclencheurs véritables furent les exigences matérielles nouvelles exprimées par les militaires américains au sortir de la deuxième guerre mondiale. A la suite de ce conflit majeur, il était en effet devenu manifeste pour ces derniers que la fiabilité, l'encombrement, la masse et le coût représenteraient des facteurs absolument déterminants pour la mise au point des futurs équipements électroniques de l'armée. Etaient ici concernés en tout premier lieu les instruments dédiés aux opérations de télécommunication et de télédétection et plus particulièrement les systèmes appelés à être embarqués sur des plateformes où l'optimisation de l'espace et l'allègement de la masse totale avaient statut de préoccupations permanentes (nous songeons ici aux sous-marins, aux bombardiers légers ou lourds, aux jets, aux chars et aux missiles). L'expérience péniblement acquise par les Alliés sur les différents théâtres d'opération où ils s'étaient trouvés engagés pendant une demi-décennie avait clairement démontré l'importance immense que pouvait revêtir la maîtrise de l'information dans une guerre moderne. Dans les conflits à venir, et avec le perfectionnement prévisible des armes de tous types, des systèmes de détection et d'acquisition de cibles, de cryptage et de déchiffrement des messages, de calcul et de traitement rapide des données, cette tendance, c'était certain, ne pouvait évoluer que vers le renforcement⁷⁴⁴. L'Union Soviétique se posant désormais en plus sérieux rival militaire des Etats-Unis, il y avait plus que jamais urgence à perfectionner l'ensemble de ces matériels en tenant minutieusement compte de tous les paramètres et de toutes les contraintes déjà identifiés. La miniaturisation des systèmes électroniques et, si possible, l'automatisation de leur fabrication (ceci afin d'abaisser leur coût de production mais aussi d'améliorer les temps de conversion et de réactivité de l'industrie en cas de crise avérée) devaient constituer à la fois le cœur et la clef de voûte de cet ambitieux chantier de modernisation.

La première tentative à grande échelle allant dans ce sens fut celle conjointement menée par l'U.S. Navy et le *National Bureau of Standards* au début de l'année 1950. Financé par la marine et réalisé pour l'essentiel dans les laboratoires du N.B.S., ce projet fut baptisé *Tinkertoy* par Robert Henry, son principal concepteur. Sauf exception notable, il est peu de chance que cette désignation un peu curieuse évoque quoi que ce soit pour nous qui sommes nés de ce côté-ci de l'Atlantique. Et pour cause. *Tinkertoy* est en fait le nom d'un jeu de construction pour enfants inventé en 1913 aux Etats-Unis (de par son principe il est très semblable au *Meccano* ou au *Lego*). Mis à part ce penchant étrange qu'ont parfois certains à

⁷⁴⁴ Pour donner un simple exemple de cela, on estime à une soixantaine le nombre total de tubes à vide qui étaient employés sur un destroyer de l'U.S. Navy en 1937. En 1952, soit 15 ans plus tard, le même bâtiment en embarquait 3200, c'est-à-dire presque 54 fois plus.

préférer les qualifications les plus inattendues ou les plus ésotériques pour nommer tel projet ou tel objet, on est bien en droit de s'interroger sur le rapport qui existait – ou non - entre un jouet de ce genre, fut-il extrêmement populaire, et une entreprise militaire dont l'intérêt n'était rien de moins que vital. Contrairement aux apparences (il est vrai qu'elles peuvent être trompeuses), le choix de R. Henry était parfaitement rationnel. Ainsi que nous le faisons tout juste remarquer, les ensembles *Tinkertoy* étaient - et sont toujours⁷⁴⁵ - des jouets de construction. Constitués de plusieurs classes de petites pièces élémentaires compatibles entre elles sur le plan de l'assemblage (par exemple des bâtonnets ou encore des bobines), ils permettaient aux enfants de fabriquer toutes sortes d'objets tridimensionnels par combinaison et accumulation d'éléments. Outre l'idée de robustesse – on sait bien quels traitements les petits sont parfois capables de faire subir à leurs jouets préférés – les choses qui intéressaient en tout premier lieu le père du projet *Tinkertoy* dans le jeu éponyme étaient les notions d'uniformité, de simplicité et de modularité. *Mutatis mutandis* Robert Henry envisageait en effet d'appliquer au secteur de l'électronique militaire les idées clefs qui avaient fait le succès du jeu de construction inventé une quarantaine d'années auparavant par Charles Pajeau. Concernant le programme *Tinkertoy* et ses successeurs, on devait donc parler en général de *Modular Design of Electronics*, c'est-à-dire de conception ou d'approche modulaire de l'électronique. Pour le décrire brièvement tel qu'il était en 1953, on peut dire que le « système » *Tinkertoy* consistait en une ligne de machines spécialement conçues pour attacher de un à quatre composants électroniques simples sur une toute petite gaufrette (*wafers*) de céramique. Selon le type d'appareils fabriqué ces *wafers* de forme rectangulaire et de dimensions très réduites pouvaient être automatiquement interconnectés les uns aux autres afin de constituer des *modules*, sorte de blocs de construction élémentaires dont l'assemblage permettait ensuite d'obtenir des unités fonctionnelles complètes. Ces sous éléments intercompatibles, comme on pouvait s'y attendre, se distinguaient par leur compacité, leur simplicité et leur extrême solidité⁷⁴⁶, trois attributs particulièrement appréciés des militaires qui, pourrait-on dire, avaient été directement « hérités » du jeu de Pajeau... De 1950 à 1953, l'essentiel des tâches de recherche et de développement relatif à *Tinkertoy* - y compris la conception d'une usine pilote - échut au *National Bureau of Standards*. A l'issue de cette période qui vit la fin de la guerre de Corée, et alors que cinq millions de dollars avaient déjà

⁷⁴⁵ La compagnie *The Toy Tinkers* fondée au début du siècle par Charles Pajeau (un ancien tailleur de pierre), a fait l'objet d'un rachat par la firme *Playskool* en 1985.

⁷⁴⁶ On sait ainsi qu'à l'occasion d'une démonstration organisée à l'intention de représentants de l'armée, une radio *Tinkertoy* intentionnellement projetée contre un mur continua à fonctionner en dépit des dégâts provoqués par les chocs reçus.

été investis dans le programme, l'*Illinois Tool Works Inc.* établit enfin la toute première unité de production mécanisée *Tinkertoy*. A l'époque, il a été estimé que les coûts de fabrication liés à cette façon de produire qui, en plus de faire la part belle à l'automatisation, privilégiait aussi la standardisation, la miniaturisation et la modularité étaient de 44% inférieurs à ceux des méthodes de production conventionnelles. Les économies de temps et d'argent qu'elle permettait de réaliser étaient par conséquent des plus appréciables. Des postes radio militaires, des bouées sonar de lutte anti-sous-marine, mais aussi, semble-t-il, des instruments de guidage destinés au pilotage de certains missiles de la *Navy* sortirent ainsi des chaînes de montage de ces installations industrielles d'un genre nouveau. Pourtant malgré des investissements substantiels et des résultats que l'on peut sans doute qualifier de plutôt encourageants, le programme *Tinkertoy* ne bénéficia pas très longtemps de l'appui de l'armée et du gouvernement américains. Bien que novateur et avantageux, cet ingénieux concept qui déboucha notamment sur la création de micro tubes à vide en métal-céramique fut supplanté peu de temps après avoir été effectivement mis en œuvre : la trop grande complexité des automates assembleurs et surtout l'importance croissante que l'on commença à accorder au transistor à partir de 1950-51 (cette période étant celle des premiers symposiums *Bell*) eurent finalement raison de lui. Gardons-nous cependant d'une interprétation par trop hâtive qui consisterait à voir dans l'interruption du programme *Tinkertoy* le signe d'un soudain désintéressement des autorités américaines vis-à-vis du concept de *Modular Design of Electronics*. Ceci reviendrait en effet à commettre une erreur grossière. Si *Tinkertoy* fut bel et bien stoppé en 1953, la « philosophie » qui le sous-tendait, elle, lui survécut sans problème aucun. Fréquemment mentionné dès lors qu'est abordé ce sujet – à l'instar de J. Ramunni, M. Riordan et L. Hoddeson y font référence⁷⁴⁷ - Geoffrey W. A. Dummer, un ingénieur du *Britain's Royal Radar Establishment*, a su très précocement capter et exprimer « l'essence » de ce que l'on commença à connaître à cette époque sous le nom de *Monolithic Idea*. Dans une conférence consacrée à l'électronique qu'il prononça en mai 1952 à Washington D.C., Dummer devait ainsi déclarer :

« Avec l'arrivée du transistor et le travail actuellement effectué dans le domaine des semi-conducteurs, il semble dorénavant possible de réaliser l'équipement électronique sous la forme d'un bloc compact dépourvu de fils de connexion. Ce bloc pourrait être constitué de couches de matériel isolant, conducteur, redresseur et amplificateur, les fonctions électriques

⁷⁴⁷ In [Ramunni, 1989], p. 144-145 et [Riordan et Hoddeson, 1997], p. 255-256.

*étant alors directement connectées au moyen de coupures pratiquées à la surface de ces diverses couches*⁷⁴⁸ ».

La (nouvelle) direction à suivre se trouvait très clairement indiquée dans cet énoncé dont on ne peut au passage que saluer la portée anticipatoire véritablement remarquable. Tout en préservant l'essentiel des attributs qui caractérisaient le programme *Tinkertoy*, à savoir compacité, simplicité et robustesse, Dummer proposait qu'à l'avenir les modules, ou plutôt les blocs électroniques comme il les nommait, soient élaborés : 1°) en recourant à des composants réalisés en matériaux semi-conducteurs ; 2°) en supprimant les fils habituellement destinés à assurer les connexions entre ces composants. Six ans avant que Jack Kilby et Robert Noyce ne lui donnent forme concrète, et alors même que le transistor était encore chose relativement méconnue hors des *Bell Telephone Laboratories*, Geoffrey W. A. Dummer avait donc formulé une des toutes premières définitions du circuit intégré ! Cette approche du problème allait bientôt trouver un accueil extrêmement favorable au sein des différentes composantes de l'armée américaine.

Au début des années cinquante l'arrivée du transistor et des diodes en semi-conducteur, composants minuscules caractérisés par une fiabilité exceptionnelle et une consommation énergétique dérisoire, bouleversa la manière dont étaient conçus les équipements électroniques militaires. Ainsi ce qui pouvait apparaître hier comme totalement irréaliste en employant des tubes à vide, par exemple fabriquer un système de guidage embarqué pour un missile sol-sol ou encore un ordinateur qui n'occupe pas la surface d'un terrain de tennis, était devenu chose parfaitement concevable grâce à l'invention de Shockley, Bardeen et Brattain. La création de dispositifs électroniques « compacts » comprenant des centaines de milliers d'éléments relevait désormais de l'ordre du possible. En ce domaine au moins, de grands espoirs pouvaient être légitimement nourris. Tout, ainsi que l'a écrit Huxley, aurait pu aller pour le mieux dans le meilleur des mondes possibles si ce n'était l'existence d'une très importante difficulté technique qui menaçait de faire s'effondrer ce bel édifice d'optimisme technologique. Sachant que tout transistor, toute diode, toute capacité, bref tout composant électronique comportait plusieurs attaches externes nécessitant d'être individuellement reliées

⁷⁴⁸ La citation originale est : « *With the advent of the transistor and the work in semiconductors generally, it seems now possible to envisage electronics equipment in a solid block with no connecting wires. The block may consist of layers of insulating, conducting, rectifying, and amplifying materials, the electrical functions being connected directly by cutting out areas of the various layers* ». Elle est citée entre autres par M. Wolff dans « *The Genesis of the Integrated Circuit* », I.E.E.E. *Spectrum*, Août 1976, pp. 45-53. A l'origine, elle figurait dans la conférence intitulée « *Electronic Components in Great Britain* » que Geoffrey W. Dummer prononça en mai 1952 à Washington D.C.

à quelque chose d'autre, la tâche consistant à interconnecter à *la main* des milliers ou des dizaines de milliers de ces petits éléments pour confectionner des circuits promettait d'être absolument cauchemardesque. De fait pareille méthode de fabrication, en plus d'être excessivement coûteuse en temps et en argent, ne garantissait en rien une bonne fiabilité aux circuits (semblables remarques pouvant également être formulés à propos des opérations de localisation et de remplacement de composants en cas de défaillance d'un module). Où l'on voit par conséquent que si la miniaturisation et l'intégration croissantes de très nombreux composants électroniques comportaient moult avantages, elles s'accompagnaient aussi, si l'on ose dire, d'un obstacle de taille : celui représenté par la confection des liaisons entre ces multitudes d'éléments délicats que l'on s'employait désormais à rassembler au sein d'espaces de plus en plus restreints. De manière évidente, au fur et à mesure qu'augmenteraient la complexité et la densité des circuits - chose inévitablement appelée à se produire dans les secteurs de l'avionique, des télécommunications et de l'informatique par exemple - cette difficulté déjà fort inquiétante ne pourrait que tendre vers une évolution explosive. Il était donc indispensable de lui découvrir au plus vite une, voire plusieurs solutions, lesquelles devaient permettre de parvenir à un meilleur niveau d'intégration des composants tout en autorisant une diminution sensible du nombre de leurs interconnexions (idéalement on visait à les supprimer). Pour énoncer ceci encore différemment, on peut dire qu'il s'agissait ici de simplifier la connectivité des circuits sans pour autant cesser d'exhausser leur densité et leur rendement ; en bref, les américains étaient en quête d'un moyen qui leur permettrait de lutter efficacement contre ce qu'ils nommaient « *the tyranny of numbers*⁷⁴⁹ ».

Chacune de son côté, c'est-à-dire à sa manière et avec ses partenaires industriels propres - *Radio Corporation of America* pour la première et *Westinghouse Electric* pour la seconde - l'U.S. Army (programme *Micro-Module* du *Signal Corps*) et l'U.S. Air Force (programme *Molecular Electronics*) cherchèrent à apporter une réponse appropriée à cette question que la dégradation du contexte international et la « surprise » soviétique du 5 octobre 1957 - la mise en orbite réussie du *Sputnik* par l'U.R.S.S. - avaient contribué à rendre encore plus préoccupante. Sur le plan purement matériel il est vrai que ces deux armées⁷⁵⁰ optèrent pour des approches quelque peu différentes mais à un niveau plus radical, celui du concept, on peut sans conteste affirmer qu'elles poursuivaient exactement le même objectif : parvenir à fabriquer en masse des circuits électroniques à haut rendement qui soient fiables, compacts,

⁷⁴⁹ Cette « tyrannie des nombres » était aussi appelée « jeu des nombres » (« *numbers game* ») et « mur des nombres » (« *numbers barrier* », une référence évidente à la fameuse « *sound barrier* » que Chuck Yeager brisa le 14 octobre 1947 à bord d'un *Bell Aircraft Corporation X-1*).

⁷⁵⁰ Trois si l'on compte l'U.S. Navy et son projet *Tinkertoy* démarré en 1951.

solides et dépourvus de connexions. On reconnaîtra là aisément quelques-uns des traits essentiels de l'intuition, ou plutôt de l'idée *monolithique*, qu'avait formulée G. W. A. Dummer en 1952. Rappelons ici que le grec *μονό-λιθος* qui en français a donné le terme « monolithe », peut aussi être rendu dans notre langue par les locutions « pierre seule » ou « pierre unique ». Pour autant qu'elles suffisent à évoquer en nous l'image d'un Stonehenge ou bien encore celle du mystérieux bloc de matière noire de *2001 : a Space Odyssey*, nous nous accorderons peut-être à reconnaître que ce sont là des expressions où la solidité, la compacité, la simplicité, l'inaltérabilité, mais aussi le caractère lisse et froid généralement associés aux blocs minéraux transparaissent ou se laissent au moins deviner. Or ce sont très précisément ces qualités, pour tout dire ces propriétés « lithiques », que les promoteurs de l'idée de Dummer devaient s'efforcer de conférer aux circuits électroniques tout au long des années cinquante ainsi qu'au début des années soixante.

Si les premières manifestations concrètes de cette approche technologique révolutionnaire remontent à 1951-52 (avec le projet *Tinkertoy*), c'est un fait que celle-ci n'atteignit véritablement son apogée qu'à la fin de l'année 1957. La situation géopolitique internationale, les tensions militaires de l'époque et l'épreuve de force scientifique à laquelle les Etats-Unis et l'Union Soviétique commencèrent à se livrer ouvertement à partir de 1954-55 expliquent pour une très large part la montée en puissance à la fois formidable et fulgurante que connut alors l'idée monolithique. Aussi étonnant que cela puisse paraître un événement scientifique d'envergure mondiale, l'Année Géophysique Internationale, devait aussi jouer en cela un rôle absolument décisif... Suite à une suggestion émise par un membre de l'U.S. *National Academy of Sciences* (N.A.S.), Lloyd V. Berkner, le Conseil International des Unions Scientifiques proposa en 1952 que la période s'étalant de juillet 1957 à décembre 1958 soit déclarée *International Geophysical Year* (I.G.Y.). L'objectif de cette Année Géophysique Internationale - laquelle devait en réalité durer dix-huit mois - était finalement assez proche de celui des Années Polaires Internationales qui s'étaient déroulées en 1882-1883 et 1932-1933. Dans un esprit privilégiant coordination des recherches et partage de l'information scientifique, il s'agissait de permettre à des savants venus du monde entier de participer activement à des observations portant sur des phénomènes géophysiques et cosmiques. La période à laquelle devait se dérouler cet événement était d'ailleurs idéale pour la conduite de ce genre de travaux puisque loin d'avoir été déterminée au hasard, elle coïncidait en fait avec le pic d'activité maximale du soleil, une étoile qui possède un cycle de onze ans. Au mois de mars 1953, la N.A.S. nomma un comité national (l'U.S. *National Committee* ou U.S.C.N.) chargé de contrôler et de coordonner la participation des Etats-Unis à

l'I.G.Y. Le programme de recherches américain était fort vaste et il était prévu que de nombreuses disciplines scientifiques - on évoquera entre autres choses la météorologie, la géologie, la glaciologie l'océanographie ou encore la sismologie – soient représentées. D'importantes campagnes d'investigations furent également échafaudées qui devaient intéresser l'étude de la gravitation terrestre, celle de la haute atmosphère, des rayonnements cosmiques, de l'ionosphère et de l'activité solaire. En octobre 1954, les représentants du Conseil International des Unions Scientifiques se réunirent à Rome afin d'évoquer le déroulement de l'I.G.Y. A la suite de cette rencontre, les membres de la délégation américaine incitèrent leur gouvernement à mettre en place un programme de développement de satellites scientifiques. Cette proposition fut bientôt soumise à l'approbation de l'administration Eisenhower par Detlev Bronk et Alan Waterman (à cette époque le premier était président de la *National Academy of Sciences*, le second directeur de la *National Science Foundation*). Comme on le sait, il ne fallut que peu de temps aux hauts responsables de Washington pour se prononcer en faveur de l'ambitieux projet dont les deux hommes s'étaient faits les ambassadeurs. De fait, la perspective d'expédier des satellites artificiels autour de la Terre était toute aussi attrayante sur les plans civil et militaire qu'elle pouvait l'être sur le plan scientifique... Nul besoin par conséquent de la défendre envers et contre tous. La technologie étant prête – ou en passe de l'être –, il est vrai qu'il aurait été regrettable de remettre à plus tard le début de cette aventure qui promettait d'être exceptionnelle à bien des égards. De plus, l'I.G.Y. représentait pour cela une formidable opportunité.

Le 29 juillet 1955, la Maison Blanche annonça officiellement la participation des Etats-Unis à l'Année Géophysique Internationale. Le Président Eisenhower profita également de cette occasion pour révéler publiquement que le programme scientifique américain prévoyait la mise en orbite de petits satellites d'observation (projet *Bird*). Désormais, le monde entier était au courant des ambitions spatiales que nourrissaient les U.S.A. Un *Technical Panel* réunissant une dizaine de savants⁷⁵¹ issus de différents organismes vit alors le jour afin d'administrer les volets scientifiques, publics et institutionnels de l'*Earth Satellite Program* (E.S.P.). Entre autres responsabilités lui incombant, cette commission technique était chargée du recueil des propositions d'expérimentation, de leur sélection et de l'évaluation de leur niveau de priorité au sein du programme satellitaire. A en juger par la

⁷⁵¹ Les membres de cette commission technique étaient : Joseph Kaplan et Hugh Odishaw (U.S. *National Committee*), Homer E. Newell Jr. (*Naval Research Laboratory*), William Pickering (*California Institute of Technology's Jet Propulsion Laboratory*), Athelstan Spilhaus (Université du Minnesota), Lyman Spitzer (Université de Princeton), James Van Allen (Université de l'Iowa), et Fred Whipple (*Smithsonian Institution's Astrophysical Lab.*).

pléthore de demandes que reçut en très peu de temps ce comité d'experts – l'abondance était telle qu'elle nécessita d'ailleurs la mise sur pied de deux groupes de travail supplémentaires pour trier et hiérarchiser les requêtes des chercheurs - l'accueil que la communauté scientifique américaine réserva à l'*Earth Satellite Program* ne fut rien de moins qu'enthousiaste. De ce point de vue, l'E.S.P. était donc un immense succès. Mais bien entendu les choses ne sauraient se voir réduites ici à leur seul versant scientifique. Plus symboliquement - plus politiquement conviendrait-il plutôt de dire – l'*Earth Satellite Program* visait en effet à démontrer à la planète en général et à l'U.R.S.S. en particulier combien était immense la supériorité technologique et financière des U.S.A., la nation où en l'espace d'une dizaine d'années à peine la bombe atomique, le calculateur électronique, l'ordinateur, le transistor et la bombe à hydrogène avaient été conçus. Cinq jours seulement après l'allocution d'Eisenhower, Leonid I. Sedov⁷⁵² annonça que l'Union Soviétique, elle aussi future participante à l'I.G.Y., avait également l'intention de placer des satellites sur orbite lors de cet évènement. Bien qu'elle ait été faite en des circonstances officielles – c'était à Copenhague, durant le sixième congrès de la Fédération Internationale Astronautique – la déclaration de Sedov tomba à plat. Pour la plupart des observateurs en effet, il ne faisait aucun doute que les jeux étaient déjà faits : en ce domaine comme en beaucoup d'autre, l'Amérique paraissait de loin la plus forte. Qui plus est la propension bien connue de N. Khrouchtchev à tout appréhender à travers le prisme du politique - pour ne pas dire à faire de toute chose un objet de défi idéologique - incitaient plutôt ici à adopter une posture d'indifférence plus ou moins marquée. Nombreux furent ceux qui virent ainsi dans les propos du représentant scientifique du chantre de la déstalinisation la traditionnelle réponse du berger à la bergère. Une réponse bien évidemment commandée par les exigences d'un appareil de propagande anticapitaliste huilé à la perfection. L'aveuglement, et, il faut bien le dire, l'arrogance dont firent ensuite systématiquement preuve les américains à l'endroit des soviétiques suffit à faire le reste⁷⁵³. C'était sans compter sur le génie et l'obstination des hommes du cosmodrome de

⁷⁵² Leonid Ivanovich Sedov, en plus d'être un éminent universitaire spécialisé en mécanique, était président de la Fédération Internationale Astronautique. Il devint par la suite porte-parole du programme spatial soviétique et membre de l'Académie des Sciences de Moscou.

⁷⁵³ Entre le jour où L. I. Sedov annonça que l'U.R.S.S. avait décidé de lancer un satellite (2 août 1955), et celui où le *Sputnik* commença à émettre son signal si caractéristique (nuit du 4 au 5 octobre 1957), la Pravda et Radio Moscou ne cessèrent de diffuser des informations relatives aux caractéristiques techniques du futur engin. Ainsi, pendant presque deux ans, les soviétiques fournirent ouvertement des indications au sujet de sa taille, de sa masse, de ses fréquences d'émission, de sa trajectoire orbitale, etc. Alors que ces données techniques étaient accessibles à tous, elles ne furent jamais considérées autrement que comme des éléments de propagande par les américains.

Tyuratam-Baïkonour, Mikhaïl Tikhonravov, Georgui Gretchko, Nikolai Koutyrkine et Sergueï Korolev en tête.

Le 5 octobre 1957, la planète, complètement interdite, apprit qu'une fusée soviétique 8K71⁷⁵⁴ mise à feu le jour précédent (à 22 h 28, heure de Moscou), avait placé sur orbite un petit satellite artificiel surnommé *Iskustvennyi Sputnik Zemli* (littéralement « le compagnon de route de la terre »). Contre toute attente, les soviétiques étaient parvenus à coiffer les américains au poteau. L'Histoire retiendrait donc que le suprême honneur d'écrire la première page du grand livre de l'aventure spatiale humaine leur était revenu. Toutefois, comme le comprirent bien vite les opinions publiques occidentales, la performance technique accomplie ici par les savants communistes ne résidait pas dans le satellite lui-même – il ne s'agissait finalement « que » d'une boule métallique de 53 centimètres de diamètre contenant un petit émetteur radio calé sur deux fréquences - mais dans le lanceur qui avait été employé pour expédier celui-ci dans l'espace. C'était en effet une fusée *Semiorka* R-7 modifiée, c'est-à-dire un missile balistique intercontinental de type SS-6 *Sapwood* spécialement transformé pour l'emport d'une cargaison scientifique... Cet exploit avait peut-être été réalisé dans le contexte « pacifique et ouvert » de l'Année Géophysique Internationale, le message n'en était pas moins passé tout à fait clairement. Chacun était désormais au courant du fait que l'U.R.S.S. disposait de vecteurs à longue portée capables de délivrer des charges militaires en n'importe quel point du globe. Inutile de s'étendre longtemps sur la vague de stupéfaction (parfois teintée d'effroi) qui frappa à ce moment les Etats-Unis. La bourse perdit quelques quatre milliards de dollars en l'espace de trois jours et alors que les gros titres des quotidiens rivalisaient à grands coups de prédictions apocalyptiques et/ou de déclarations accusatrices, le Sénateur démocrate Lyndon B. Johnson demandait à ce que de hauts responsables militaires et gouvernementaux viennent publiquement expliquer pour quelles raisons l'impensable – l'Adversaire venait de prendre un avantage plus que décisif dans la course à l'armement et à l'espace - avait pu se produire. Comme si cela ne suffisait pas, les soviétiques réitérèrent leur exploit le 3 novembre 1957. Cette fois-ci, à la surprise et à l'inquiétude déjà éprouvées par les américains vint s'ajouter un profond sentiment d'humiliation. Tandis que les experts occidentaux s'échinaient à évaluer le temps qui s'écoulerait certainement entre la mise en orbite du premier satellite artificiel et l'envoi d'un être vivant dans l'espace – le délai avancé par ces derniers variant parfois de un à dix ans ! – les radios amateurs du monde entier pouvaient déjà entendre les battements de cœur de la petite chienne Laïka que le deuxième

⁷⁵⁴ La dénomination américaine de la fusée soviétique 8K71 était A/SL1.

Sputnik retransmettait depuis l'espace. Si l'inquiétude suscitée outre-Atlantique par le premier succès spatial de la Mère Patrie n'était pas encore à son comble, elle avait maintenant toutes les raisons de l'être. En effet, alors que la masse du premier *Sputnik* excédait légèrement 83 kilogrammes, celle de son successeur dépassait la demi-tonne (508,3 kg, animal compris). Du point de vue des militaires occidentaux, on comprend naturellement que pareille augmentation de la masse de l'orbiteur soviétique ne pouvait rien laisser présager de bon quant au réel niveau d'opérationnalité stratégique du missile *Semiorka* R-7 (la version armée du lanceur 8K71). Tout indiquait qu'il fonctionnait très bien et qu'il était extrêmement puissant.

Déjà très inconfortable, la situation des américains à ce moment précis se fit d'autant plus critique et incertaine qu'ils ne cessaient de rencontrer d'importants problèmes techniques dans le développement de leur fusée multi étage *Vanguard*, le lanceur *civil* en partie dérivé du missile *Viking* qu'ils entendaient initialement employer pour satelliser *Explorer I*. Si l'on nous permet à présent de le broser à grands traits, le tableau, dans les tout derniers mois de l'année 1957, était donc le suivant : déjà fort de bombardiers à long rayon d'action, de bombes atomiques et de bombes à hydrogène, l'arsenal stratégique soviétique venait de s'enrichir de missiles capables d'emporter des charges militaires d'une demi-tonne (au moins) à des milliers de kilomètres de distance. De leur côté, les américains (pourtant donnés vainqueurs de cette ahurissante « compétition » avant même qu'elle ne débute vraiment) éprouvaient la plus grande peine du monde à fiabiliser une fusée conçue pour propulser un satellite scientifique pesant à peu de choses près 14 kilogrammes (*Explorer I*).

La réaction des Etats-Unis fut comme on le sait à la hauteur du camouflet scientifique, technologique, politique et idéologique que l'U.R.S.S., par deux fois en moins d'un mois, leur avait infligé au vu et au su de la planète entière. Peu de temps après le lancement du premier *Sputnik*, le gouvernement américain décida de procéder à un renforcement sérieux de son programme satellitaire. Un deuxième véhicule de lancement, le *Jupiter C*⁷⁵⁵, fut ainsi développé par l'*Army* dans l'hypothèse où le lanceur *Vanguard* se révélerait incapable de mener à terme sa mission. Même si elle compliqua davantage encore le travail des gens en charge de la conception du satellite et de ses équipements - il fallait dorénavant compter avec les spécificités techniques de deux fusées et non plus avec celles d'une seule - cette mesure de sécurité « redondante » prise peut-être un peu tardivement s'avéra en définitive autant avisée

⁷⁵⁵ La fusée *Jupiter C* - rebaptisée *Juno C* par l'équipe de Werner Von Braun – était dérivée du missile balistique à moyenne portée *Redstone* (à l'origine cet I.R.B.M. s'appelait *Hermès C1*). Notons que le *Redstone* fut le premier gros missile américain à carburant liquide conçu sur la base de la technologie du V-2 allemand.

que salutaire. Pour les américains en effet, le point culminant de la crise - et très certainement aussi celui de l'humiliation publique - fut sans nul doute atteint le 6 décembre 1957 lorsque le lanceur *Vanguard TV-3* dont la coiffe abritait leur tout premier satellite explosa sur le pas de tir n°18A de Cap Canaveral. Amplement filmé par les caméras de la télévision américaine ce lancement qui se devait d'être historique dura moins de deux secondes. Deux secondes au cours desquelles l'engin censé redonner confiance à l'Amérique et restaurer sa crédibilité scientifique et militaire sur la scène internationale s'était haussé à une hauteur dépassant tout juste le mètre. Une performance désastreuse, donc, au regard des enjeux politiques, stratégiques et idéologiques colossaux qui se trouvaient placés ici en balance.

On dû attendre jusqu'au 31 janvier 1958 pour voir enfin un satellite américain orbiter autour de notre planète. Lancé au moyen d'une fusée *Jupiter C*, *Explorer I* fut une véritable réussite scientifique puisque ses systèmes de mesure embarqués permirent de mettre en évidence l'existence de ceintures de particules à haute énergie dans la magnétosphère terrestre⁷⁵⁶. Les missions *Explorer* prirent fin le 13 octobre 1959 avec le lancement d'*Explorer VII*. L'Année Géophysique Internationale était donc révolue depuis quelques mois déjà mais il en allait bien sûr tout autrement de la conquête spatiale à l'aube de laquelle elle avait en quelque sorte servie de toile de fond planétaire. Avec les *Sputniks*, *Explorers* et autres satellites de type *Vanguard*, un nouveau chapitre de l'histoire de l'humanité venait en effet de s'ouvrir dont les enjeux véritables, ainsi qu'en témoigne la teneur plutôt lucide de la déclaration officielle qu'il fit le 7 janvier 1958, étaient loin d'avoir échappé à la perspicacité du Sénateur Lyndon B. Johnson :

« The sputniks now orbiting the earth are not military weapons, but have military potential. Control of space means control of the world, far more certainly, far more totally than any control that has ever or could ever be achieved by weapons, or by troops of occupation. The race we are in - or which we must enter - is not the race to perfect long-range ballistic missiles. There is something more important than any ultimate weapon. That is the ultimate position - the position of total control over earth lies somewhere out in space. This is the future, the distant future, though not so distant as we may have thought.

⁷⁵⁶ On a appelé ce phénomène « ceintures de Van Allen », d'après le nom du physicien James A. Van Allen qui l'identifia (rappelons que celui-ci était membre de la commission technique de l'*Earth Satellite Program*).

*Whoever gains that ultimate position gains control, total control, over the earth for purposes of tyranny or for the service of freedom*⁷⁵⁷. ».

S'agissant de qualifier le sentiment provoqué par la mise en orbite du premier *Sputnik* au sein de l'opinion publique américaine, Roger D. Launius et Steve Garber⁷⁵⁸ n'ont pas hésité à employer l'expression de « *Pearl Harbor effect* ». La formule, sans qu'il soit besoin de la traduire, parle d'elle-même... Comme nous nous sommes attachés à l'exposer brièvement, l'ère spatiale avait débuté de façon particulièrement défavorable pour les hommes de l'administration Eisenhower-Nixon. Ayant péché par excès de confiance et d'auto complaisance tout autant que par mésestime des capacités réelles de l'adversaire⁷⁵⁹, les haut responsables américains s'étaient trouvés dans l'incapacité de voir venir un « coup » dont nul, depuis 1955, n'avait pourtant cherché à leur dissimuler quoi que ce soit. Aux préoccupations militaro-diplomatiques « normalement » engendrées par le climat de guerre froide vint donc se greffer une grave crise politique intérieure nourrie par une impression de vulnérabilité et de perte de confiance à la fois inédite et généralisée. Pour ajouter davantage encore à l'aspect critique de la situation, les soviétiques parvinrent à mettre en orbite un troisième *Sputnik* le 15 mai 1958. Bardé d'instruments scientifiques, le nouvel engin pesait 1327 kilogrammes⁷⁶⁰. On comprend dès lors que l'adoption de mesures capables de réduire au plus vite l'écart technologique qui ne cessait de s'accroître ici entre l'U.R.S.S. et les U.S.A. soit devenue une priorité absolue pour les autorités américaines.

Parmi les différentes dispositions que les Etats-Unis prirent en 1958 pour répliquer aux soviétiques et combler ce qu'il était alors coutume de nommer le « *missile gap* », on fera tout d'abord état du *National Aeronautics and Space Act* voté par le Congrès au cours du mois de juillet. C'est en effet ce décret qui conduisit à la création de la *National Aeronautics and Space Administration* – la célèbre N.A.S.A. - au 1^{er} octobre de la même année. Remplaçant (et absorbant) le *National Advisory Committee on Aeronautics*, une agence gouvernementale essentiellement orientée vers la recherche en laboratoire, la N.A.S.A. reçut pour mission prioritaire le développement de programmes aérospatiaux opérationnels. Cette redéfinition

⁷⁵⁷ Discours du 7 janvier 1958, cité notamment dans Robert Salkeld, *War and Space*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1970, p.135.

⁷⁵⁸ Roger D. Launius occupe la fonction d'historien en chef à la N.A.S.A. Steve Garber est quant à lui conservateur du bureau des études historiques (*History Office*) que l'agence spatiale américaine a mis en place sur Internet. Ce site officiel pourra être consulté au : <http://history.nasa.gov/index.html>

⁷⁵⁹ Attitude difficilement compréhensible que l'astronome britannique Sir Bernard Lovell s'est plu à qualifier comme suit : « *American blind disbelief in the powerful advance of Soviet science and technology* ».

⁷⁶⁰ Il a été estimé qu'à lui seul *Sputnik 3* avait emporté plus de systèmes scientifiques que l'ensemble des satellites américains envoyés dans l'espace avant l'année 1959.

radicale des objectifs à poursuivre devait bien évidemment s'accompagner d'une augmentation substantielle des moyens de fonctionnement. Alors que, respectivement, le budget et les effectifs du N.A.C.A. n'avaient jamais excédé 5 millions de dollars et 500 personnes, ceux de la N.A.S.A. se chiffrèrent très rapidement en centaines de millions (222,8 M\$ pour 1959) et en dizaines de milliers d'employés. Un *National Defense Education Act* fut également promulgué pour débloquer les millions de dollars jugés nécessaires à l'amélioration de l'ensemble du système éducatif américain. Un système éducatif où l'enseignement des sciences et des mathématiques devait désormais être mis à l'honneur en prévision des défis que l'Amérique de demain serait très certainement contrainte de relever. Toujours en 1958, et à la demande de Dwight D. Eisenhower, le tout puissant *Department of Defense* établit un nouvel organisme de recherches, l'*Advanced Research Projects Agency*, chargé du développement de nouvelles technologies à des fins militaires et spatiales. Principalement focalisée sur des projets à court terme (de 2 à 4 ans en moyenne) l'A.R.P.A., au moins à ses débuts, était une petite structure (environ 240 personnes), dotée d'un budget proprement colossal (2 milliards de dollars). Le but poursuivi avec cette agence consistait à reconquérir, puis à conserver, un avantage technologique décisif sur l'adversaire soviétique (les technologies impliquées étant jugées trop sensibles pour se voir confiées sans risques à des partenaires industriels ordinaires). Parmi les réalisations de l'A.R.P.A.⁷⁶¹ dont nous avons directement hérité, on citera Internet (le réseau des réseaux est en effet le descendant direct du système militaire ARPAnet), la version Berkeley du système d'exploitation Unix ainsi que le protocole de communication informatique TCP/IP... Sur le plan diplomatique maintenant, le lancement des *Sputniks* eut pour conséquence directe un réchauffement des relations entre la Grande-Bretagne et les Etats-Unis. Les rapports entre ces deux nations alliées s'étaient en effet considérablement dégradés depuis 1946 en raison notamment de la promulgation de l'*Atomic Energy Act*, un décret officiel destiné à priver l'Angleterre de son « droit » à accéder aux secrets nucléaires américains (évidemment l'attitude adoptée par les dirigeants américains vis-à-vis des anglais pendant la crise de Suez ne devait contribuer en rien à l'amélioration de cette situation). La menace collective que les fusées et les satellites soviétiques commencèrent à faire peser sur les pays occidentaux à partir de 1957-58 suffit toutefois à mettre un terme à ces dissensions et conduisit de fait à un renforcement des liens entre les pays signataires du traité de l'O.T.A.N. La guerre froide, au sens strict, prit alors fin pour laisser place à un

⁷⁶¹ Précisons que l'*Advanced Research Projects Agency* a été repablisée *Defense Advanced Research Projects Agency* (D.A.R.P.A.) en 1972. Entre 1972 et 1996 - la date précise de ce changement et les motifs qui y ont conduit nous sont encore inconnus - la D.A.R.P.A. est redevenue A.R.P.A. Enfin, 1996 est l'année où l'A.R.P.A. a été renommée D.A.R.P.A. !

épisode historique très souvent qualifié de « coexistence pacifique » (alors que Raymond Aron, lui, préférerait employer ici l'expression à notre sens beaucoup plus appropriée de « paix belliqueuse »). Comme nous le savons tous, la confrontation directe entre les deux superpuissances thermonucléaires ne se produisit jamais. Il n'empêche : commandée en permanence par une logique stratégique aussi fragile que démentielle - la bien nommée MAD pour *Mutual Assured Destruction* - cette soi-disant « période de détente » se caractérisa de part et d'autre par la mise en œuvre d'une économie de surenchère exorbitante dans les secteurs de l'armement et de l'aérospatiale. L'informatique et l'industrie des semi-conducteurs de la fin des années cinquante devaient trouver dans ces deux domaines très fortement connexes un marché d'une richesse absolument exceptionnelle. Un marché qui, à bien des égards, contribua à leur garantir le spectaculaire essor que l'on sait.

2.3.2. Le circuit intégré et les mémoires intégrées en semi-conducteurs.

2.3.2.1. L'invention du circuit intégré : Jack St Clair Kilby et *Texas Instruments.*

L'importante crise provoquée aux Etats-Unis par les premières réussites spatiales soviétiques conduisit les dirigeants américains à prendre des mesures sans précédent pour réduire le retard que leur pays, de façon extrêmement inquiétante et dangereuse, avait accumulé dans ce domaine par rapport à l'U.R.S.S. Ainsi que nous l'avons indiqué antérieurement, les programmes scolaires et universitaires virent leurs composantes scientifiques passablement renforcées tandis que de nouvelles et puissantes agences gouvernementales à vocation scientifique ou militaro-scientifique, telles la *National Aeronautics and Space Administration* et l'*Advanced Research Projects Agency*, furent créées. Si l'on s'en tient aux données les plus évidentes – ce qui pour notre présent propos est amplement suffisant – on peut sans doute affirmer que les buts poursuivis à partir de 1958 par les américains étaient relativement simples. Ces derniers voulaient tout d'abord rétablir une suprématie militaire et une parité astronautique que les fusées de type *Semioroka* et leurs satellites avaient fait lourdement vaciller. Il s'agissait ensuite pour eux, comme on dit, d'inverser complètement le flux de la vapeur, c'est-à-dire de ne pas seulement se satisfaire d'une reconquête du terrain perdu mais bel et bien de défaire les soviétiques au jeu où, de fait, ils étaient maintenant les plus forts. Afin de combler le « *missile gap* », mais aussi de conquérir la première place d'une course aux étoiles dont on ne faisait alors qu'observer les

prémices, des ressources financières proprement gigantesques furent mobilisées et distribuées aux nombreux acteurs intéressés des secteurs de la défense, de la recherche, de l'industrie et de l'éducation (avec cette conséquence que les universités eurent désormais un peu plus de facilité pour acquérir un ordinateur). Si l'on se souvient bien, nous avons déjà mentionné à plusieurs reprises que les lanceurs utilisés à cette époque par les soviétiques étaient incomparablement plus puissants que les fusées et les missiles conçus aux Etats-Unis. C'est cette limitation notable de la capacité de poussée des réacteurs des engins militaires ou spatiaux américains qui devait contraindre les responsables de leur développement à accorder une attention extrême à la masse et à l'encombrement de leurs systèmes de contrôle embarqués ainsi qu'à ceux des éléments électroniques composant leur charge utile (e.g. les satellites). Concernant ces deux facteurs spécifiques il était en effet évident que pour espérer rattraper au plus vite les soviétiques, et même les devancer, les économies les plus drastiques devaient impérativement être réalisées. En substance, on l'aura compris, il s'agissait pour les américains de parvenir à alléger et à miniaturiser davantage et mieux encore les composants électroniques que ce qu'ils étaient alors capables de faire. Or puisqu'en l'occurrence ce n'était ni plus ni moins que la sécurité de la nation et celle de ses centaines de millions d'habitants qui se trouvaient engagées – à l'époque l'ombre du lanceur spatial était également celle du missile balistique intercontinental - l'effort en question devait être fait, quoi que cela puisse effectivement coûter sur le plan financier. C'est pour répondre à cette exigence primordiale que les programmes « monolithiques » militaires *Micro-Module* (*Army Signal Corps/R.C.A.*) et *Molecular Electronics* (*Air Force/Westinghouse Electric*), furent démarrés en 1958 à grands renforts de dizaines de millions de dollars⁷⁶². Les fabricants de composants électroniques en semi-conducteurs de la fin des années cinquante trouvèrent dans les domaines astronautique et militaire un marché en complète explosion où la variable coûts, compte tenu de l'ampleur des enjeux, ne représentait pas véritablement un problème. De très grands groupes industriels possédant des capacités d'innovation et de production écrasantes prirent évidemment une part active à cette aventure. Ainsi la *Radio Corporation of America* travailla-t-elle de façon étroite avec l'armée de terre tandis que les *Bell Laboratories*, eux, collaborèrent activement avec la N.A.S.A. Cependant, contre toute attente, c'est au sein de deux firmes de moindre taille, la *Texas Instruments* et *Fairchild Semiconductor*, que l'invention qui devait révolutionner les champs de l'électronique et de l'informatique fut imaginée.

⁷⁶² Entre avril 1958, date de son démarrage, et février 1960, on estime à quelques 15,4 millions de dollars la somme dépensée par l'U.S. Army pour le seul programme *Micromodule*.

Signe incontestable du fait que l'idée, comme on dit, était alors dans l'air, la notion de circuit intégré a été indépendamment conçue par deux personnes, en deux lieux différents, et à six mois d'intervalle seulement. Chronologiquement – et non légalement - c'est toutefois à Jack St Clair Kilby qu'en revient la paternité. De fin 1947 jusqu'à début 1958 ce dernier occupa le poste d'ingénieur électronicien à la division *Centralab* de la *Globe-Union Inc.* A cette époque, *Centralab* collaborait avec les *Diamond Ordnance Fuze Laboratories* de l'Army au développement de circuits en céramique dont les composants étaient déposés sur leur support par photolithographie (technique du *silkscreening*). L'entreprise produisait également des circuits de ce type pour l'équipement des postes de radio et celui des récepteurs de télévision. C'est donc là que J. S. Kilby pu se familiariser vraiment avec ces techniques. En 1952 la *Globe-Union* acheta une licence *Bell* dans le but de pouvoir fabriquer des transistors. Cette nouvelle orientation technologique devait représenter une opportunité professionnelle immense pour Kilby qui se vit ainsi dépêché par son employeur au deuxième *Bell Transistor Technology Symposium* en qualité de représentant officiel (une autre personne dont l'identité ne nous est pas connue l'accompagnait). Dans les années qui suivirent, l'ingénieur mit en pratique le très précieux savoir théorique qu'il avait amassé durant cette conférence en réalisant entre autres choses des prothèses auditives à base de transistors en germanium d'une taille exceptionnellement réduite (elles possédaient en effet la particularité, rare à l'époque, de pouvoir tenir dans le creux de la main). Au mois de janvier 1956, J. S. Kilby fut à nouveau envoyé à Murray Hill par *Centralab* pour assister au troisième symposium que les *Bell Labs* avaient organisé à l'intention de leurs « clients » industriels. Comme le font remarquer M. Riordan et L. Hoddeson, Jack S. Kilby, à l'instar de nombreux autres spécialistes du domaine, était à ce moment précis convaincu que « *l'avenir du transistor résidait dans l'utilisation du silicium*⁷⁶³. ». Les diverses techniques dévoilées par les conférenciers *Bell* durant ce troisième symposium sur le transistor le confortèrent d'ailleurs largement dans son sentiment puisque c'est à cette occasion qu'il eut la possibilité de s'initier aux toutes dernières méthodes de dopage par diffusion, lesquelles, rappelons-le, permettaient de traiter tout aussi bien le silicium que le germanium. Toutefois, ce n'est pas parce que ces procédés avaient été conçus et qu'ils donnaient d'excellents résultats que tout le monde *voulait* ou *pouvait* les mettre en œuvre à l'échelon industriel. Dans le discours qu'il a prononcé le 18 avril 2001 à l'*Electrical*

⁷⁶³ In [Riordan et Hoddeson, 1997], 257.

and Computer Engineering Department de l'Université de l'Illinois⁷⁶⁴, J. S. Kilby n'a pas manqué de rappeler à son auditoire que la décennie des années cinquante avait représentée pour les fabricants de transistors une période extrêmement mouvementée. En quelques années à peine, plusieurs structures différentes de transistors, dont certaines devaient pour ainsi dire entrer en concurrence les unes avec les autres, avaient en effet été imaginées dans les laboratoires de recherche américains. De « faut-il oui ou non fabriquer le transistor ? », la question cruciale pour ces fabricants était en définitive devenue la suivante : quel *design* de transistor choisir parmi tous ceux existants en vue de la production en masse de ces composants ? Le co-inventeur du circuit intégré, en une sentence qui se passe de commentaires, a dépeint avec exactitude le sort commun attendant ceux qui avaient le malheur de se prononcer en faveur d'alternatives inappropriées : « *une mauvaise décision ou deux et vous étiez hors course*⁷⁶⁵ ». Compte tenu des risques économiques encourus mais aussi des investissements financiers très importants que cela réclamait, on comprend que les fabricants d'éléments électroniques en semi-conducteurs, une fois leur orientation technologique définie et leur ligne de production assemblée, se soient montrés quelque peu défiants à la perspective d'une nouvelle évolution technique dont ils ne savaient trop si elle serait appelée à durer ou non. Engagée dans la production de transistors en germanium depuis 1952-53, la *Centralab Division* de *Globe-Union* ne devait pas faire exception à cette règle. Ainsi quand bien même ses dirigeants auraient été disposés à « passer » au silicium - chose que malheureusement nous ne nous trouvons en mesure ni d'affirmer ni d'infirmer - il aurait fallu que la petite firme de Milwaukee débourse la somme d'un demi million de dollars pour rééquiper son outil de fabrication en conséquence. Or effectuer une dépense de cet ordre était quelque chose que l'employeur de J. S. Kilby ne pouvait raisonnablement pas se permettre de faire. D'un autre côté, l'ingénieur ne pouvait pas non plus continuer à travailler dans une structure qui ne disposait pas des moyens suffisants pour l'autoriser à développer et à tester ses idées. C'est la raison pour laquelle ce dernier, au début de l'année 1958, décida d'entrer en contact avec une dizaine d'entreprises – toutes évidemment susceptibles de le recruter - pour leur faire part de ses vues concernant le transistor et la miniaturisation des circuits électroniques. Après avoir passé quelques entretiens, il intégra *Texas Instruments* au début du mois de mai 1958. Rétrospectivement, le fait que J. S. Kilby ait choisi d'aller chez T.I. ne recèle rien qui puisse vraiment se voir qualifié de surprenant : après tout les chercheurs de

⁷⁶⁴ Jack S. Kilby, « Turning Potential into Realities: The Invention of the Integrated Circuit », discours prononcé le 18 avril 2001 à l'*Electrical and Computer Engineering Department at the University of Illinois*. On pourra consulter la transcription de cette allocution au : <http://www.ece.uiuc.edu/kilby/transcript.html>

⁷⁶⁵ *Ibidem*.

l'entreprise texane s'étaient brillamment illustrés quatre ans avant qu'il ne vienne grossir leurs rangs en concevant le premier transistor en silicium de l'histoire. Pour un individu solidement persuadé que l'avenir des composants électroniques passait inévitablement par l'usage de ce semi-conducteur, on concédera sans doute volontiers qu'il aurait été difficile de trouver maison plus innovante et plus dynamique. Jack S. Kilby, nous venons de le dire, commença à travailler chez *Texas Instruments* en mai 1958. Bien que sa fonction n'ait pas été exactement définie, il fut conclu dès le départ qu'il se consacrerait à la question de la microminiaturisation des circuits électroniques. C'est au sein du petit groupe de recherche dirigé par Willis A. Adcock., le responsable du département développement de la division semi-conducteurs/composants de T.I.⁷⁶⁶, qu'il débuta ses travaux. A cette époque le fabricant de Dallas cherchait à intégrer le *Micro-Module Plan* que l'*Army Signal Corps* avait démarré peu de temps après le spectaculaire lancement du premier *Sputnik*. Avatar de l'*approche monolithique*, cette conception modulaire de l'électronique dont l'ingénieur britannique G. W. A. Dummer avait énoncé les principes généraux en mai 1952, le programme *Micro-Module* visait à élaborer des ensembles électroniques fonctionnels en « empilant » puis en interconnectant de minuscules circuits individuels à composants discrets dotés d'une forme normalisée⁷⁶⁷. Comme de bien entendu, ces nouvelles unités électroniques étaient en priorité destinées à équiper les futurs missiles, satellites, radars, calculateurs de bord et ordinateurs de l'armée américaine. Les ingénieurs de *Texas Instruments* étaient précisément en train de préparer un certain nombre de propositions techniques pour les soumettre aux décideurs de l'*U.S. Army* lorsque Jack S. Kilby rejoignit cette compagnie.

En tant que spécialiste des transistors et de la microminiaturisation des circuits, le nouvel arrivant fut évidemment informé sur le champ de la nature des travaux réalisés dans le cadre du projet *Micro-Module*. Élément d'une importance absolument capitale ici, J. S. Kilby, une fois renseigné, ne parvint jamais à se défaire de son scepticisme quant à l'orientation générale que l'on avait choisi de donner dès l'origine au traitement du problème. Il lui semblait ainsi que la solution architecturale retenue, laquelle privilégiait une disposition et

⁷⁶⁶ Précisons que c'est Willis A. Adcock qui engagea J. S. Kilby. Avant de rejoindre T.I. et de commencer à y travailler sous la direction de Gordon Teal, ce docteur en chimie diplômé de la *Brown University* participa au projet Manhattan (au centre d'Oak Ridge, dans le Tennessee). Une fois la guerre terminée et ses études achevées, il occupa un poste de chercheur à la *Standard Oil of Indiana*. Il fut engagé par Gordon Teal, le directeur du *Central Research Laboratories* de T.I., en 1953.

⁷⁶⁷ Un peu comme on entasse des assiettes ou des cartes à jouer afin d'obtenir un ensemble compact. Pour ce faire ces circuits qui possédaient *grosso modo* le diamètre d'un stylographe étaient plats et circulaires. Les fils de connexion, eux, « couraient » verticalement le long de la pile et reliaient les circuits les uns aux autres en passant par de minuscules orifices pratiqués dans la hauteur de leur tranche. Les éléments électroniques – transistors, résistances, inducteurs et capacités – composant ces modules devaient être montés individuellement puis connectés les uns aux autres.

une connectivité *verticales* des éléments modulaires composant les circuits, n'était certainement pas la mieux adaptée⁷⁶⁸. Selon lui une approche moins compliquée, basée sur une organisation et des connexions *horizontales*, était en fait préférable. Voyons bien qu'en l'occurrence, l'ingénieur n'entendait nullement remettre en cause le principe essentiel sur lequel reposait le programme *Micro-Module*. L'idée d'une conception monolithique des circuits qui permettrait la fabrication d'unités électroniques compactes, solides, peu onéreuses et dotées d'un nombre limité de connexions était admise par lui comme une chose totalement nécessaire. Ce qui en revanche lui apparaissait critiquable était la façon particulière dont l'armée envisageait d'implémenter cette idée. Fort de ces diverses impressions, Jack S. Kilby construisit un amplificateur de fréquences intermédiaires - un appareil communément employé dans le domaine de la radiophonie - dans le courant du mois de mai 1958. La profonde originalité de sa démarche résidait en ceci qu'il conçut les modules fondamentaux de ce prototype en leur conférant une figure *tubulaire*, forme allongée qui impliquait que les jonctions connectant leurs constituants électroniques soient réalisées dans le plan horizontal. Notons que cette première tentative conduite pour ainsi dire en marge de la politique officielle de recherche de *Texas Instruments* fut couronnée de succès puisque l'amplificateur fonctionna convenablement. Quoiqu'il en soit, à ce moment, la priorité de la firme de Dallas demeurait toujours le projet *Micro-Module*.

Heureux hasard de l'histoire, la période de l'année à laquelle J. S. Kilby fut recruté précédait de peu un moment charnière chez *Texas Instruments*. Au mois de juillet en effet, il était de coutume que tous les personnels de cette entreprise prennent deux ou trois semaines de vacances. Durant une vingtaine de jours la compagnie texane était donc quasi déserte tandis que son activité économique se trouvait considérablement ralentie. Jack S. Kilby qui bien entendu n'avait aucun congé à prendre étant donné le caractère extrêmement récent de son engagement devait mettre à profit ce moment de « tranquillité institutionnelle » pour travailler à un second prototype d'amplificateur et achever aussi une étude prévisionnelle des coûts de production de ces systèmes. Il lui apparut toutefois assez vite qu'une entreprise comme *Texas Instruments*, laquelle, en plus d'être de taille relativement modeste, était spécialisée dans la production de semi-conducteurs, ne pourrait supporter ceux-ci en raison notamment des dépenses très élevées qu'occasionnait toujours la phase d'assemblage manuel

⁷⁶⁸ Encore sommes-nous largement en deçà de la vérité en disant cela. Pour qualifier les dispositifs *Micro-Module*, J. S. Kilby employait souvent le mot « *kludge* ». Dérivé de l'ancien écossais « *kludgie* », un vocable servant au départ à désigner les commodités extérieures, le terme « *kludge* » était quelquefois utilisé par les ingénieurs écossais, britanniques et américains pour signaler un dispositif dont les parties mal assorties formaient un tout désolant.

des composants électroniques⁷⁶⁹. De ce constat, J. S. Kilby tira alors les conséquences suivantes: avant que la compagnie ne reprenne son rythme de fonctionnement normal et qu'il ne se voit affecté au programme *Micro-Module* – choses inévitablement appelées à se produire dès la fin du mois de juillet 1958 - il lui fallait imaginer une alternative viable au projet de l'*Army Signal Corps* qui, en plus de satisfaire aux contraintes liées à l'orientation technologique spécifique de son employeur, tienne également compte de ses capacités financières et infrastructurelles limitées. Le 24 juillet 1958, « l'humble géant » coucha dans son carnet de laboratoire une idée totalement révolutionnaire. Bien que la démonstration de sa faisabilité technique ait nécessité l'usage d'une demi-douzaine de pages, l'expression de son essence, elle, tenait en deux lignes à peine : « *Extreme miniaturization of many electric circuits could be achieved by making resistors, capacitors, transistors and diodes on a single slice of silicon*⁷⁷⁰ ». On peut aisément voir qu'il n'était pas question ici pour J. S. Kilby de s'écarter de ce qui faisait « l'esprit » du programme *Micro-Module*, à savoir une conception monolithique de la réalisation des circuits électroniques. De fait, ce qui se trouvait ici spécialement visé demeurait encore et toujours la miniaturisation - l'*extrême* miniaturisation même - de circuits élémentaires standardisés pouvant servir à l'élaboration d'instruments électroniques (du calculateur de vol de missile à l'ordinateur en passant par le radar embarqué ou bien l'équipement de communication sous-marin). En conséquence, et tout comme celles qui l'avaient précédée, cette nouvelle tentative faite en direction d'une matérialisation de l'idée de G. W. A. Dummer avait pour desseins essentiels une notable amélioration du degré de compacité des circuits, une réduction drastique du nombre de leurs connexions inter-élémentaires ainsi qu'une diminution sensible de leur coût de fabrication. Jusque-là, serait-on tentés d'écrire, il n'y avait en apparence rien de véritablement neuf sous le soleil. Rien...*en apparence* seulement.

Rappelons qu'au moment où J. Kilby invente le circuit intégré, les Etats-Unis, en réaction à l'électrochoc causé une dizaine de mois auparavant par le premier *Sputnik*, sont en passe de créer la *National Aeronautics and Space Administration* et l'*Advanced Research Projects Agency*. Dans le même temps des centaines de millions de dollars sont débloqués par le gouvernement américain afin de permettre aux secteurs de la recherche, de l'enseignement, de l'armement lourd, de l'aéronautique, de l'astronautique, de la production industrielle et,

⁷⁶⁹ En 1958, les revenus de la *Texas Instruments Inc.* s'élèvent à quelques 92 millions de dollars. La firme emploie alors 7500 personnes.

⁷⁷⁰ Carnet de laboratoire de Jack St Clair Kilby, 24 juillet 1958, p. 8. Reproduit dans S. L. Merryman, « Application for an Historical Marker Commemorating the Demonstration of the First Working Integrated Circuit », manuscrit non publié, n° MS-233, 19 février 1988, *Texas Instruments*. Cité notamment in [Riordan et Hoddeson, 1997], p. 258.

bien entendu, de l'informatique, de relever l'invraisemblable défi lancé par l'Union Soviétique. Quant aux programmes *Molecular Electronics* et *Micro-Module*, l'*Air Force* et l'*Army* les ont démarrés depuis quelques mois déjà. L'électronique représentant une ressource technologique à la fois commune et indispensable à la quasi-totalité des domaines d'activité que nous venons de mentionner, il est évident que la réussite des américains dépend en très grande partie de leur capacité à mettre au point *promptement* une nouvelle génération de composants pourvus de qualités exceptionnelles (celles-là mêmes qu'énonça Dummer en 1952). Bref on aura compris à la lumière de ce petit rappel que si le temps peut effectivement apparaître comme un luxe rare aux yeux des hommes de l'administration Eisenhower, il n'en va pas du tout de même en ce qui concerne l'argent. Si tel ou tel projet, un ordinateur, un radar ou un missile par exemple, exige que l'on fasse acquisition d'un nombre considérable de transistors coûtant plusieurs centaines de dollars l'unité – historiquement le cas s'est bel et bien produit et reproduit – on n'hésitera pas l'ombre d'un instant. Affirmer qu'ici, plus qu'ailleurs, la fin justifie les moyens (quels qu'ils puissent être au demeurant) relève en réalité du plus doux des euphémismes. Alors que les soviétiques possèdent déjà plusieurs longueurs d'avance sur les américains, ces derniers n'ont d'autre choix que celui consistant à *tout* mettre en œuvre pour renverser une situation devenue extraordinairement délicate en l'espace de quelques mois à peine. Dont acte, bien évidemment. Ce qu'il est intéressant de remarquer ici concernant le contexte global dans lequel J. S. Kilby a inventé le circuit intégré est l'espèce de contraste existant entre quelques-unes des raisons qui l'ont conduit à cette formidable création et les sommes d'argent parfois faramineuses que le pouvoir américain, au même moment, a mis « à la disposition » des centres de recherche, des universités, des industriels, des agences gouvernementales civiles et militaires, etc. A une époque où les subsides officiels abondent – ceci étant tout particulièrement vrai dans les domaines connexes et fondamentaux de la miniaturisation des circuits électroniques et de l'informatique - la démarche inventive de J. S. Kilby se caractérise par la volonté, bien entendu, d'innover, mais aussi de faire en sorte que *Texas Instruments*, une firme qui ne dispose ni de la puissance financière de l'armée, ni non plus de celle des géants industriels américains, puisse effectivement exploiter cette innovation.

Au départ, on s'en souvient, J. S. Kilby souhaite proposer une alternative efficace au programme militaire *Micro-Module* (un « *kludge* » supplémentaire qui, d'après lui, ne fait en réalité que passer à côté du problème posé). Dans un premier temps, il conçoit un nouveau *packaging* pour les circuits électroniques modulaires - les briques élémentaires du système si l'on veut- en leur conférant une forme tubulaire et en réalisant leurs interconnexions dans le plan horizontal. La seconde étape du processus, pour le nouvel ingénieur de *Texas*

Instruments., consiste ensuite à réaliser un amplificateur de fréquences intermédiaires au moyen de ces unités... En juillet 1958, alors qu'un deuxième prototype de ce type voit le jour dans des locaux vidés de presque tous leurs occupants, J. S. Kilby achève un audit destiné à évaluer la capacité de sa société à fabriquer industriellement ces nouveaux modules électroniques. Le verdict des chiffres est clair et sans appel : malgré une réputation excellente, une conjoncture de marché franchement favorable et une politique commerciale plutôt payante, le fabricant de semi-conducteurs n'a pas les reins suffisamment solides pour supporter les coûts énormes qu'engendrerait une telle production. Dès lors, Jack S. Kilby se trouve placé face à un dilemme: soit accepter la présente situation et patienter jusqu'à la « rentrée » pour commencer à travailler sur *Micro-Module*, soit découvrir une solution à ce problème dans des délais déraisonnablement brefs. Ainsi qu'il l'a rapporté sur le site Internet de la société *Texas Instruments*, des deux voies qui s'offraient temporairement à lui, l'inventeur choisit la plus laborieuse et la plus incertaine (on mesure donc combien la perspective de devoir prendre part au projet de l'*Army Signal Corps* pouvait lui paraître enthousiasmante). C'est alors qu'un peu désespéré – il est évident qu'il ne part pas victorieux dans cette affaire – J. S. Kilby a cette intuition fulgurante :

« Dans mon humeur découragée, je commençais à sentir que la seule chose qu'un fabricant de semi-conducteurs pouvait produire de façon rentable était un semi-conducteur. Après avoir davantage creusé cette idée, j'en arrivais à la conclusion que les semi-conducteurs représentaient tout ce qui était réellement requis ici - que les résistances et les capacités, en particulier, pouvaient être fabriquées dans le même matériau que les dispositifs actifs⁷⁷¹. ».

Dans un dernier effort de réflexion guidé par une contrainte fondamentale – à savoir la volonté de concilier ses idées sur la façon de miniaturiser les circuits électroniques avec le profil technico-économique spécifique de *Texas Instruments* - Jack S. Kilby prend conscience du fait qu'étant avant tout un fabricant de semi-conducteurs, le seul type de production qui soit effectivement avantageux pour cette entreprise est celui des semi-conducteurs. Partant, il en arrive à une conclusion toute aussi inédite que décisive: *les semi-conducteurs sont en*

⁷⁷¹ « About Jack. So, What If He Had Gone on Vacation ? », document en ligne non daté consultable au :<http://www.ti.com/corp/docs/kilbyctr/vacation.shtml> (site internet officiel de la société *Texas Instruments*). Nous donnons ici traduction du passage suivant: « *In my discouraged mood, I began to feel that the only thing a semiconductor house could make in a cost-effective way was a semiconductor. Further thought led me to the conclusion that semiconductors were all that were really required — that resistors and capacitors, in particular, could be made from the same material as the active devices.* ».

réalité la seule chose dont il a véritablement besoin pour concevoir les fameux microcircuits. En d'autres termes, J. S. Kilby comprend à ce moment qu'il lui est très certainement possible de façonner *la totalité* des éléments actifs (transistors, diodes) et passifs (résistances, capacités) de ses modules électroniques dans un bloc de matériau *unique*, un même substrat si l'on préfère. Le pas conceptuel franchi ici par l'inventeur est immense et inhabituellement novateur. Il faut en effet se rendre compte qu'à la fin des années cinquante le germanium et le silicium, en plus de coûter fort cher, ne sont pas particulièrement réputés pour permettre la réalisation de composants passifs de bonne qualité. Proposer comme il le fait de tout concevoir à partir d'eux, c'est donc, tout au moins en apparence, faire fi des contraintes financières et du souci d'extrême qualité qui régissent en permanence l'économie de ce secteur industriel de pointe. Etant donné que *Texas Instruments* n'est pas une firme immensément riche, c'est aussi, pour J. S. Kilby, se trouver en (apparente) contradiction avec l'objectif qu'il poursuit. Mais le raisonnement de l'ingénieur ne s'interrompt pas là et il faut parvenir jusqu'à son terme pour en saisir la portée véritable.

A l'époque, les divers perfectionnements subis par les techniques de diffusion et de photolithographie rendent possible la confection simultanée de très nombreux transistors sur une même tranche, ou *wafer*, de semi-conducteur. Seul problème, si l'on ose dire, une fois ces multiples composants fabriqués sous forme de plaque, il s'avère nécessaire de les « débiter » afin de pouvoir ensuite les rendre individuellement opérationnels. Cette phase plutôt délicate de désolidarisation devance en fait l'opération toute aussi laborieuse (et coûteuse) au cours de laquelle des ouvrières spécialisées⁷⁷² procèdent *manuellement* au câblage de chacun des transistors venant d'être sectionnés. A la suite de cela, et en fonction de ce que l'on veut précisément réaliser, les transistors sont *regroupés* en unités fonctionnelles tandis que de nouvelles connexions permettant cette fois-ci de les raccorder entre eux, sont installées. Le recul historique et les progrès technologiques stupéfiants enregistrés depuis une quarantaine d'années rendent assurément la remarque facile mais force nous est néanmoins faite de constater que ce cycle de fabrication complexe bouclait en quelque sorte sur lui-même. Ainsi, un ensemble « homogène » de transistors créés dans la même galette de semi-conducteur étant donné, il fallait tout d'abord détacher chacun de ces composants pour mettre en place ses fils de connexion. Ce n'est qu'après cela que les transistors se voyaient une nouvelle fois rassemblés dans le but de constituer des modules qui, eux aussi, pouvaient être groupés afin

⁷⁷² Le personnel chargé de l'accomplissement de cette tâche était généralement féminin. Les femmes, en effet, possèdent souvent des doigts plus fins et plus habiles que ceux des hommes. Il arrive aussi qu'elles soient plus patientes que ces derniers. Or c'est là une vertu absolument essentielle quant on effectue ce genre de travail.

de former des ensembles électroniques encore plus importants (il pouvait s'agir d'un circuit logique d'ordinateur par exemple). Le caractère circulaire de cette méthode de production s'expliquait essentiellement par deux choses : 1°) pour des raisons techniques, on ne pouvait monter directement la connectique individuelle des transistors tant que ceux-ci faisaient partie intégrante du *wafer* ; 2°) les résistances et les capacités, composants passifs entrant dans l'élaboration des modules électroniques, n'étaient pas fabriquées *de la même manière et en même temps* que les transistors. Où l'on voit par conséquent que le fractionnement du *wafer* était commandé non seulement par la nécessité de mener à leur terme toutes les opérations liées à la finition des transistors mais aussi par le fait que ces derniers devaient en définitive être associés à des composants dont la nature et le fonctionnement différait des leurs.

Partant au contraire du principe que *tous* les composants des circuits peuvent être réalisés de concert sur le même *wafer*, J. S. Kilby pense qu'il doit également être possible de les interconnecter *in situ*, c'est-à-dire de les relier directement au sein de la *même* pièce de silicium (« *a single slice of silicon* » ainsi qu'il le note dans son carnet de laboratoire). Ceci, on le voit, revient par conséquent à *fabriquer l'intégralité du circuit électronique sur une seule et même galette de semi-conducteur*. Soit. Mais puisqu'en l'espèce on recourt à un matériau de base onéreux dont on sait par ailleurs qu'il ne permet d'obtenir que des performances relativement médiocres pour une catégorie donnée de composants, la question qu'il semble utile de se poser est la suivante: en définitive, qu'y a-t-il vraiment à gagner en procédant de la sorte ? La réponse s'impose d'elle-même. Fabriquer un circuit électronique complet – c'est-à-dire en l'occurrence fabriquer les composants *puis* la connectique qui constituent ce circuit – dans un bloc compact de matériau semi-conducteur (autrement dit un monocristal ultra pur), c'est réaliser en partie l'intégration monolithique dont rêvait G. W. F. Dummer. En partie seulement (si l'on ose dire), car demeurent encore en suspens deux problèmes fondamentaux: celui du coût de fabrication de ce dispositif et celui de sa fiabilité. En parfait connaisseur des techniques les plus élaborées de l'industrie des semi-conducteurs de son temps – n'avait-il pas représenté officiellement *Centralab* aux *Bell Transistor Technology Symposium* de 1952 et 1956 ? – Jack S. Kilby sait cependant comment les résoudre. Il entend tout d'abord recourir aux processus de fabrication (silicium dopé par diffusion, masquage, architecture *mesa*, etc.), désormais employés dans ce secteur pour produire *en série* des transistors à très hautes performances. Il projette aussi de faire appel aux techniques de photolithographie récemment développées par Jay W. Lathrop, James R. Nall et

Theodore C. Hellmers aux *Diamond Ordnance Fuze Laboratories* de l'U.S. Army⁷⁷³. Faisant appel à des instruments sophistiqués qui opèrent de façon répétitive, ces procédés issus du secteur de l'imprimerie offrent en effet l'exactitude et le niveau de résolution optique très élevé qu'exige la gravure des minuscules diagrammes intriqués formant les connexions du futur module électronique intégré. La combinaison adéquate de ces méthodes de fabrication fiables et éprouvées ouvrira alors sur la possibilité d'une production de masse (« *batch processing* ») ce qui de toute évidence permettra à terme: 1°) une réduction non négligeable des coûts de fabrication ; 2°) une optimisation de la qualité des éléments produits (ou, si l'on préfère, une minimisation de leur taux de rejet). A partir de ce moment, on le comprend, tous les éléments essentiels se trouvent rassemblés pour faire de l'idée monolithique une réalité technique. Ne reste plus pour Jack S. Kilby qu'à concevoir un prototype afin de démontrer la faisabilité de son invention et prouver du même coup sa supériorité sur les projets concurrents (à commencer bien entendu par le programme *Micro-Module*). Sur la suggestion de Willis Adcock, son supérieur hiérarchique direct qui, bien que séduit par l'idée, n'en demande pas moins à la voir physiquement réalisée, l'ingénieur confectionnera tout d'abord un circuit multivibrateur constitué de composants discrets en silicium qu'il reliera les uns aux autres de manière tout à fait ordinaire (c'est-à-dire en employant des fils métalliques et des points de soudures). Cette ébauche grossière – il ne s'agit pas *réellement* d'un circuit intégré mais on s'en approche à grands pas – qui avait en quelque sorte valeur de test préliminaire sera achevée à la fin du mois d'août 1958 et apportera à W. Adcock la preuve concrète dont il était demandeur. La phase subséquente consistera en la fabrication d'un circuit permettant d'afficher une courbe sinusoïdale sur l'écran d'un oscillateur. On ne manquera pas d'indiquer qu'à l'origine, ce circuit devait être réalisé en silicium. Toutefois, puisqu'il ne parvint pas à se procurer chez *Texas Instruments* les échantillons de silicium de qualité supérieure dont il avait besoin pour s'exécuter (un comble ne peut-on s'empêcher de penser !), J. S. Kilby fut en définitive contraint de se tourner vers l'emploi d'un monocristal de germanium. Ainsi, bien qu'entièrement conçu chez *Texas Instruments*, une entreprise de haute technologie où le transistor en silicium avait vu le jour à peine quatre ans auparavant, le premier circuit *intégré* de l'histoire fut réalisé avec du germanium. C'est *au sein* d'une minuscule pastille de ce

⁷⁷³ Ces méthodes photolithographiques inédites furent présentées pour la première fois au cours de l'assemblée annuelle que l'*Institute of Radio Engineers* tint à Washington D.C. au mois de novembre 1957. En septembre 1958, les *Diamond Ordnance Fuze Laboratories* organisèrent un symposium (« Microminiaturization of Electronic Assemblies »), au cours duquel elles furent encore largement exposées et diffusées. D'après l'U.S. *Army Materiel Command Historical Office*, entre début septembre 1957 et fin juin 1961, ce ne sont pas moins de 1060 personnes représentant quelques 261 organisations – parmi lesquelles des compagnies commerciales, des agences gouvernementales, des universités – qui eurent en définitive accès à ces informations techniques.

matériau semi-conducteur (celle-ci mesurait 1,016 mm x 1,575 mm et était collée sur une plaquette de verre), que purent être réalisés un transistor bipolaire, une jonction P-N faisant office de capacité et l'équivalent de trois résistances (le cristal de germanium opérant en fait comme tel). Cet oscillateur rudimentaire fonctionna pour la première fois le 12 septembre 1958 en présence notamment de Willis Adcock et de Mark Shepherd, le directeur du *Semiconductor Project Engineering Group*.

Une semaine après ce premier succès, J. Kilby réitéra son exploit en réalisant cette fois un bistable en germanium qui *incorporait* une paire de transistors. Par deux fois en l'espace de quelques jours, preuve venait donc d'être faite que des circuits électroniques monolithiques en semi-conducteurs – cette catégorie incluant bien évidemment les différentes sortes de circuits logiques constituant les éléments de base de l'ordinateur – aussi « microscopiques » que performants pouvaient être élaborés en recourant au même mode de fabrication révolutionnaire. Le dimanche 12 octobre 1958, soit exactement un mois après que Jack S. Kilby ait montré son invention à ses supérieurs, les ingénieurs de T.I. présentèrent différents prototypes de circuits intégrés à Thomas J. Watson Jr., le tout-puissant président de l'*International Business Machines Corporation*⁷⁷⁴. Précisons qu'à ce moment, le géant de l'informatique venait d'annoncer la mise en chantier de ses premiers ordinateurs commerciaux entièrement transistorisés, les systèmes 7070 et 7090 (ce dernier étant dérivé du modèle 709TX, une machine à transistors conçue à la demande expresse de l'*Air Force* pour équiper le *Ballistic Missile Early Warning System*). Quant on connaît le succès impressionnant que remportèrent à partir de 1965 les différentes machines de la famille *System/360*, premiers ordinateurs d'I.B.M. *compatibles équipés de circuits intégrés*, quant on sait aussi les délais relativement importants qui pouvaient s'écouler entre le démarrage d'un projet d'ordinateur et les livraisons des premiers exemplaires aux clients, on ne peut s'empêcher de songer à l'influence décisive qu'eut très certainement cette démonstration sur Thomas J. Watson Jr... Jack S. Kilby consacra l'automne 1958 et une bonne partie de l'hiver 1958-59 à travailler à l'amélioration de son approche. Selon Michael Riordan et Lillian Hoddeson : « ...ses efforts portèrent tout particulièrement sur le procédé photolithographique.

⁷⁷⁴ Et ce très certainement en vertu d'un accord de partenariat industriel conclu au mois de décembre 1957 entre I.B.M. et *Texas Instruments*. Ainsi que le signale Emerson W. Pugh cette alliance, en plus de hisser T.I. au rang de principal fournisseur de composants en semi-conducteurs d'I.B.M., prévoyait également « l'échange de brevets, certains arrangements pour les gros achats, le partage d'informations techniques et le développement groupé de diodes et de transistors », (in [Pugh, 1995], p.280). Notons aussi qu'au grand dam de Ralph L. Palmer, ce sont les ingénieurs d'I.B.M. qui concurent pour *Texas Instruments* la toute première ligne de production de transistors entièrement automatisée. Installée dans les locaux de la compagnie texane dans le courant de l'année 1959, le complexe appareillage ne tarda pas à être dupliqué. Ses copies furent utilisées pour approvisionner en transistors les autres clients de T.I. (dont certains étaient concurrents d'I.B.M.)...

*Il chercha ainsi à adapter ce dernier de manière à permettre la délimitation de secteurs précis constituant autant de composants individuels de circuiterie à la surface du semi-conducteur*⁷⁷⁵. ».

Le travail de recherche se poursuivit de la sorte jusqu'en janvier 1959, mois où une rumeur faisant état de l'imminence d'une demande de brevet pour un circuit intégré émanant de la *Radio Corporation of America* parvint aux oreilles des hommes de l'entreprise de Dallas. La rumeur. Chacun sait fort bien qu'il n'est qu'à la lancer: si d'aventure elle ne fait pas mouche immédiatement, il en restera toujours quelque chose recelant parfois une once de vérité. Même si sur le moment cela paraissait constituer une mesure parfaitement adaptée à la complexité ainsi qu'à l'urgence (supposée) de la situation, l'empressement bien compréhensible que mirent les avocats de *Texas Instruments* à rédiger une demande de brevet au nom de Jack S. Kilby allait au final coûter extrêmement cher et à l'inventeur, et à son employeur. Composée à la hâte, donc péchant par nombre d'aspects parmi lesquels une trop grande généralité, cette demande portant l'intitulé « *Miniaturized Electronic Circuits* » – circuits électroniques miniaturisés - fut déposée au *Patent Office* de Washington le 6 février 1959, soit une dizaine de jours seulement après que « l'alerte R.C.A. », si l'on veut bien nous passer ici l'emploi de cette expression, ait été donnée. En des temps plus normaux, et bien qu'ils puissent être sujets à variation en fonction de ce que le brevet est appelé à protéger, la réalisation de ce type de procédures nécessite des intervalles de temps beaucoup plus importants. C'est là en vérité simple affaire de prudence... Le 24 mars 1959, profitant de ce que l'*Institute of Radio Engineers* tenait congrès annuel à l'Hôtel Waldorf-Astoria de New York, l'équipe dirigeante de *Texas Instruments* annonça officiellement la naissance du circuit intégré lors d'une conférence de presse. A cette occasion, Mark Shepherd déclara qu'il considérait le « circuit solide », ainsi que l'on désignait alors l'invention de J. S. Kilby chez T.I., comme « *le développement le plus significatif de Texas Instruments depuis ...l'annonce de la disponibilité commerciale du transistor en silicium*⁷⁷⁶. ». A l'appui de ces propos qui établissent avec clarté le fait que les dirigeants de *Texas Instruments* avait parfaitement saisi l'importance du circuit intégré quelques mois seulement après que J. S. Kilby ait réalisé ses premiers prototypes, on fit la démonstration (réussie) de deux dispositifs électroniques conçus selon le nouveau principe de fabrication: un multivibrateur intégré comportant deux capacités, huit résistances et deux transistors dopés par diffusion et un circuit oscillateur constitué de

⁷⁷⁵ In [Riordan et Hoddeson, 1997], p. 260.

⁷⁷⁶ Kilby, J. S., « Invention of the Integrated Circuit », *I.E.E.E. Transactions on Electron Devices* ED-23, n° 7, juillet 1976, pp.648-654. Passage également cité in [Riordan et Hoddeson, 1997], p. 261.

trois capacités, de cinq résistances et d'un transistor. Dans le courant du mois d'octobre 1961, *Texas Instruments* annonça la mise sur le marché imminente de sa première famille de « circuits solides ». La *Series 51* – telle était la désignation commerciale de cette gamme – comprenait cinq types de circuits intégrés : des flip-flops (circuits de type SN 502), des compteurs, ainsi que trois sortes de portes logiques (NAND, NOR et Exclusive OR)... Le 19 de ce même mois, un avis officiel émanant de l'U.S. *Air Force Aeronautical Systems Division* (Dayton, Ohio) et de *Texas Instruments Inc.* notifiait qu'un ordinateur digital « microminiature » utilisant des « réseaux de semi-conducteurs » avait été testé avec succès dans le cadre du programme militaire *Molecular Electronics*. Conçu par le *Technology Laboratory* de l'*Aeronautical Systems Division* mais fabriqué sous supervision de l'armée par T.I., cet ordinateur expérimental occupait un volume de 16 centimètres cube (6,3³ pouces) et possédait une masse de 0.28 kilogramme (10 onces). Pour ne laisser planer aucun doute quant au caractère et aux performances hors du commun de cette machine de dimensions plutôt inaccoutumées, les chercheurs de l'armée de l'air et ceux de *Texas Instruments* n'hésitèrent pas à construire un deuxième système – de type plus commun car à transistors individuels – afin de pouvoir pleinement faire jouer entre eux comparaison et effet de contraste. De fait, si le prototype de T.I. était 150 fois moins volumineux et 48 fois plus léger que l'autre ordinateur, ses 587 circuits intégrés lui permettaient de réaliser exactement les mêmes fonctions logiques et mathématiques que celles supportées par les 8500 composants conventionnels de son faire-valoir technologique. Ce premier prototype d'ordinateur à circuits solides permit de faire définitivement la preuve que par bien des aspects, l'invention de J. S. Kilby représentait la solution idéale à quelques-unes des grosses difficultés techniques que rencontraient alors techniciens, ingénieurs et chercheurs dans les secteurs de l'armement, de l'aéronautique, de l'astronautique et de la recherche scientifique en général. Ainsi, avec le circuit intégré, disposait-on: 1°) d'un moyen propre à limiter efficacement l'explosion du nombre d'interconnexions liant entre eux les composants élémentaires des dispositifs électroniques (la fameuse « *tyranny of numbers* », qui plus que tout autre instrument, concernait bien sûr les ordinateurs); 2°) d'une approche industriellement réalisable et commercialement viable⁷⁷⁷ permettant d'atteindre un niveau exceptionnel d'intégration de composants passifs et actifs, ceux-ci se trouvant confectionnés en très grand nombre au sein

⁷⁷⁷ Ce qui ne signifie pas, loin s'en faut, que le prix de vente des premiers circuits intégrés ait été abordable. Le circuit flip-flop SN502 que *Texas Instruments* introduisit au mois de mars 1960 coûtait par exemple 450 dollars pièce. A cause de cela, l'usage des circuits intégrés fut dans un premier temps exclusivement réservé aux organismes qui pouvaient financièrement se permettre de les acquérir, c'est-à-dire, pour ne citer que ceux-là, la N.A.S.A., l'*Air Force*, l'*Army*, etc. De façon régulière, ces prix baisseront pour finalement atteindre des niveaux nettement plus raisonnables en 1965-66.

d'une minuscule tranche de matériau semi-conducteur; 3°) d'une solution technique limitant les problèmes de dissipation thermique, d'interférences électroniques et de maintenance caractéristiques des équipements électroniques.

Seul point d'achoppement venant quelque peu assombrir ce tableau à l'élégance presque parfaite, les jonctions liant entre eux les composants des circuits miniaturisés produits par T.I. étaient encore réalisées en utilisant des attaches métalliques. Des attaches qui, indiquons-le, devaient toujours faire l'objet d'un assemblage *manuel*⁷⁷⁸ après que le processus de fabrication du « cœur » du dispositif intégré ait été mené à son terme (il s'agissait donc là d'une opération à la fois délicate et onéreuse qui impliquait l'exécution d'une phase de post-production assez lourde). Même si l'on avait dorénavant affaire à des éléments passifs et actifs façonnés au sein d'un même bloc de matériau semi-conducteur – c'était précisément en ceci que résidait le tour de force intellectuel et technologique accompli par J. S. Kilby - fondamentalement, la manière dont on procédait *ensuite* à leur interconnexion ne différait guère de celle ordinairement mise en œuvre quant on reliait des composants discrets sur des cartes imprimées. De ce fait, et même si le circuit solide inventé par Jack S. Kilby représentait indéniablement un progrès colossal au regard de tout ce qui avait pu être tenté ou effectivement réalisé jusque-là, il lui manquait encore quelque chose pour pouvoir en quelque sorte revendiquer le statut « d'avatar modèle » de l'idée monolithique...

Comme on ne peut manquer de l'imaginer, à l'orée des années soixante, l'avenir commercial de *Texas Instruments Inc.* s'annonçait radieux. Après avoir véritablement créé la surprise en 1954 grâce à son transistor en silicium, l'entreprise texane alors présidée par le new-yorkais John Erik Jonsson se préparait à confirmer sa réputation de firme plus que jamais engagée à la pointe de l'innovation technologique. Avec le circuit intégré – une technologie propriétaire alors que le transistor, fondamentalement, demeurait propriété des *Bell Telephone Laboratories* et était produit par nombre de firmes – *Texas Instruments* se trouvait désormais en mesure de pouvoir capter une part non négligeable des budgets colossaux que les autorités américaines, suite à l'épisode *Sputnik*, avaient décidé d'allouer aux agences gouvernementales, aux centres de recherche des armées et aux grands groupes industriels travaillant sur l'implémentation de l'idée monolithique. Ainsi que nous l'a vu plus haut, le circuit solide, à peine inventé, réussit brillamment son entrée sur le devant de la scène de l'industrie des semi-conducteurs. On se souvient également qu'au tout début du mois de février 1959, une demande de brevet destinée à protéger le précieux dispositif fut

⁷⁷⁸ Ces éléments de connectique fort classiques, est-il nécessaire de préciser, étaient surdimensionnés par rapports aux minuscules composants dont ils permettaient la liaison.

officiellement déposée par les avocats de *Texas Instruments* à l'U.S. *Patent Office* de Washington D.C. A ce moment donc, tout paraissait aller au mieux pour le fabricant de Dallas. Fort malencontreusement, en accordant foi un peu trop vite à la rumeur qui prêtait à la *Radio Corporation of America* l'intention de faire de même pour un objet de conception similaire, les dirigeants et les représentants légaux de T.I. confondirent vitesse et précipitation. Aurait-elle été plus mesurée, plus circonspecte – tenter peu ou prou d'évaluer la part de véracité de cette rumeur sans perdre trop de temps au passage n'était sûrement pas chose impossible – leur réactivité se serait certainement révélée payante. Cependant il n'en fut rien : composée sous l'écrasante pression du moment – il faut bien comprendre que R.C.A. était un groupe puissant et influent qu'il valait mieux prendre de court au plus vite si la nécessité s'en faisait sentir – ladite demande de brevet était de caractère général et comportait des failles susceptibles d'être exploitées devant un tribunal. Ce fut là une première erreur. Les hommes de *Texas Instruments*, en revanche, ne se méprirent pas quant à la réalité de la menace. Celle-ci existait bel et bien. Leur second fourvoiement consista toutefois à croire mordicus que l'attaque, si l'on ose dire, viendrait du Goliath industriel. Il n'en fut rien. C'est une jeune firme installée depuis 1957 dans la Nord de la Californie, à dire vrai il s'agissait en fait d'une des plus petites oeuvrant alors dans le secteur de l'industrie des semi-conducteurs, qui, finalement, porta le « coup ».

2.3.2.2. Robert N. Noyce et *Fairchild Semiconductors* : procédé planaire, transistor et circuit intégré planaires.

Né le 12 décembre 1927 dans l'état de l'Iowa, diplômé du M.I.T. en 1953, le docteur Robert Norton Noyce est connu pour être le co-inventeur du circuit intégré et le co-fondateur, avec Gordon Moore, son ancien compagnon du *Shockley Semiconductors Laboratory* et de *Fairchild Semiconductors*, de la désormais célèbre firme internationale *Integrated Electronics*, c'est-à-dire *Intel*. Employé jusqu'en 1956 par la *Philco Corporation*, une entreprise spécialisée dans la fabrication de postes radiophoniques, de biens ménagers électroniques, de transistors, mais aussi d'ordinateurs, R. N. Noyce choisit de rejoindre en avril de cette même année la petite firme que William B. Shockley, un des trois pères du transistor, avait récemment établie dans cette partie de la Californie qu'on ne tarderait pas à connaître bientôt sous le nom de *Silicon Valley*. Rapidement, des frictions apparurent au sein du *Shockley Semiconductors Laboratory*. La situation entre le nouveau prix Nobel de physique - individu certes brillant mais doté d'un caractère impossible - et ses « jeunes loups » ne cessa d'empirer

à tel point qu'en 1957, R. N. Noyce et sept autres employés prirent volontairement la porte et s'en allèrent fonder dans la foulée la division semi-conducteurs de la *Fairchild Camera and Instruments*, une compagnie new-yorkaise qui avait fait de la fabrication des matériels militaires de haute technologie sa spécialité. Parmi ces « *Traitorous Eight* » que nous avons déjà eu l'occasion de mentionner plus haut figuraient bien entendu Robert N. Noyce et Gordon Moore, mais aussi Jean Hoerni, un physicien américain d'origine suisse dont les idées devaient avoir une influence absolument considérable sur le devenir du transistor et du circuit intégré (et donc, par extension, sur celui de l'ordinateur).

A la toute fin des années cinquante, les transistors *mesa* en silicium dopé par diffusion commencèrent à s'imposer comme une référence dans l'industrie des semi-conducteurs⁷⁷⁹. Obtenus grâce à des méthodes de fabrication faisant largement appel au principe du masquage optique, donc productibles en très grande quantité – par *batch processing* selon l'expression consacrée –, ces composants, compte tenu de leurs performances plus qu'excellentes, étaient *relativement* peu coûteux. Ceci, évidemment, ne veut pas dire qu'ils aient été exempts de tout défaut. L'élaboration d'un transistor *mesa*, composant dont on rappellera au passage que sur le plan architectural il ressemblait beaucoup à ces plateaux érodés qui servirent longtemps de toile de fond à de très nombreux westerns, exigeait l'accomplissement de plusieurs opérations successives parmi lesquelles une phase de dopage par diffusion, une phase de masquage et d'exposition à la lumière ultraviolette – ceci permettant de discriminer optiquement des zones de façon très ciblée – puis, enfin, une séquence de gravure par immersion dans une solution chimique acide se présentant sous forme gazeuse. Au cours de cette étape décisive, seules les surfaces préalablement soumises à l'influence du rayonnement ultraviolet se voyaient attaquées par l'agent corrosif. Les régions protégées par le masque photorésistant demeuraient quant à elles parfaitement intactes. Les deux principaux défauts des transistors *mesa* étaient essentiellement liés à la forme si particulière dont ils tiraient leur dénomination. En effet leur structure « empilée », pour ne pas dire « protubérante », faisait d'eux des composants singulièrement fragiles sur les plans chimique et mécanique (ce malgré la présence d'une enveloppe de protection). De fait, puisque ce genre de transistors comprenait plusieurs parties *proéminentes*, le matériau semi-conducteur dopé dont celles-ci étaient constituées se trouvait exposé à un risque important de contamination par des corps chimiques étrangers. Si cela se produisait effectivement, si les jonctions en venaient à être corrompues de la sorte, ne pouvait alors s'ensuivre qu'une notable diminution du rendement du dispositif. En outre les fils de

⁷⁷⁹ C'est d'ailleurs à ce type d'éléments actifs que J. S. Kilby recourut pour concevoir ses circuits intégrés. Notons que les transistors *mesa* avaient été mis au point aux *Bell Labs*.

connexion de ces transistors avaient fâcheusement tendance à « glisser ». Ainsi que l'a rapporté un observateur de l'époque, il suffisait parfois de heurter très légèrement sa coque protectrice pour mettre un transistor *mesa* en état de court-circuit. Où l'on constate par conséquent que si ces composants en silicium représentaient à l'orée des années 1960 le *nec plus ultra* en matière de performances et de « facilité » de production, leur fiabilité, elle, se trouvait en revanche loin de pouvoir prétendre à pareil statut.

C'est le docteur Jean Hoerni, physicien réputé pour son talent et son extrême modestie, qui découvrit une astucieuse solution à ce problème à la fin de l'année 1958. Survenue, paraît-il, tandis qu'il prenait une douche, l'idée qui devait révolutionner la façon dont on concevait transistors et circuits intégrés reçut l'appellation de « *planar process* ». Fondamentalement, la technologie planaire repose sur une découverte que C. J. Frosch et L. Derick firent accidentellement au début de l'année 1955. Après que de la vapeur d'eau se fut accidentellement introduite dans une chambre de diffusion – l'appareil dont on se servait alors pour doper les semi-conducteurs – les chimistes des *Bell Telephone Laboratories* constatèrent qu'une pellicule d'oxyde de l'ordre de quelques milliers d'angströms d'épaisseur s'était formée à la surface de la tranche de silicium qu'ils étaient en train de traiter. Les deux hommes ne mirent guère de temps à comprendre que le dioxyde de silicium (SiO_2), loin de représenter un sous-produit indésirable, possédait en réalité quelques vertus physiques fort intéressantes et qu'il pouvait de ce fait être utilisé de manière extrêmement profitable dans le processus de fabrication des transistors⁷⁸⁰. Ainsi C. J. Frosch et L. Derick démontrèrent qu'une couche de SiO_2 générée à la surface d'un *wafers* de silicium en tout début de production interdisait la propagation des atomes dopants devant normalement survenir lors de la phase de diffusion. Ils prouvèrent également que le fait de pratiquer ponctuellement des ouvertures, ou « fenêtres », au sein de cette fine formation de dioxyde permettait non seulement de revenir à une situation normale – sur le plan local s'entend - mais qu'il autorisait aussi un bornage précis des régions du monocristal de silicium devant subir la diffusion. Quelques temps après cela J. Andrus et W. L. Bond, deux chercheurs travaillant aux *Bell Labs*, établirent que l'application de certaines substances photorésistantes en des zones déterminées de la couche de dioxyde empêchait que celle-ci ne disparaisse à ces endroits lorsqu'elle était soumise à un bombardement lumineux intensif⁷⁸¹. Il n'était plus qu'à combiner ces deux

⁷⁸⁰ Dans les derniers mois de l'année 1956, C. J. Frosch et L. Derick firent circuler aux *Bell Labs* un compte rendu scientifique intitulé « Surface Protection and Selective Masking during Diffusion in Silicon ». Dans ce travail ils procédaient à l'analyse de leur découverte et étudiaient ses possibles applications industrielles.

⁷⁸¹ J. Andrus et W. L. Bond, « Photoengraving in Transistor Fabrication », in *Transistor Technology*, Vol. III, Princeton, New Jersey, pp. 151-162, 1958.

découvertes l'une avec l'autre pour se trouver en mesure de contrôler, via un ensemble de techniques photolithographiques sophistiquées, la distribution spatiale et la géométrie des fenêtres de diffusion dans l'oxyde⁷⁸². Nous ne manquerons pas ici de préciser que dans le cadre de cet usage particulier, on procédait systématiquement à l'*élimination* de la pellicule de dioxyde de silicium une fois ces opérations photolithographiques achevées. Il était en effet couramment admis dans la « communauté des semi-conducteurs » que le SiO₂ était une substance impure qui risquait de corrompre le silicium des transistors dans le cas d'un contact prolongé. Pour éviter que cela ne se produise, on veillait donc soigneusement à ne pas le laisser en place plus longtemps qu'il n'était jugé nécessaire. Parfaitement au fait de cette pratique, mais aussi du contenu du mémorandum que C. J. Frosch et L. Derick⁷⁸³ avaient rédigé deux ans auparavant, J. Hoerni eut alors une idée prenant le complet contre-pied de cette pratique. Plutôt que de procéder comme cela se faisait habituellement, c'est-à-dire de détruire le fin manteau de dioxyde de silicium qui avait momentanément servi à l'élaboration des transistors, le physicien proposa de *conserver* celui-ci ! Jean Hoerni venait en effet de découvrir qu'à l'inverse de ce que l'on croyait, le SiO₂ était un corps chimiquement inoffensif pouvant être efficacement mis à profit afin de préserver le silicium et les jonctions des transistors de toute contamination extérieure. En plus de permettre la passivation de la surface de ces composants, le chercheur de *Fairchild Semiconductors* se rendit également compte qu'une gangue de dioxyde de silicium constituait à coup sûr la meilleure des protections contre les mauvais traitements (vibrations, chocs) que ces derniers seraient très sûrement amenés à subir au cours de leur vie. L'autre idée décisive qu'eut à peu près au même moment J. Hoerni était celle qui consistait à *diffuser* le transistor *dans la masse* du monocristal de silicium. En d'autres termes, et pour le dire à la manière de Stan Augarten dans *An Illustrated History of Computers*, le scientifique « ... *enchâssa chimiquement les différents éléments du*

⁷⁸² Notons qu'à partir de ce moment, la place occupée par le germanium dans la production des composants électroniques miniaturisés commença à s'amenuiser de plus en plus. En raison notamment des énormes difficultés rencontrées pour stabiliser une couche de dioxyde à la surface de ce semi-conducteur, les techniques que nous venons d'évoquer ne pouvaient en effet lui être appliquées. Or, comme on le sait, celles-ci devaient avoir un rôle absolument décisif dans le processus de fabrication des transistors et des circuits intégrés planaires. Une fois le silicium devenu matériau dominant au sein de cette industrie, on continua tout de même à employer le germanium pour concevoir des dispositifs spéciaux dont le fonctionnement reposait sur l'exploitation de certaines de ses caractéristiques physiques.

⁷⁸³ Voir [Riordan et Hoddeson, 1997], p. 263 et la note n°263 présentée à la page 331 du même ouvrage. Comme l'ont montré ces deux auteurs, quatre (au moins) des huit futurs fondateurs de la *Fairchild Semiconductors* – il s'agissait de J. Hoerni, de R. Noyce, de G. Moore et de J. Last – prirent connaissance du contenu du mémorandum de Frosch et Derick lorsqu'ils travaillaient encore aux *Bell Telephone Laboratories*.

*transistor dans un morceau de silicium. Le résultat de ceci fut un transistor complètement plat, dépourvu de partie saillante*⁷⁸⁴. ».

C'est cet ensemble de méthodes – au demeurant presque toutes issues de recherches ou de découvertes effectuées antérieurement aux *Bell Labs* - qui constituait la technologie planaire. Celle-ci, pour simplifier, exigeait l'exécution d'au moins trois opérations capitales. Dans ce qui suit, nous nous contenterons seulement d'indiquer leurs grandes lignes, cela étant amplement suffisant pour notre propos : 1°) pour commencer une pellicule de SiO₂ couvrant uniformément et totalement la surface d'un monocristal de silicium purifié et poli était créée par vaporisation ; 2°) après que des morceaux de cette couche de dioxyde aient été sélectivement éliminés en certains points très précis de la surface de la pièce de silicium, les différentes parties du transistor – à savoir le collecteur, la base et l'émetteur - étaient tour à tour diffusées *dans la masse* de celle-ci; 3°) Enfin de l'aluminium était déposé aux emplacements appropriés afin de former les points de contact nécessaires aux fils de connexion du transistor (le fait que celui-ci ait été de type planaire n'éliminait pas - en tout cas pas encore – l'obligation de recourir à des fils métalliques « extérieurs » pour l'alimenter en énergie). En procédant de la sorte, il devenait possible de fabriquer industriellement un composant actif en silicium diffusé qui, affranchi de leurs deux défauts majeurs – c'est-à-dire une grande sensibilité à la contamination chimique et une importante fragilité mécanique – affichait néanmoins le même niveau de performances que les transistors de type *mesa*. Autre différence notable avec les éléments participant de cette classe de composants, les transistors et, plus largement, les dispositifs électroniques conçus selon la méthode de Jean Hoerni possédaient la très intéressante particularité d'être (quasiment) *plats*⁷⁸⁵. Dans « Planar Silicon Transistors and Diodes⁷⁸⁶ », un article technique capital qu'il présenta au mois d'octobre 1960 lors de la réunion annuelle du *Professional Group on Electron Devices* (Washington D.C.), Jean Hoerni devait récapituler comme suit les différents avantages de la technologie planaire :

« Le processus planaire autorise la passivation de la surface [du cristal de silicium par déposition] d'une couche d'oxyde à un stade précoce de la fabrication du dispositif. En fait, la couche d'oxyde de silicium est appliquée à la surface du cristal avant que la jonction

⁷⁸⁴ In [Augarten, 1984], p. 242.

⁷⁸⁵ Le processus *planaire*, tout comme les objets conçus grâce à lui, tire bien évidemment son nom de la possession de cette propriété topographique. En effet, est qualifiée de plane une surface dont tous les points se situent au même niveau.

⁷⁸⁶ Jean Hoerni, « Planar Silicon Transistors and Diodes », *Fairchild Semiconductor Corporation Technical Articles and Papers*, TP-14, 1961. Article également publié dans *Institute of Radio Engineers, Trans. Electronic Devices*, 8 Mars 1961, p. 178.

ne soit créée par diffusion... La passivation obtenue grâce à l'oxyde de silicium permet d'améliorer considérablement la fiabilité [électrique] du dispositif. Un autre avantage des structures planaires est qu'elles représentent le premier pas naturel vers toute approche intégrée où plusieurs éléments, transistors ou diodes, sont simultanément élaborés sur le même morceau de semi-conducteur. De façon évidente, il est nettement plus pratique d'avoir affaire à un système intégré possédant une surface plane qu'à un assortiment de mesas et de vallées⁷⁸⁷...».

Et le physicien de conclure en formulant cette dernière remarque :

« En résumé, l'approche planaire autorise une amélioration et une stabilisation considérables des paramètres les plus susceptibles de pâtir des phénomènes de contamination de surface. Nous croyons également qu'elle pourra se révéler très utile dans le domaine de la conception des circuits intégrés en semi-conducteur ainsi que dans celui des techniques d'encapsulation à bas coût⁷⁸⁸ ».

Comme on peut le conclure aisément d'après les informations spécifiées un peu plus haut, la composition de cet article est antérieure au mois d'octobre 1960 (tout au plus date-t-elle du début de cette période). Aussi ne soyons pas étonnés de voir ici l'auteur mentionner par deux fois la possibilité d'appliquer le procédé planaire à la fabrication des circuits intégrés. Au moment où Jean Hoerni rédigeait son texte, les travaux de Jack S. Kilby étaient déjà relativement bien connus de ses confrères de l'industrie des semi-conducteurs (c'était le cas au moins depuis février/mars 1959). En outre, dès les premières semaines du mois de janvier 1959, Robert N. Noyce avait lui aussi commencé à s'intéresser très sérieusement à la possibilité de fabriquer un circuit intégré⁷⁸⁹. Dans *Crystal Fire*, M. Riordan et L. Hoddeson ont produit un extrait du carnet de laboratoire du directeur de la recherche de *Fairchild*

⁷⁸⁷ In J. Hoerni, « Planar Silicon Transistors and Diodes », p. 2. Le texte original, que nous avons traduit, est le suivant: « *The planar process permits the passivation of the surface by an oxide layer at an early stage of manufacture of the device. In fact, the silicon oxide coating is applied to the surface before the junction is driven in by diffusion... The silicon oxide passivation also brings about a greatly improved reliability of the device. Another advantage of planar structures is that they are the natural first step in any integrated approach where several elements, transistors or diodes, are built simultaneously on the same piece of semiconductor. It is obviously more convenient to deal with an integrated system having a planar surface than a collection of mesas and valleys.* ».

⁷⁸⁸ *Ibidem*, p. 6. Ici encore, nous avons transposé le texte de J. Hoerni en français : « *In summary, the planar design offers considerable improvement and stabilization of the parameters most likely to suffer from surface contamination. We believe that it will also prove attractive in the design of integrated semiconductor circuits and in low cost encapsulation techniques* ».

⁷⁸⁹ A ce moment, il ne connaissait rien des travaux déjà accomplis en ce sens par J. S. Kilby.

Semiconductor qui ne laisse planer aucun doute quant au moment exact où celui-ci en vint à son tour à s'enflammer pour la fameuse idée monolithique :

« *Dans de nombreuses applications, écrivait Noyce, il serait souhaitable de réaliser de multiples dispositifs sur un unique morceau de silicium de manière à ce que la création de leurs interconnexions fasse partie intégrante du processus de production, ainsi pourrait-on réduire leur taille, leur masse, etc. tout de même que le coût de fabrication par élément actif*⁷⁹⁰. ».

En dehors du fait qu'il établit clairement que R. N. Noyce travaillait bel et bien sur la notion de circuit intégré *avant* que *Texas Instruments* ne dépose un brevet pour protéger *son* interprétation de l'idée de Dummer, ce passage daté du 23 janvier 1959 est riche d'enseignements quant à l'approche spécifique que suivit son auteur.

Jack S. Kilby, revenons brièvement sur ce point, en était venu à concevoir le premier circuit intégré de l'histoire car il estimait que le projet militaire *Micro-Module*, alors objet de toutes les attentions de la part de son nouvel employeur, péchait en bien des points sur le plan technique. Constamment guidé dans son cheminement réflexif par la volonté de ne point déroger à un double précepte fondamental - à savoir parvenir à un « haut » niveau d'intégration⁷⁹¹ des composants électroniques et maintenir en même temps un coût de production qui soit en adéquation avec les capacités financières de *Texas Instruments* - l'humble géant imagina et réalisa ce que l'on ne tarda pas à nommer le « circuit solide ». Toutefois si J. S. Kilby atteignit brillamment, et en un temps record, l'objectif qu'il s'était fixé, sa formidable invention souffrait encore d'une imperfection de taille. En effet les liaisons permettant de connecter les uns aux autres les différents constituants électroniques qu'il avait réussi à façonner au sein du même morceau de semi-conducteur étaient encore assurées par des fils métalliques dont les dimensions excédaient quelquefois celles des constituants qu'ils servaient à raccorder. De plus, la mise en place de ces connecteurs filaires se devait d'être réalisée manuellement, ce qui représentait à l'évidence une opération d'assemblage à la fois coûteuse et difficile (avec cela va de soi de possibles conséquences négatives sur la fiabilité

⁷⁹⁰ « *In many applications it would be desirable to make multiples devices on a single piece of silicon in order to be able to make interconnections between them as part of the manufacturing process and thus reduce size, weight, etc. as well as cost per active element* », Carnet de laboratoire de Robert N. Noyce, 23 janvier 1959, cité in [Riordan et Hoddeson, 1997], p. 264. La traduction est nôtre.

⁷⁹¹ Les premiers circuits conçus par *Texas Instruments* comprenant entre cinq et une cinquantaine de composants élémentaires - deux douzaines pour les circuits solides de type *Series 51* commercialisés à partir d'octobre 1961 - on parlera rétrospectivement à leur sujet de *Small Scale Integration*, c'est-à-dire d'intégration à petite échelle.

du dispositif). On comprend donc que si le « circuit solide » de T.I. représentait le meilleur des avatars de l'idée monolithique au moment où il fut conçu, il n'en constituait pas encore une parfaite incarnation.

Quant, courant janvier 1959, il vint à Robert N. Noyce une idée extrêmement voisine de celle qu'avait eue J. Kilby quelques mois auparavant, celui-ci, en sa qualité de directeur de la recherche chez *Fairchild Semiconductor*, était en train de réfléchir aux possibles implications technologiques du nouveau procédé que Jean Hoerni avait imaginé pour produire des transistors à haut rendement. Grâce à la méthode planaire, la jeune entreprise de Mountain View se trouvait désormais en mesure de fabriquer des transistors exceptionnellement plats dont les sous-éléments, parce qu'ils se trouvaient littéralement prisonniers d'une gangue protectrice constituée de dioxyde de silicium, étaient non seulement très bien isolés sur le plan électrique mais pouvaient également résister à la plupart des agressions habituellement fatales à ce genre de dispositifs. Fort des excellents résultats déjà obtenus avec le *planar process*, R. N. Noyce estima alors que puisqu'il était possible de fabriquer *un* transistor planaire dans *une* pastille de silicium, rien ne s'opposait à ce que l'on confectionne pareillement *plusieurs* composants de cette sorte au sein d'un unique morceau de semi-conducteur. A la différence notable de Jack S. Kilby qui devait se focaliser ici sur la question de leur intégration, R. N. Noyce fit du problème posé par les connexions des différents constituants du circuit miniaturisé sa préoccupation primordiale. Tirant intelligemment parti des avantages offerts par la technologie planaire, il conçut de recourir à la photolithographie pour déposer des réseaux composés de très fines lamelles métalliques à la *surface* de la tranche de silicium. Etablir un contact électrique avec tel ou tel composant « enfoui » demandait ensuite que l'on perce la mince couche de dioxyde de silicium protégeant le circuit à l'endroit congru et que l'on vaporise ensuite une infime quantité de métal au cœur de ce minuscule orifice. En cet emplacement - et en cet emplacement seulement - une connexion électrique se trouvait établie avec l'entrelacs métallique courant à la surface du *wafer*.

Etant bien compris qu'en janvier 1959 Robert N. Noyce ignorait tout des travaux de Jack S. Kilby (et réciproquement), il convient de prendre ici toute la mesure de ce que cette « nouvelle » façon de penser le circuit intégré pouvait apporter à un état de l'art tout juste en train de prendre forme. Pour débiter, il nous faut certainement convenir du fait que l'approche du chercheur de *Fairchild Semiconductor* se singularisait par une élégance technologique rare. De dimensions extrêmement réduites, son circuit monolithique était en effet *plat* et *protégé* par la fine pellicule de dioxyde de silicium dont on l'enveloppait afin de lui conférer une bonne isolation électrique. Ensuite, ce dispositif ne comportait *aucune* partie

ou élément *proéminents*. Là où Jack Kilby avait employé des fils de connexion normaux, lesquels devaient impérativement faire saillie en quelques endroits du cristal afin de remplir normalement leur fonction, R. N. Noyce, lui, fit appel à la méthode planaire pour lithographier de véritables « micro-réseaux » électriques à sa surface. Outre le fait que ceci réduisait quasiment à néant le risque de voir une connexion arrachée à l'occasion d'une mauvaise manipulation ou d'un choc brutal – puisque la surface du circuit demeurait pour ainsi dire égale –, l'encombrement de ce dernier s'en trouvait d'autant plus réduit. Enfin, et sûrement était-ce là la chose la plus importante de toutes, cette façon inédite d'appréhender l'intégration de nombreux composants électroniques au sein d'un semi-conducteur ouvrait non seulement sur la possibilité d'une *production de masse*, mais aussi, eut égard tout particulièrement aux technologies optiques ici mobilisées, sur la promesse de *perfectionnements* immenses.

Dans un des paragraphes de « Microelectronics », article paru au mois de septembre 1977 dans la revue *Scientific American*, Robert N. Noyce est revenu en détail sur sa création en évoquant notamment les développements techniques antérieurs qui l'avaient autorisé à matérialiser sa géniale vision de l'idée monolithique. Il mentionne ainsi les noms et les travaux de deux hommes, ceux de Kurt Lehovec⁷⁹², un physicien d'origine tchèque employé par la *Sprague Electric Company*, et ceux de Jean Hoerni. Au premier, il emprunta l'idée consistant à séparer électriquement les différents composants du circuit au moyen de jonctions P-N employées à la manière de diodes, au second, nous en avons déjà longuement parlé, la technologie planaire :

« Le circuit intégré, tel que nous l'avons conçu et développé chez Fairchild Semiconductor en 1959, réalise la séparation et l'interconnexion des transistors et des autres éléments du circuit par des moyens électriques plutôt que physiques. Cette séparation est accomplie par l'introduction de diodes de type P-N, ou rectificateurs, qui permettent au courant électrique de circuler dans une seule direction. Cette technique a été brevetée par Kurt Lehovec de la Sprague Electric Company. Les composants du circuit sont interconnectés au moyen d'un film conducteur métallique déposé par photogravure, ce qui permet de tracer [à la surface du wafer] le schéma exact des connexions. La présence d'une pellicule isolante

⁷⁹² A l'instar de J. S. Kilby et de R. N. Noyce, Kurt Lehovec conçut lui aussi un circuit monolithique en 1958-59. Fort semblable au dispositif mis au point par le chercheur de T.I., ce circuit se distinguait toutefois par l'usage qui y était fait de jonctions P-N, lesquelles permettaient de séparer électriquement les composants électroniques. Le 22 avril 1959, soit six semaines après que T.I. ait rendu publique son invention, K. Lehovec déposa un brevet pour protéger la sienne. Portant le numéro 3,029,366 et intitulé « Multiple Semiconductor Assembly », ce brevet a été officiellement attribué le 10 avril 1962.

est exigée pour séparer le semi-conducteur sous-jacent de ce film de métal à la seule exception des zones où l'on veut établir des contacts. Le processus sur lequel repose cette isolation a été développé par Jean Hoerni à Fairchild en 1958 quand il a inventé le transistor planaire: une fine couche de dioxyde de silicium, un des meilleurs isolants connus, est formée à la surface du wafer après que celui-ci ait été traité et avant que l'on n'y dépose le conducteur métallique. Depuis lors, des techniques additionnelles ont été mises au point qui octroient au concepteur de circuits plus de flexibilité, mais les méthodes fondamentales [que nous avons décrites] étaient disponibles dès 1960, et l'ère du circuit intégré avait débuté⁷⁹³.».

Ainsi que le fait remarquer l'inventeur du circuit intégré planaire à la fin de ce court extrait, les 18 années qui se sont écoulées entre le moment où ce dispositif a été conçu et celui où l'article cité a été rédigé ont vu son processus de fabrication (et ses performances) subir de considérables améliorations. Cependant en 1977, c'est-à-dire quatre ans avant qu'I.B.M. n'introduise sur le marché américain son *Personal Computer*⁷⁹⁴, les technologies de base qui étaient employées pour produire les circuits intégrés demeuraient sur le fond extrêmement semblables à ce qu'elles avaient été environ deux décennies auparavant. A notre sens sa longévité exemplaire dans un secteur industriel enclin comme on le sait aux transformations rapides témoigne parfaitement du caractère exceptionnel de la méthode de fabrication conçue début 1959 par le chercheur de *Fairchild Semiconductor*. Pour une ou plusieurs raisons que nous n'avons malheureusement pas pu éclaircir, R. N. Noyce ne dévoila son invention à ses collaborateurs qu'à la fin du mois de février 1959. D'après Michael Riordan et Lillian Hoddeson⁷⁹⁵, cette date correspond au moment où des rumeurs insistantes commencèrent à parvenir à Mountain View, qui faisaient état du fait que *Texas Instruments* s'appêtait à

⁷⁹³ Robert N. Noyce « Microelectronics : Introducing an Issue on the Microelectronic Revolution, in which Putting Large Numbers of Electronic Elements on Silicon "Chips" has Profoundly Increased the Capabilities of Electronic Devices », *Scientific American*, Septembre 1977, Volume 23, n°3, pp. 63-69. « *The integrated circuit, as we conceived and developed it at Fairchild Semiconductor in 1959, accomplishes the separation and interconnection of transistors and other circuit elements electrically rather than physically. The separation is accomplished by introducing pn diodes, or rectifiers, which allow current to flow in only one direction. The technique was patented by Kurt Lehovec at the Sprague Electric Company. The circuit elements are interconnected by a conducting film of evaporated metal that is photoengraved to leave the appropriate pattern of connections. An insulating layer is required to separate the underlying semiconductor from the metal film except where contact is desired. The process that accomplishes this insulation had been developed by Jean Hoerni at Fairchild in 1958, when he invented the planar transistor: a thin layer of silicon dioxide, one of the best insulators known, is formed on the surface of the wafer after the wafer has been processed and before the conducting metal is evaporated onto it. Since then additional techniques have been devised that give the designer of integrated circuits more flexibility, but the basic methods were available by 1960, and the era of the integrated circuit was inaugurated* ».

⁷⁹⁴ Publiquement présenté aux Etats-Unis en 1981, le P.C. ne sera importé en France qu'à partir du mois de janvier 1983.

⁷⁹⁵ In [Riordan et Hoddeson, 1997], p. 264.

effectuer une annonce publique d'une importance absolument capitale. Compte tenu du contexte particulier dans lequel tout ceci se déroulait, il y a fort à parier, comme le pensent les auteurs de *Crystal Fire*, que R. N. Noyce en vint immédiatement à nourrir de très forts soupçons quant à ce dont il pouvait effectivement s'agir (quelles qu'aient pu être de toute façon les informations dont celui-ci disposait, il était de notoriété publique que *Texas Instruments* menait des recherches sur l'intégration électronique au bénéfice des militaires ; ceci ne pouvait donc que contribuer à le mettre sur la bonne voie). Après avoir promptement organisé une réunion au cours de laquelle le principe du circuit intégré planaire fut exposé, R. N. Noyce, Gordon Moore et les autres cadres dirigeants de *Fairchild Semiconductor* décidèrent de lancer la fabrication de quelques prototypes d'*unitary circuits*. Dans le même temps, ils se mirent d'accord pour que soit déposée au plus vite une demande de brevet. A la différence de ce qui s'était produit quelques semaines auparavant chez *Texas Instruments* où, très certainement pris de court, les avocats de la firme texane avaient conféré à leur texte une tournure insuffisamment déterminée, le représentant légal de *Fairchild* et R. N. Noyce lui-même accordèrent ici une attention toute particulière au contenu du document, décrivant notamment avec force détails et illustrations schématiques la technologie planaire ainsi que l'usage de celle-ci dans le cadre de la fabrication des circuits monolithiques. Déposée à l'U.S. *Patent Office* le 30 juillet 1959, cette demande de brevet intitulée « *Semiconductor Device-And-Lead Structure* » fut officiellement délivrée le 25 avril 1961. Or à cette date précise, la demande de brevet sur le circuit intégré que *Texas Instruments* avait remise au même organisme depuis environ trois mois n'avait toujours pas été validée... Le lendemain même, c'est-à-dire le 26 avril 1961, le juriste que T.I. maintenait en poste à Washington D.C. téléphona à J. S. Kilby pour l'informer de la tournure contraire que venaient soudainement de prendre les événements. Ce n'était là en vérité que le moment liminaire d'une bataille juridique qui allait voir *Fairchild Semiconductor* et *Texas Instruments* s'affronter une décennie durant devant l'U.S. *Court of Customs and Patent Appeals*. Toutefois, le fait que leurs avocats respectifs fourbissent leurs meilleures armes en vue de l'engagement légal imminent ne devait en rien empêcher les deux compagnies de poursuivre avec ardeur leurs travaux de recherche et de développement pas plus qu'il ne devait contrarier le processus qui allait bientôt aboutir à la mise sur le marché des premiers circuits intégrés.

2.3.3. La montée en puissance du circuit intégré dans les années soixante : les choix technologiques d'I.B.M. et le rôle déterminant de l'aérospatiale militaire et civile.

Comme l'a observé Paul E. Cerruzi dans *A History of Modern Computing*⁷⁹⁶, les différentes technologies dont on peut certainement affirmer qu'elles formaient les conditions de possibilité *sine qua non* de l'existence du circuit intégré ne furent pas spécifiquement développées pour répondre aux besoins des armées. Cependant, une fois ce dernier conçu et éprouvé- on est alors en 1961 - c'est bel et bien le marché formé par les sphères connexes de l'aéronautique militaire et de l'aérospatiale qui, entre tous, lui conférèrent la formidable impulsion que l'on sait. Contrairement à ce que beaucoup semblent aujourd'hui enclins à penser – mais comment leur en tenir rigueur lorsqu'on considère *a posteriori* l'avancée technologique prodigieuse que représente en soi l'intégration monolithique ? – le circuit intégré, jusqu'en 1964-65, peina à s'imposer sur un marché de l'informatique devenu pourtant étonnamment florissant et vigoureux (grâce notamment à l'emploi grandissant du transistor et des mémoires en tores de ferrite). Les motifs qui permettraient de rendre compte de la résistance qu'opposa plusieurs années durant l'industrie informatique dans son ensemble - et I.B.M. en particulier - à la pénétration du circuit intégré sont certainement très nombreux mais il est néanmoins quelques causes fondamentales susceptibles d'être avancées ci-après qui nous rendront plus aisée la compréhension de ce phénomène un peu surprenant.

Premièrement, mais c'est là une chose que nous avons déjà eu l'occasion d'évoquer plus haut, un circuit intégré se caractérise entre autres choses par le matériau dont il est composé. Pour l'essentiel, il s'agit de semi-conducteur. Or quant J .S. Kilby et R. N. Noyce créèrent ce dispositif, le silicium, tout comme du reste le germanium, demeuraient encore des matériaux extrêmement coûteux. Les utiliser dans le but d'assurer des fonctions aussi peu nobles que celle de support ne pouvait donc manquer d'apparaître à certains comme relevant d'un gaspillage à la fois dispendieux et superflu. Deuxièmement la question du rendement fut inévitablement soulevée à propos de la production de ces nouveaux circuits. Compte tenu de leur nature monolithique, il était en effet nécessaire d'obtenir en une seule fois une quantité plus ou moins importante de composants interdépendants en parfait état de fonctionnement ; la moindre erreur commise au cours du processus de fabrication, le moindre élément défaillant et c'était alors le circuit dans son entier qui devait être mis au rebut. Or ce problème

⁷⁹⁶ In [Cerruzi, 1998], pp. 186-187.

embarrassant ne se posait pas dans les approches intégrées de type *Micro-Module* ou *Molecular Electronics*. Certes les réalisations de l'*Army* et de l'*Air Force* ne constituaient pas à proprement parler des circuits monolithiques et, de fait, leurs qualités et leurs performances étaient loin de pouvoir rivaliser avec celles de ces derniers, mais parce qu'elles étaient modulaires, la panne d'un composant ne pouvait que rarement compromettre leur fonctionnement de façon irrémédiable. Dans une très grande majorité de cas, il suffisait simplement de remplacer la pièce défectueuse pour se trouver en mesure de revenir à la normale. Troisièmement, et ce point revêt assurément une importance capitale, l'approche monolithique, par définition et jusqu'à l'invention du microprocesseur, supposait forcément une certaine invariabilité ou fixité fonctionnelle. Etant donné la complexité et la cherté qui caractérisaient leur processus de fabrication, il était en effet inenvisageable de produire en masse autant de type de circuits intégrés qu'il pouvait effectivement se présenter de fonctions ou d'exigences à satisfaire dans tel ou tel secteur d'activité, fut-il de pointe. Nonobstant leurs défauts, les approches modulaires dans lesquelles s'étaient engagées l'armée de l'air et l'armée de terre des Etats-Unis à partir de la seconde moitié des années cinquante devaient se révéler plus flexibles ici car en fonction de l'évolution des besoins, elles laissaient toujours ouverte la possibilité de concevoir une ou plusieurs nouvelles familles de circuits avec une relative facilité (et à « moindres » frais).

A ces différents arguments d'ordre technique doivent encore être ajoutés les éléments suivants, qui concernent directement les grandes orientations technologiques adoptées par la toute-puissante compagnie I.B.M. au cours de la première moitié des années soixante. Celles-ci ont en effet joué un rôle absolument déterminant dans cette affaire.

2.3.3.1. I.B.M. et la *New Product Line*.

Nous avons précédemment signalé que dans le courant du mois d'octobre 1958, les ingénieurs de *Texas Instruments* avaient présenté à Thomas J. Watson Jr. plusieurs prototypes de « circuits solides ». C'est donc relativement tôt après leur première « naissance » – si tant est qu'ils en aient eu une seconde chez *Fairchild* – qu'I.B.M. commença à s'intéresser au possible emploi de circuits intégrés pour la fabrication de ses ordinateurs. En 1960, les dirigeants d'I.B.M. prirent la décision d'établir à Poughkeepsie une toute nouvelle division dont la mission devait consister à fournir l'essentiel, sinon la totalité, des composants électroniques nécessaires à la production de la compagnie. Un certain nombre de scientifiques, d'ingénieurs ou de techniciens employés par l'industriel possédant un excellent niveau

d'expertise dans ce domaine, l'objectif poursuivi ici consistait à valoriser ces compétences précieuses sur le plan productif de manière à réaliser d'importantes économies. Dans le même temps, la mise en place de cette nouvelle politique devait aussi permettre à I.B.M. d'élargir considérablement sa marge d'autonomie vis-à-vis de ses fournisseurs de composants. Ayant observé avec une attention toute particulière les développements techniques qui se produisaient à cette époque chez *Fairchild Semiconductors*, *Texas Instruments* et les quelques compagnies qui avaient osé s'aventurer sur le terrain encore très instable de la production de circuits intégrés⁷⁹⁷, les dirigeants et les conseillers techniques de la jeune I.B.M. *Components Division* en vinrent à juger que si le dispositif imaginé par J .S. Kilby et R. N. possédait indubitablement de nombreux atouts par rapport aux autres solutions du moment, il s'en fallait encore de beaucoup pour que sa fabrication soit économiquement rentable. Au mois de mars 1961, c'est-à-dire deux mois après que le très ambitieux mais aussi très éphémère projet de famille d'ordinateurs *8000-Series*⁷⁹⁸ ait été officiellement présenté aux membres de l'I.B.M. *Corporate Management Commitee*, on décida de réunir un groupe de réflexion autour de l'ingénieur Erich Bloch – un ancien du projet *Stretch* - dans le but d'étudier « la faisabilité de l'emploi d'une circuiterie de technologie avancée dans les machines de la série 8000⁷⁹⁹ ». Emerson W. Pugh le rappelle dans l'ouvrage absolument remarquable qu'il a consacré il y a quelques années à l'histoire de « *Big Blue* », le rapport d'expertise rassemblant les conclusions du *task group* présidé par E. Block fut rendu après seulement deux semaines de travail. Dans celui-ci, on pouvait tout spécialement lire la déclaration suivante :

⁷⁹⁷ On citera par exemple *General Electric*, *Transitron* et *Teledyne*, via sa filiale *Amelco*.

⁷⁹⁸ Imaginée à Poughkeepsie, la famille d'ordinateurs I.B.M. *8000-Series* devait être constituée de quatre processeurs différents offrant deux niveaux de performances pour les applications bureautiques et deux autres niveaux pour les travaux de nature scientifique (le plus puissant d'entre tous ayant une puissance de calcul à peu près équivalente à celle du supercalculateur *Stretch*). Tout comme l'I.B.M. *1401-compatible* et l'I.B.M. *1410*, des machines fabriquées à Endicott – le laboratoire « rival » - il était prévu que les ordinateurs de la série 8000 soient compatibles. Le problème qui se posa alors était que faute de dispositions rapidement prises pour assurer une certaine intercompatibilité entre les deux groupes de machines, celles-ci risquaient tout bonnement de se trouver en situation de concurrence sur le marché. Afin de trouver une solution au plus vite, le vice-président d'I.B.M., Vincent T. Learson, envoya Bob. O. Evans à Poughkeepsie. Ingénieur de formation, celui-ci avait assuré pendant plusieurs années la supervision du développement des modèles 1401 et 1410 à Endicott. Peu de temps après sa nomination, B. O. Evans préconisa l'interruption du programme *8000-Series* en insistant sur la nécessité de désormais « développer une ligne de produits totalement cohérente ». En mai 1961, ses conseils furent suivis à la lettre par la direction d'I.B.M. et les machines de la série 8000, à l'exception du prototype 8106 mis au point à la *Data Systems Division* par Fred Brooks, Gerrit Blaauw, Gene Amdahl, John Cocke, et Elaine Boehm, ne virent jamais le jour. Les recommandations faites en 1961 par Bob. O. Evans jouèrent cependant un rôle décisif dans l'orientation des décisions qui aboutirent finalement à la mise en chantier des familles de compatibles *System/360* et *System/370* en 1964-65.

⁷⁹⁹ Erich Bloch à Bob O. Evans, rapport du 18 avril 1961, « *Advanced Technology Study* », cité in [Pugh, 1995], p. 282.

« Nous pensons que l'approche choisie par TI afin de résoudre la question de la microminiaturisation, c'est-à-dire le circuit solide, est vouée à souffrir d'un désavantage économique en raison des nombreuses caractéristiques dont doivent être simultanément dotés des composants divers et multiples.⁸⁰⁰ ».

Toujours guidés dans leurs réflexions par des considérations premières d'ordre économique, les neuf experts du comité Bloch devaient ensuite assurer que dans les quelques années à venir, des chips pourvues chacune d'un unique transistor permettraient sans nul doute d'obtenir un rapport qualité/prix optimum. Dans la double intention de maintenir au plus bas le coût de production des transistors et au plus haut leur niveau de fiabilité, ils préconisaient encore l'emploi de composants de type planaire. Cette somme de recommandations eut en définitive pour effet l'arrêt pur et simple du projet de famille d'ordinateurs 8000-Series tandis qu'elle déclencha le démarrage, au sein de la division composants d'I.B.M., d'un programme de recherche et de développement visant à mettre au point la nouvelle circuiterie électronique dont E. Bloch et ses collaborateurs avaient spécifié les grands lignes dans leur compte-rendu du mois d'avril. Le 1^{er} août 1961, Erich Bloch, qui entre-temps avait été nommé à la tête de ce projet, soumit à sa hiérarchie une étude d'une quarantaine de pages intitulée « Solid Logic Technology Program – Objectives and Directions ». Dans ce travail, l'ingénieur d'origine allemande fournissait une description extrêmement détaillée des dispositifs qui, jusqu'en 1967-68, allaient constituer la technologie propriétaire d'I.B.M. en matière de composants électroniques microminiaturisés. Baptisés S.L.T. (pour *Solid Logic Technology*), mais également connus en interne sous le nom de *Compact Technology*, ces modules étaient en fait très proches, conceptuellement et physiquement, de ceux qui avaient déjà été développés par la compagnie *Radio Corporation of America* dans le cadre du programme militaire *Micro-Module*⁸⁰¹. En dépit, donc, des rapports privilégiés entretenus avec la société *Texas Instruments*, en dépit, aussi, de l'énorme pas en avant technologique représenté par la mise au point du circuit intégré planaire chez *Fairchild*, les responsables d'I.B.M., au moment crucial où ils décidèrent d'engager directement leur compagnie dans la production de modules électroniques en semi-conducteur,

⁸⁰⁰ *Ibidem*.

⁸⁰¹ Un des points les plus intéressants ici est assurément représenté par le fait qu'I.B.M., dans sa volonté d'optimiser la production en masse des modules S.L.T., confia le pilotage de sa ligne de production ultramoderne à des ordinateurs. Ainsi, en amont, un système 7090 spécialement programmé dans ce but élaborait des schémas formels complets – plans de câblage compris – des dispositifs devant être fabriqués. Ces descriptifs étaient ensuite passés à un I.B.M. 1401 qui, après interprétation, procédait à leur conversion en instructions directement « compréhensibles » par les différents automates constituant l'équipement de production.

n'optèrent pas pour le circuit intégré – le coût de sa fabrication en série ayant été jugé beaucoup trop élevé – mais pour une autre solution technique, peut-être moins performante, mais sûrement plus facile et plus économique à mettre en œuvre. Cette situation demeura inchangée jusqu'à la seconde moitié des années soixante, époque où I.B.M. introduisit sur le marché les premiers modèles de sa célèbre gamme d'ordinateurs *System/360*. Notons bien que l'unité de traitement de ces machines demeures légendaires⁸⁰² tant elles possédaient de caractéristiques innovantes – entre autres choses inédites elles étaient pourvues d'un jeu commun de micro-instructions leur assurant intercompatibilité et compatibilité ascendante et disposaient aussi de la capacité d'émuler l'I.B.M. 1401 *Data Processing System*, un ordinateur transistorisé alors extrêmement répandu dans le milieu des affaires - n'était pas constituée de circuits intégrés mais de modules S.L.T. (leur mémoire interne étant quant à elle formée de matrices en tores de ferrite). Il fallut en fait attendre l'année 1971 et avec elle l'annonce de la commercialisation prochaine de la famille d'ordinateurs *System/370* pour qu'enfin I.B.M. commence à proposer à sa clientèle des machines architecturées autour de circuits intégrés... Rendre compte de la « conversion » tardive du géant américain de l'informatique à l'emploi du circuit intégré implique que nous procédions maintenant à l'examen de quelques données techniques et historiques marquantes.

En 1961, nous l'avons rapporté, la compagnie I.B.M. choisit de se doter d'un nouveau département production, lequel devait fabriquer des composants électroniques à base de semi-conducteurs ; à ce stade, il restait encore à déterminer quel serait leur type. Après que les membres du comité Bloch aient rendu leurs analyses sur la question, on décida de produire des dispositifs électroniques modulaires très semblables à ceux qui avaient été conçus pour le projet *Micro-Module*. L'option qui aurait consisté ici à fabriquer des circuits intégrés – des « *monolithics* » selon la terminologie alors en vigueur chez I.B.M. – fut quant à elle promptement écartée *en raison de son coût*. Ainsi qu'en atteste clairement le contenu de deux mémorandums internes datant de la première moitié des années soixante⁸⁰³, le circuit intégré,

⁸⁰² Une grande partie de cette légende tient toutefois plus de la remarquable efficacité du service marketing d'I.B.M. que de l'excellence technologique ou du caractère révolutionnaire des machines de la famille 360. Nous reviendrons sur cette question plus tard.

⁸⁰³ Dans *A History of Modern Computing*, Paul E. Ceruzzi a présenté de courts passages extraits de ces deux rapports internes. Ces derniers illustrent parfaitement le changement progressif d'attitude d'I.B.M. vis-à-vis du circuit intégré au cours de la première moitié des années soixante. Dans le premier, rédigé par Robert A. Henle au mois de septembre 1963, on peut lire que le circuit intégré « ne constitue pas plus une menace concurrentielle aujourd'hui qu'il n'en sera une dans les cinq années à venir ». Dans le second, écrit quant à lui par John Haanstra en septembre 1964, on peut lire que « des progrès rapides ont été accomplis dans le domaine des circuits intégrés » et qu'en matière « d'expérience pratique » I.B.M. possède désormais « un retard de 2 à 4 ans ». Dans ce même document, J. Haanstra évalue de « 6 mois à une année » le temps qu'il faudrait à I.B.M. pour prétendre

qui n'était pas considéré par les spécialistes d'I.B.M. comme une menace sérieuse à court ou moyen terme à la fin de l'année 1963, commença cependant à générer de réelles inquiétudes au sein de la compagnie à partir du mois de septembre 1964. Une année seulement sépare la rédaction de ces deux comptes-rendus mais au moment précis où l'un et l'autre furent rédigés, leurs contenus respectifs pouvaient être tenus pour vrais. De fait, en 1961, la direction d'I.B.M. prit la décision de fabriquer les modules électroniques destinés à ses futurs ordinateurs en *Solid Logic Technology* (ce qui supposait que les unités de production se voient équipées en conséquence). Peu de temps après cela – le 4 janvier 1962 pour être exact – Thomas J. Watson Jr. et Vincent T. Learson, son second, se prononcèrent en faveur de l'unification de la ligne des produits I.B.M. et de la rationalisation de leur processus de fabrication. Ce tournant radical dans la politique générale du géant américain de l'informatique eut pour conséquence essentielle le démarrage du programme N.P.L au printemps de la même année. Sous cette désignation au caractère relativement indéfini – N.P.L. signifiant *New Product Line* - se « dissimulaient » en réalité cinq ordinateurs appartenant à une même famille. Une famille qu'I.B.M. voulait révolutionnaire. Afin de préserver au mieux le secret industriel, chacune de ces machines reçut un identifiant numérique simple – on parlait ainsi des systèmes 101, 250, 315, 400 et 501 – dont l'apparence par définition très peu évocatrice ne pouvait en rien laisser conjecturer que l'on avait affaire ici à une gamme unifiée de produits (le fait que ces cinq nombres ne se suivent pas et que certains correspondent à la désignation d'ordinateurs concurrents ne relevait évidemment en rien du hasard). On comprendra sûrement mieux les raisons de ce luxe de précautions si l'on précise maintenant que pendant l'année 1963, la *New Product Line* reçut une nouvelle appellation. En l'occurrence elle fut rebaptisée *System/360*. Le mot « *system* » fut sélectionné ici pour signifier que la nouvelle série d'ordinateurs d'I.B.M., plus qu'un simple ensemble homogène de machines et de périphériques, formait en réalité un agrégat de matériels informatiques interchangeable caractérisés notamment par une totale compatibilité logicielle. Quant au nombre 360, qui rappelle sans détour le nombre de degrés que comporte le cercle, il fut adopté pour signaler que les machines du *System/360* étaient capables de répondre aux exigences de *toutes* les catégories d'utilisateurs et donc de faire « tourner », comme on dit dans le jargon des informaticiens, *toutes* les applications. Dans *Computer, A History of the Information Machine*, Martin Campbell-Kelly et William Aspray ont indiqué que quelques-uns des pans du secret quasi militaire qui vingt ans durant entourait le développement de cette

refaire ici sa capacité d'expertise technologique. In [Ceruzzi, 1998], pp. 190-191; on pourra également consulter la note n°52, p. 348.

gamme d'ordinateurs commencèrent à être levés au début des années 1980. Et ces deux auteurs de mentionner ensuite quelques formules célèbres dues à Tom Wise, un journaliste du magazine américain *Fortune* ayant eu le privilège d'accéder avant l'heure à un certain nombre d'informations industrielles sensibles, qui permettent d'apprécier à sa juste mesure l'envergure à peine croyable de ce projet informatique proprement gigantesque⁸⁰⁴. Selon T. Wise, le programme *System/360* représenta pour I.B.M. « *un coup risqué à 5 milliards de dollars* ». Le journaliste alla même jusqu'à prétendre que « *...le projet Manhattan qui produisit la bombe atomique durant la deuxième guerre mondiale n'avait pas coûté autant d'argent* ». D'après lui toujours, ce projet en vint à être surnommé « *vous pariez votre compagnie* » par certains cadres supérieurs d'I.B.M. tellement ils le trouvaient ambitieux et périlleux. Force est de reconnaître que si elle devait de toute façon rester officieuse, cette qualification au demeurant peu rassurante possédait au moins le mérite de présenter on ne peut plus clairement les enjeux et les dangers dont était intrinsèquement porteur le projet *System/360*. Pour dire toute la vérité ce n'est ni plus ni moins que l'existence de la société I.B.M., la compagnie informatique alors la plus riche et la plus puissante de la planète, que T. J. Watson Jr. et V. T. Learson placèrent dans la balance au moment où ils décidèrent de faire de la *New Product Line* une réalité technologique...

Pour prendre cette décision que l'on peut sans conteste possible qualifier d'historique, les deux hommes devaient s'appuyer largement sur les conclusions rendues par la commission spéciale S.P.R.E.A.D. (cet acronyme signifie *Systems, Programming, Review, Engineering And Development* mais il renvoie aussi au verbe *to spread* qui veut dire « étendre »). Formée en octobre 1961 par V. T. Learson dans le but de découvrir au plus vite une solution au problème « d'hétérogénéité et de prolifération » des matériels qui touchait de plus en plus sérieusement l'industriel américain, la S.P.R.E.A.D. *Task Force* était composée de treize personnes, tous ingénieurs, développeurs ou chefs des ventes dotés d'une solide expérience dans leur domaine spécifique. Le problème qu'il leur fallait impérativement résoudre dans les plus brefs délais - et qu'ils parvinrent à résoudre dans les délais les plus brefs - peut être résumé de la façon suivante. En 1960, I.B.M. fabriquait sept types d'ordinateurs, tous évidemment très différents les uns des autres. Le modèle 1401, relativement peu onéreux, était par exemple destiné au secteur des affaires tandis que les systèmes 7090/7094 et *Stretch*, machines à usage scientifique nettement plus chères mais aussi incomparablement plus puissantes, se voyaient quant à elles « réservées » à des organisations gouvernementales ou

⁸⁰⁴ In [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], pp. 140-141.

militaires. La disparité, ou disons plutôt la richesse de cet éventail de machines, contribua bien entendu à renforcer la puissance déjà exceptionnelle de l'empire industriel à la destinée duquel présidaient les Watson père et fils : en schématisant un peu la situation, on peut ainsi affirmer qu'il existait au moins un ordinateur I.B.M. capable de satisfaire les besoins spécifiques d'un utilisateur, quels qu'aient pu être ceux-ci au demeurant. Simultanément, et en cela résidait le caractère extrêmement paradoxal de la situation, cette même richesse, cette même hétérogénéité, en vint très rapidement à représenter un facteur non négligeable de risque d'auto-effondrement pour le géant de l'informatique. En effet, et bien qu'il se soit toujours agi ici d'ordinateurs, chaque catégorie de système était unique – autrement dit incompatible avec le restant de la gamme - et exigeait de ce fait la mise en place et le maintien permanent d'une chaîne logistique spécifique (soit une ligne de production dédiée, du personnel spécialement formé pour la vente, l'installation et la formation des employés du locataire de la machine, les réparations, etc.). Cette série de machines couvrant de surcroît un spectre de performances très large, les modules électroniques utilisés pour les fabriquer variaient en type, en nombre et en qualité. Afin de donner ici une idée précise de ce que cela pouvait représenter sur le plan de l'organisation et des coûts de production, on précisera qu'à un moment donné, le catalogue de circuits d'I.B.M. comprenait quelques 2500 pièces différentes ! Pour compliquer davantage les choses, ce qui pouvait être affirmé des circuits d'ordinateurs valait également pour leurs très nombreux périphériques. En d'autres termes, et sauf exception, un périphérique quelconque, quelle que soit sa fonction, ne pouvait être raccordé directement à un type de machine en particulier. Pour que le processeur de celle-ci se trouve en mesure de piloter ce dernier, il fallait impérativement lui adjoindre une interface de contrôle spéciale. En conséquence, le nombre de ces contrôleurs hardware était fonction de celui des périphériques et types d'ordinateurs existants. Ceci, pour le seul versant matériel du problème... L'aspect logiciel, à une époque où l'importance de cette composante de l'informatique longtemps demeurée dans l'ombre de la machine se faisait de plus en plus sentir, était encore plus complexe et préoccupant.

Fidèle en cela à une tradition commerciale vieille d'un demi-siècle, la société I.B.M., même si elle proposait ses ordinateurs à la vente depuis la signature du « *consent decree* » du 25 janvier 1956⁸⁰⁵, préférait les louer à ses très nombreux clients. Les programmes nécessaires

⁸⁰⁵ Résultat d'un retentissant procès antitrust qui opposa l'*U.S. Department of Justice* à I.B.M. pendant quatre ans (du 21 janvier 1952 au 25 janvier 1956 pour être précis), le « *consent decree* » de 1956 visait à briser la position monopolistique occupée par l'entreprise de Thomas J. Watson Jr. Entre autres décisions légales particulièrement remarquables, il fut décrété que désormais I.B.M. devrait: 1) mettre en vente les matériels jusque-là exclusivement proposés à la location; 2) publier l'information concernant la maintenance de ses

au fonctionnement de la machine et de ses périphériques – l'*operating system* si l'on préfère – mais aussi les applications et langages (*e.g.* COBOL, FORTRAN) que l'utilisateur désirait employer étaient donc systématiquement fournis par la compagnie (tout ceci formant un seul et même lot appelé « *bundle* »). Quelquefois, mais la chose n'était pas vraiment rare, la société locataire employait aussi des programmeurs dans le but de développer ses propres applications (cette pratique permettant au final de disposer de logiciels beaucoup mieux adaptés à une activité spécifique que ne pouvaient l'être les programmes plus élémentaires livrés par le constructeur). Or compte tenu du fait que les différents ordinateurs de marque I.B.M. étaient incompatibles les uns avec les autres, un programme écrit pour une machine particulière ne pouvait jamais être réutilisé directement sur un autre système. Cette « singularité » technologique, parfait reflet de la façon dont *Big Blue* avait pensé et organisé le fractionnement de son bassin d'usagers, finit par représenter une source de difficultés et de dépenses aussi intarissable qu'insupportable pour le fabricant américain et la majorité de ses clients. En effet, avec le temps, l'offre logicielle d'I.B.M. n'avait cessé de s'accroître et de se diversifier (suivant ou prévenant en cela l'évolution de la clientèle et celle de ses besoins). En supposant donc qu'à un moment précis le répertoire de programmes d'I.B.M. ait comporté un nombre quelconque – mais relativement élevé – de logiciels, la totale incompatibilité de ses systèmes informatiques, au moins en droit, impliquait qu'il existe une version particulière de ces derniers pour chacun des modèles d'ordinateurs proposé à la location. A court ou moyen terme, le risque auquel s'exposait I.B.M. était par conséquent celui de l'explosion combinatoire de son offre logicielle. Il nous faut encore indiquer ici que le développement et le suivi des programmes – des produits industriels fondamentalement immatériels réclamant plus souvent qu'à leur tour des modifications ou des correctifs - était une activité permanente qui coûtait alors extrêmement cher et en temps, et en personnel qualifié, et, bien sûr, en argent. Dans cette situation, sorte de mouvement spiralé et autoalimenté promis à une amplification aussi certaine qu'elle pourrait être dangereuse, aucun industriel, eut-il été « un Léviathan chassant dans ses propres eaux », n'aurait pu envisager l'avenir de façon sereine. Tôt ou tard, ce cycle dévorant finirait par épuiser ses ressources, le laissant suffisamment vulnérable pour le placer (enfin) à la portée d'adversaires peut-être moins « pesants » et plus réactifs... Quant à ceux des utilisateurs, et ils étaient assez nombreux à se trouver dans ce cas, qui avaient opté

machines. Outre le fait que ces deux dispositions légales autorisaient d'une part la création de sociétés spécialisées dans le crédit-bail (*leasing*) de matériels I.B.M. et, d'autre part, la sous-traitance de l'entretien de ces derniers par un tiers, il faut bien voir aussi qu'elles mettaient directement à la disposition de la concurrence – fabricants d'ordinateurs et/ou de périphériques - toutes les informations techniques relatives aux machines de marque I.B.M...

pour l'écriture de leurs propres programmes, la conjoncture n'était guère plus favorable (quoiqu'il existât ici pour eux une échappatoire assez intéressante). En 1961 par exemple, le loyer mensuel d'un ordinateur I.B.M. 1401 et de ses périphériques – y compris la fameuse imprimante 1403 qui devait tellement contribuer au succès de cet ordinateur – s'élevait en moyenne à 2500-3000 dollars. Le cas échéant, l'ensemble des frais liés à la conception de logiciels propriétaires – c'est-à-dire de programmes développés en interne – devait encore être ajouté à cette somme déjà importante. Dans l'hypothèse parfaitement envisageable où la compagnie concernée aurait souhaité disposer d'une puissance de calcul plus importante que celle dont elle avait bénéficié jusqu'alors, elle aurait inévitablement été confrontée à la difficulté et au choix suivants. La politique commerciale d'I.B.M. consistant nous l'avons dit à segmenter et différencier très fortement son offre afin de pouvoir répondre adéquatement aux demandes spécifiques d'utilisateurs susceptibles d'appartenir à des groupes professionnels bien déterminés, vouloir augmenter sa puissance de calcul jusqu'à un certain seuil c'était pour le client devoir possiblement changer de type d'ordinateur. Or louer par exemple un I.B.M. 7070, la déclinaison affaires de l'ordinateur scientifique 7090/7094, revenait autrement plus cher que de louer un système 1401 complet, y compris dans une configuration élémentaire⁸⁰⁶. Malgré son importance, cet investissement ne correspondait toutefois pas à la dépense la plus élevée qui était susceptible d'être réalisée dans pareil cas de figure. En effet, remplacer un système informatique I.B.M. par un autre, certes plus puissant mais toujours issu des chaînes de montage de ce constructeur, représentait une opération lourde, lente, qui exigeait en particulier du client qu'il reprogramme entièrement ses applications propriétaires en vue de les rendre exploitables par la nouvelle machine. Pendant tout ce temps bien sûr, son ordinateur était immobilisé et son activité commerciale pouvait s'en trouver ralentie. Une fois encore, on le constate, l'incompatibilité des systèmes I.B.M. se trouvait à l'origine directe d'une difficulté de taille. Sachant en effet que le coût d'un tel chantier de réécriture pouvait équivaloir à celui du nouvel ordinateur – en certaines circonstances il pouvait même le dépasser – rien, puisque tout, de toute façon, était à refaire,

⁸⁰⁶ A titre d'illustration, on comparera ces deux configurations orientées *business*. Pour un système 1401 « complet » incluant : une unité de traitement 1401 modèle A-1 (1200 \$), un *Card Read Punch* 1402 modèle 1 (550 \$), une imprimante 1403 modèle 1 (725 \$), un lecteur de bande magnétique 729 II (700 \$ avec un maximum de six lecteurs), un adaptateur d'entrée/sortie pour le(s) lecteur(s) de bande (980 \$), une banque mémoire additionnelle en tores de ferrite modèle 1406 (575 \$ pour le modèle de base), le coût total (minimum) s'élevait à 4730 dollars. Pour une installation 7070 typique: 8 lecteurs de bandes magnétiques modèle 729-2 (5600 \$), console de contrôle modèle 7150 (300 \$), mémoire en tores de ferrite modèle 7301 (3500 \$), un lecteur de cartes 7501 (75 \$), un contrôleur d'entrée/sortie modèle 7600 (825 \$), un contrôleur arithmétique/programmation modèle 7601 (3000 \$), un contrôleur de mémoire modèle 7602 (1600 \$), un contrôleur de bande à deux canaux modèle 7604 (2700 \$), un convertisseur de puissance modèle 7802 (400 \$), soit un total de 18000 dollars.

ne pouvait empêcher les sociétés jusqu'ici restées fidèles à I.B.M. de se tourner vers une concurrence qui forcément n'attendait que ça. Une situation aussi critique, aussi dangereuse à terme, réclamait la mise en place de solutions parfaitement adaptées à l'ampleur des problèmes rencontrés, fut-ce au prix d'une prise de risques économiques et technologiques sans précédents. La réponse d'I.B.M., radicale, prit la forme de la gamme d'ordinateurs compatibles *System/360*.

Les ordinateurs appartenant au *System/360* étaient dotés d'unités centrales de traitement compatibles, d'interfaces périphériques standardisées et pouvaient en outre exploiter les programmes conçus pour l'I.B.M. 1401. Etant donné que la compagnie I.B.M. avait considérablement investi dans la production en masse des modules S.L.T. – à tel point d'ailleurs qu'elle devint à un moment donné le premier fabricant mondial de composants en semi-conducteurs - il est bien évident que la nouvelle lignée d'ordinateurs qu'elle entendait introduire sur le marché en 1965 ne pouvait être organisée qu'autour de cette technologie propriétaire. De fait les choses se déroulèrent ainsi qu'elles avaient été planifiées et, conformément aux études prévisionnelles, le *System/360* fut un immense succès commercial⁸⁰⁷. Toutefois cette formidable réussite, laquelle ne faisait après tout que récompenser à leur juste valeur les sacrifices et risques monumentaux acceptés pour la rendre possible, se doubla rapidement d'une séquelle vicieuse que les stratèges d'I.B.M. n'avaient nullement envisagée.

Parmi les « sept nains » - sobriquet coloré dont on affublait à cette époque le groupe restreint⁸⁰⁸ que formaient les principaux concurrents de l'*International Business Machines* – il en est au moins un qui fut prompt à deviner que « Blanche-neige » - autrement dit I.B.M. - préparait d'une manière ou d'une autre une offensive commerciale d'envergure vraiment inhabituelle. Les indices corroborant cette thèse ne cessant de s'accumuler à partir de 1962-63, une compagnie, la *Radio Corporation of America*, fit le choix d'une tactique hardie afin de pouvoir contrecarrer les plans d'I.B.M. sitôt que la forme de son offensive se trouverait clairement identifiée. De tous les rivaux d'I.B.M., la société R.C.A., ou plutôt le grand trust

⁸⁰⁷ Les machines composant le *System/360*, en plus d'être qualifiées d'« ordinateurs qu'I.B.M. fit et qui firent I.B.M. » ont parfois été présentées comme les systèmes informatiques ayant inauguré la soi-disant troisième génération d'ordinateurs (le service marketing du grand fabricant usa lui-même de cet argument pour promouvoir cette gamme à l'occasion de son lancement). Or les circuits électroniques de ces instruments reposaient uniquement sur la S.L.T, une technologie dont on peut dire qu'elle se situait en fait à mi-chemin entre les cartes électroniques sur lesquelles on installait une multitude de composants individuels et le circuit intégré proprement dit.

⁸⁰⁸ Le groupe des « sept nains » était composé des compagnies suivantes: *Radio Corporation of America* (R.C.A.), *Sperry Rand*, *National Cash Register* (N.C.R.), *General Electric* (G.E.), *Control Data Corporation* (C.D.C.), *Honeywell* et *Burroughs*.

industriel qui se cachait derrière cet acronyme, était sûrement celle qui pratiquait la politique la plus agressive et la plus audacieuse. De par son ancienneté (elle fut fondée en octobre 1919) et la multiplicité de ses activités industrielles à caractère hautement technologique (radiophonie, télévision, informatique, armement, etc.), elle était également une des plus riches. Prenant justement appui sur cette puissance financière, mais aussi sur le fait qu'étant très loin de disposer du même bassin de clients qu'I.B.M., elle ne souffrait pas de l'inertie typiquement entraînée par ce genre de situations, la compagnie R.C.A., écrivent M. Campbell-Kelly et W. Aspray, « *engagea 50 millions de dollars dans un programme visant à produire des ordinateurs compatibles I.B.M. deux ans avant que le System/360 ne soit annoncé*⁸⁰⁹ [nous étions alors en 1962]. ». Contrairement à ce que l'on serait peut-être tenté de penser en première analyse, le caractère intéressant de ce vaste projet industriel ne résidait pas entièrement dans le fait qu'il visait *in fine* à permettre la production de compatibles I.B.M. En réalité le concept de compatibilité n'était pas neuf en informatique et pour ne donner que ce seul exemple, la *Radio Corporation of America*, *Honeywell*, et *General Electric* avaient déjà mis de telles machines sur le marché au tout début de la décennie soixante (il s'agissait notamment de compatibles I.B.M. 1401). Pour R.C.A., le tour de force véritable consista ici à garder intentionnellement : « *...ses plans flexibles de façon à pouvoir reproduire l'architecture et le code instruction qu'I.B.M. choisirait pour ses futurs ordinateurs ; quelles que puissent être ces solutions techniques, il ne faisait aucun doute qu'elles étaient appelées à devenir un standard pour les Etats-Unis et aussi, peut-être, pour le reste du monde*⁸¹⁰. »

. Jusqu'au dernier moment, c'est-à-dire avril 1964, les décideurs de la *Radio Corporation of America* ne disposèrent d'aucune espèce d'indice fiable qui leur permettrait éventuellement de commencer à travailler dans telle ou telle direction plutôt que dans telle ou telle autre. Comprendre que si l'arc était bandé depuis longtemps déjà, il leur restait encore à savoir où, précisément, décocher leur trait. A l'instar de tous les autres acteurs de cette industrie, qu'ils soient simples clients ou bien adversaires déclarés d'I.B.M., les cadres de la R.C.A. n'eurent par conséquent d'autre choix que celui consistant à prendre leur mal en patience jusqu'au 7 avril, date à laquelle la cérémonie officielle de présentation du *System/360* fut définitivement arrêtée. Quant arriverait enfin ce moment, tous sauraient exactement comment et de quoi serait faite l'informatique de demain. Tout au moins était-ce là ce que la plupart imaginaient alors... Prétendre que la compagnie I.B.M. ne lésina pas sur les moyens

⁸⁰⁹ In [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], p. 145. Deux ans avant l'annonce du *System/360*, c'est-à-dire mars, avril ou mai 1962.

⁸¹⁰ *Ibidem*.

pour faire du lancement du *System/360* un évènement commercial d'ampleur nationale relève assurément de l'euphémisme. Un train fut ainsi spécialement affrété pour l'occasion qui servit à assurer l'acheminement de quelques 200 journalistes et éditeurs, tous évidemment triés sur le volet, jusqu'aux installations de Poughkeepsie. Dans les 165 villes américaines où I.B.M. comptait une officine de taille significative, de nombreux représentants des entreprises clientes⁸¹¹ furent également conviés à assister à la présentation de ce que le service marketing de la firme, usant ici d'une formule finalement assez peu prudente, n'hésita pas à présenter comme étant une « nouvelle génération d'ordinateurs ». A Poughkeepsie, Thomas J. Watson Jr. prononça quant à lui un discours dans lequel il fut surtout question du caractère conceptuellement et technologiquement révolutionnaire de cette série d'ordinateurs. Le Président et C.E.O. d'I.B.M. déclara notamment que le « *System/360* [représentait] *un écart très net par rapport aux concepts qui avaient été jusque là en vigueur dans le domaine du design et de la construction des ordinateurs*⁸¹². » Il poursuivit encore en affirmant que cette famille de machines marquait « *le commencement d'une nouvelle génération – non seulement d'ordinateurs – mais aussi d'applications, que ce soit dans le secteur du commerce, des sciences ou des affaires gouvernementales*⁸¹³. ». Nous aurons l'occasion plus loin de revenir sur ces prétentions, de voir en quoi, exactement, elles pouvaient être dites conformes à la réalité ou relevaient au contraire d'un argumentaire commercial spécifiquement forgé dans le but de soutenir la promotion de cette nouvelle série d'ordinateurs I.B.M. L'important, pour l'heure, est de bien voir que la présentation groupée des I.B.M. modèles 30, 40, 50, 60, et 70 et de leurs 44 périphériques correspondit au moment où le voile tomba sur l'un des projets informatiques civils les plus monumentaux et les mieux gardés de la seconde moitié de ce siècle. Dès lors bien entendu, l'ambiance de secret que la compagnie I.B.M. s'était employée à instaurer et à maintenir autour de la *New Product Line (System/360)* pendant un peu plus de deux années dû céder le pas à la transparence la plus totale. Afin de séduire une clientèle nombreuse et potentiellement intéressée, les ordinateurs et les unités périphériques composant le *System/360* furent présentés au public tandis que leurs caractéristiques techniques originales, lesquelles constituaient bien entendu autant d'arguments de vente à faire valoir en la circonstance, furent largement exposées et commentées par les maîtres d'œuvre du programme. Dans la même optique, mais aussi parce qu'elle y était légalement contrainte par

⁸¹¹ On estime à environ cent mille le nombre de personnes qui, directement ou indirectement, reçurent alors les informations commerciales concernant le *System/360*.

⁸¹² I.B.M. *News*, 7 avril 1964, « I.B.M. Announces System 360 », extrait du discours de Thomas J. Watson Jr. à Poughkeepsie, cité in [Pugh, 1995], p. 275.

⁸¹³ *Ibidem*.

les termes du « *consent decree* » de janvier 1956, des manuels techniques très complets - trop complets peut-être puisque l'on sait aujourd'hui qu'ils profitèrent aux soviétiques - furent également édités et distribués par la société I.B.M.

Aussi surprenant que cela puisse paraître, c'est en grande partie de ces brochures informatives que les ingénieurs de la *Radio Corporation of America* s'inspirèrent pour mettre au point une série d'ordinateurs compatibles avec la « quinte » de machines qui formait le cœur du *System/360*. Les dirigeants de la R.C.A., groupe industriel dont on se souviendra ici que ses leaders se tenaient prêts à agir en ce sens depuis 1962, ne mirent en réalité que très peu de temps pour lancer la production de cette nouvelle gamme d'ordinateurs qui fut bientôt annoncée sous le nom de Spectra 70. De fait, une semaine seulement après que la cérémonie de présentation dont nous venons de parler ait eu lieu – autant dire une semaine après que les données relatives aux spécificités techniques des ordinateurs de la famille 360 aient été rendues publiques - leur décision de suivre « Blanche Neige » sur un terrain qu'elle avait entièrement marqué était prise. Toutefois, ici, se contenter purement et simplement d'imiter I.B.M. aurait constitué un choix stratégique fort peu judicieux. Il était en effet patent qu'à machines théoriquement équivalentes, la plupart des clients auraient très probablement préféré le dispositif original – ainsi que la logistique rassurante dont celui-ci se trouvait toujours flanqué – à une reproduction, quand bien même celle-ci se serait révélée être d'excellente facture. Qui plus est, en cas de « défection » de l'imité – rien ne garantissait en effet que le *System/360* bénéficierait d'un soutien absolu de la part de son constructeur en cas d'accueil mitigé ou contraire – l'imitateur se serait retrouvé dans une bien fâcheuse posture... La pure et simple réplique technologique ne paraissait donc pas être ici la solution la mieux adaptée au problème. A côté de ceci, restaient encore deux grandes options stratégiques également envisageables. La première, qu'adoptèrent l'une après l'autre les compagnies *Honeywell*, *National Cash Register* et *Burroughs* entre 1964 et 1968, consistait à procéder comme l'avait fait I.B.M., c'est-à-dire à produire une nouvelle gamme de machines extrêmement performantes, entièrement compatibles entre elles, mais pas avec celles de la concurrence. Là aussi les risques économiques étaient considérables mais au moins cette façon de faire garantissait-elle à ceux qui se décidaient en sa faveur une complète indépendance technologique. La seconde approche, plus prudente, réclamait quant à elle que l'on identifie la ou les classes d'ordinateurs qui, dans le *System/360*, échouaient à satisfaire pleinement les desiderata de leurs utilisateurs. Le fait de reconnaître et de comprendre les raisons précises de cette insuffisance devait ensuite permettre la conception de machines mieux à même de répondre aux attentes de telle ou telle catégorie d'utilisateurs. Deux des « sept nains », pour les

nommer il s'agissait de la *Control Data Corporation* (C.D.C.) et de la *General Electric*, parvinrent ainsi à exploiter avec un certain succès quelques-unes des grosses insuffisances du *System/360* : la première en recentrant l'ensemble de son activité sur la fabrication de supercalculateurs et la seconde en concevant des systèmes à partage de temps (*time-sharing systems*). Parce que cette façon de faire consistait fondamentalement à exploiter une frange alors très restreinte du marché des ordinateurs, elle exigeait de la part de ceux qui l'adoptaient qu'ils se spécialisent peu ou prou, et donc qu'ils abandonnent ou délaissent les secteurs les plus larges et les plus rentables dudit marché au profit des niches négligées par le géant de l'informatique. On peut encore exprimer ceci autrement en remarquant que cette stratégie au demeurant parfaitement justifiable – c'était aussi une question de survie économique – revenait en définitive à éviter la confrontation directe avec l'ogre I.B.M. et à se satisfaire, fut-ce pour un temps, des « miettes d'un gâteau » aux dimensions pourtant colossales.

Les responsables de la *Radio Corporation of America* choisirent une toute autre approche. Pour eux battre I.B.M. à son propre jeu, avec ses propres armes et ses propres règles, exigeait en effet que l'on conçoive des ordinateurs totalement compatibles avec ceux de la série 360. En même temps, il était nécessaire que ces machines ne soient pas seulement de simples imitations des nouveaux systèmes informatiques I.B.M. ; d'une façon ou d'une autre, il fallait qu'elles se distinguent d'eux. Or cette différence qui se devait impérativement d'être significative sans nuire pour autant au mimétisme technologique supposé rattacher les ordinateurs de la gamme Spectra 70 à la ceux du *System/360* ne pouvait en définitive s'exprimer qu'au travers de deux voies décisives et étroitement liées. Primo, le *type d'éléments* employés pour fabriquer les processeurs des machines et, secundo, le *prix* fixé pour la vente ou la location de ces dernières. A ce propos, M. Campbell-Kelly et W. Aspray rappellent que pour devancer I.B.M., la R.C.A. « avait besoin d'un avantage *prix/performances de l'ordre de 10 à 15 pour cent*⁸¹⁴. ». Or la chose, on en conviendra très vraisemblablement après avoir lu ce qui précède, relevait *a priori* de la gageure. En effet comment imaginer pouvoir concurrencer I.B.M. alors que dans le cadre de la *New Product Line* cette entreprise déjà titanesque, première productrice au monde d'instruments informatiques et leader quasi absolu sur l'ensemble du marché de la vente/location d'ordinateurs⁸¹⁵, s'était spécialement dotée de moyens considérables pour fabriquer en masse des modules électroniques reposant sur une technologie propriétaire (la S.L.T.) ? Certes la

⁸¹⁴ In [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], p. 146.

⁸¹⁵ Sur l'ensemble des ordinateurs en usage dans le monde en 1964, 30% environ avaient été produits par l'un ou l'autre des « sept nains ». Tout le reste l'avait été par I.B.M. La même année, les revenus nets de cette firme s'élevaient à 431 millions de dollars.

voie sur laquelle Thomas J. Watson Jr. et V. Learson avaient placé leur entreprise au début de l'année 1962 avait momentanément mise celle-ci en situation de grand péril, mais à présent cet engagement audacieux commençait enfin à porter ses fruits. Avec une ligne inédite d'ordinateurs et de périphériques impatiemment attendue par une très grande partie de son immense clientèle, I.B.M. paraissait plus que jamais progresser en terrain conquis. Qui plus est, cette position de force se trouvait encore consolidée par le fait que son nouvel outil de production autorisait dorénavant la puissante compagnie américaine à réaliser d'importantes économies d'échelle. Pour la concurrence, on le comprend, le challenge technologique et commercial à relever promettait d'être d'une difficulté extrême. D'un autre côté si aucune action décisive n'était entreprise, tout, à l'évidence, tendait à indiquer que la firme de Thomas J. Watson Jr. régnerait sur l'avenir de manière encore plus écrasante qu'elle ne l'avait fait sur le passé et le présent.

C'est au mois de décembre 1964 que la division informatique de la R.C.A. annonça qu'elle proposerait bientôt⁸¹⁶ sur le marché sa gamme Spectra 70, une famille d'ordinateurs comprenant à l'origine cinq machines dotées chacune d'une puissance de calcul différente. Ces cinq systèmes informatiques avaient entre autres choses ceci de particulier qu'ils étaient capables d'exécuter, sans qu'il soit besoin de les modifier auparavant, les programmes initialement conçus pour les ordinateurs auxquels ils correspondaient dans le *System/360*. En d'autres termes les machines de la gamme Spectra 70 étaient entièrement compatibles avec la série d'ordinateurs qui constituait alors le fleuron technologique d'I.B.M., et donc son fer de lance commercial pour les années à venir. Plus surprenant, les unités centrales de traitement de deux de ces cinq dispositifs, les modèles Spectra 70/45 et 70/55, étaient composées de *circuits intégrés* (bien entendu fabriqués par la R.C.A.). A tout ceci, il convient encore d'ajouter que selon les machines considérées - modèles 70/45 et 70/55 compris - les ordinateurs de la série Spectra devaient être vendus ou loués de 30% à 40% moins chers que leurs « homologues » I.B.M. Le fait que la R.C.A. n'ait pas eu à supporter des coûts de recherche et de développement monumentaux pour concevoir sa nouvelle série d'ordinateurs – I.B.M. le fit en grande partie pour elle puisque les machines de type Spectra n'étaient ni plus ni moins que des « clones » des ordinateurs du *System/360* – échoue à rendre pleinement compte de ce que l'on se contentera d'appeler pour l'instant un « petit miracle économique ». Ceci apparaîtra d'autant plus vrai si l'on se souvient maintenant qu'en 1961, le groupe de

⁸¹⁶ Les ordinateurs Spectra 70/15 et 70/25 sortirent en 1965 et furent suivis en 1966 par trois autres machines, les modèles 70/35, 70/45 et 70/55. La gamme s'étoffait encore en 1968, avec le Spectra 70/46, puis en 1970 (Spectra 70/60) et 1971 (Spectra 70/61).

travail I.B.M. présidé par l'ingénieur E. Bloch avait préconisé la mise à l'écart de la solution « *monolithics* » en raison de son coût et recommandé plutôt le développement de nouveaux circuits électroniques modulaires (technologie S.L.T.).

La question qu'il convient de se poser à présent est la suivante : comment expliquer qu'en 1964 un des « sept nains » ait annoncé que sous peu, il produirait en série des ordinateurs dotés de circuits intégrés alors qu'I.B.M., leader richissime et incontesté de l'industrie informatique à l'échelle mondiale, avait choisi de ne pas le faire trois ans auparavant et ce pour des motifs de rentabilité économique ? Certes on pourra toujours répondre à cette interrogation en affirmant que les économies colossales que la compagnie R.C.A. était parvenue à réaliser en *imitant* les différentes machines du *System/360* représentait un « trésor de guerre » confortable, et qu'en tant que producteur majeur de composants électroniques, il lui avait certainement été facile de réinvestir une partie de cet argent dans des ordinateurs à circuits intégrés pour essayer de prendre ici un ascendant technologique décisif sur « Blanche Neige ». On pourra encore affirmer qu'en fait de « nain », la *Radio Corporation of America*, tout comme du reste *General Electric*, était un consortium industriel dont la puissance financière était largement supérieure à celle pourtant colossale d'I.B.M. Au sein de cette immense entité composite qu'était la R.C.A., sa division informatique n'était peut-être pas la plus florissante de toutes – de fait c'était elle le « nain » - mais tout de même, elle était très loin de se trouver dépourvue de moyens... Ce serait toutefois une erreur que de se satisfaire de ces seuls éléments d'explication. En effet en août 1964 la société *Scientific Data Systems* – une firme fondée trois ans avant par Max Palevsky, un philosophe de formation – annonça qu'elle prévoyait elle aussi de mettre incessamment sur le marché un ordinateur à base de circuits intégrés (le *S.D.S. Model 92*). Or la société S.D.S., qui sera rachetée par la *Xerox Corporation* en 1969, n'était ni un géant de l'informatique, ni non plus un Léviathan industriel. Plus significatif encore, et bien que son ordinateur de type 910 ait rencontré un accueil plutôt favorable auprès des utilisateurs au début des années soixante, elle-même aurait aisément pu se voir qualifiée de « nain » dans l'hypothèse où l'on serait venu à la comparer aux sept concurrents « institutionnels » d'I.B.M. D'où il ressort que ce qui aurait pu passer pour un complet éclaircissement dans le cas de la *Radio Corporation of America* échoue à remplir cet office dans celui de la petite société informatique de M. Palevsky.

Afin de comprendre ce qui autorisa deux firmes financièrement beaucoup plus faibles qu'I.B.M. à se risquer là où, trois ans auparavant, celle-ci n'avait osé aller pour des raisons de productivité, il est à présent nécessaire de revenir rapidement sur les événements historiques et militaires importants qui affectèrent directement l'industrie des semi-conducteurs, et donc

celle de l'informatique, entre 1957 et 1965. Comme il s'agit d'un arrière-plan particulièrement riche et complexe et que, bien fâcheusement, nous ne sommes ni historiens, ni spécialistes de la conquête spatiale, on voudra bien nous excuser ici de n'en avoir retenu que quelques-unes des facettes, en l'occurrence celles dont nous avons estimé qu'elles étaient sûrement les plus pertinentes pour notre propos actuel.

2.3.3.2. Des satellites espions *Corona* au programme spatial *Apollo*.

La décennie 60, tout comme l'avaient été la deuxième moitié des années quarante et les années cinquante, fut marquée par la confrontation indirecte – mais toujours immensément préoccupante – des deux superpuissances atomiques de la planète, l'U.R.S.S. et les U.S.A. Le lancement réussi du satellite soviétique *Sputnik* le 4 octobre 1957 constitua assurément un des moments historiques les plus essentiels de cette période houleuse. Cet événement inédit, « cette surprise d'octobre » comme la baptisa la presse occidentale, prouva à la planète entière la préexcellence scientifique et technologique du bloc communiste en même temps qu'il déclencha une immense vague d'inquiétude aux U.S.A. Le « *Bomber Gap* », que l'on peut décrire comme cette peur de la supériorité aérienne stratégique soviétique qui naquît en Amérique du Nord après que des observateurs américains aient assisté en mai et juillet 1955 à une parade aérienne particulièrement impressionnante de bombardiers lourds Tupolev-90 *Bear* et Myasishchev-4 *Bison*⁸¹⁷, se doubla donc à partir de ce moment précis d'un très fort sentiment d'incertitude quant aux réelles capacités américaines en matière de missiles intercontinentaux et de fusées défensives. Cet écart qualitatif et quantitatif supposé entre les moyens aérospatiaux soviétiques et américains fut qualifié par ces derniers de « *Missile Gap* ».

Concernant la soi-disant supériorité numérique soviétique en matière de bombardiers, les évaluations les plus folles parvinrent rapidement au sommet du pouvoir américain (en mars 1955, les analystes de la *Central Intelligence Agency* (C.I.A.) avançaient le nombre de 1200 appareils stratégiques !). Cependant, à l'inverse de nombre de ses conseillers – et malgré les recommandations et réclamations pressantes de l'U.S. *Air Force* qui souhaitait voir ici son budget de fonctionnement augmenté afin de pouvoir construire plus de forteresses

⁸¹⁷ Comme on le sait aujourd'hui, cette parade aérienne fut un gigantesque coup de bluff : les quelques escadrilles présentées que virent les observateurs américains effectuaient d'incessantes rotations autour de la zone de présentation, donnant ainsi l'illusion que la flotte de bombardiers soviétiques à moyen et long rayon d'action était immense. Inutile de dire que cette manœuvre simple mais après tout fort ingénieuse porta largement ses fruits.

stratosphériques B-52 - l'ancien soldat qu'était D. D. Eisenhower ne céda pas à ce qu'il faut bien se résoudre à appeler la paranoïa ambiante. Plutôt que de s'efforcer en vain d'identifier ce qui dans ces estimations relevait ou non du domaine de la pure spéculation, ou bien encore d'accorder immédiatement de substantielles rallonges budgétaires à l'armée de l'air, le Président choisit de doter les Etats-Unis d'un moyen de renseignement aérien qui leur permettrait de savoir en toute discrétion et avec certitude ce qui se passait au-delà du « rideau de fer », selon la célèbre expression de Winston Churchill. Cette décision aboutit très rapidement à la mise en service effectif du désormais célèbre avion espion à long rayon d'action et haute altitude d'opération *Lockheed U-2*⁸¹⁸. Les soviétiques ayant refusé de ratifier l'initiative américaine « *Open Skies* » présentée par D. D. Eisenhower lors du sommet de Genève en juillet 1955 – dans ses grandes lignes celle-ci offrait aux soviétiques la possibilité de survoler « librement » le territoire des Etats-Unis pour mener à bien des missions de reconnaissance à condition que les américains soient autorisés à faire exactement la même chose en U.R.S.S. – le président des U.S.A. autorisa donc le survol, et par là même la violation de leur espace aérien, des nations du bloc communiste par des U-2. Entre le 20 juin et le 10 juillet 1956, les U-2 effectuèrent ainsi huit missions de renseignement au-delà le rideau de fer (selon les documents désormais accessibles, cinq furent effectuées au dessus de l'Union soviétique). Bien que ces opérations ultra confidentielles aient comporté des risques considérables, leur accomplissement fut rendu absolument nécessaire non seulement par le besoin de faire toute la lumière sur le « *Bomber Gap* », mais aussi par le fait que le 22 novembre 1955, les soviétiques expérimentèrent leur première bombe thermonucléaire à Semipalatinsk (Kazakhstan). Cette première série de vols de reconnaissance représenta sans conteste un succès majeur pour la C.I.A. Les photographies ramenées par les U-2 permirent en effet d'établir définitivement que le nombre de bombardiers stratégiques ennemis avait été très largement surestimé par les analystes américains (et pour cause !). Cependant le Président Eisenhower, alors, et par la suite, n'autorisa jamais ces opérations clandestines qu'à réel contrecoeur. Pour lui, il était clair que tôt ou tard les soviétiques parviendraient à mettre au point des contre-mesures capables de compromettre gravement une mission. En plus de l'énorme discrédit politique qu'un tel incident occasionnerait fatalement pour son pays, il était évident que l'interception ou la destruction d'un avion espion américain dans le ciel soviétique (ou celui d'un pays satellite), ne pourrait aboutir qu'au déclenchement immédiat

⁸¹⁸ Secrètement mis en œuvre par la C.I.A. (puis plus tard par l'U.S.A.F.), le *Lockheed U-2*, tout au moins ses premières versions, possédait un rayon d'action de 3000 miles nautiques et pouvait évoluer à une altitude maximale de 70000 pieds, une capacité qui certes le plaçait hors de portée de la chasse soviétique mais qui n'empêchait pas son suivi par les radars ennemis.

d'une crise diplomatique de tout premier ordre entre les U.S.A. et l'U.R.S.S. Tout n'était qu'affaire de temps et de chance (ou de malchance, c'est selon). D'un autre côté l'U-2 était le seul vecteur de renseignement sûr dont les Etats-Unis disposaient à l'époque pour procéder de manière efficace à une évaluation des forces antagonistes au sol. Même si le temps de ces appareils était compté en raison des risques énormes qu'impliquait leur mode opératoire, le gouvernement et les militaires américains ne pouvaient donc raisonnablement se résoudre à en faire l'économie. Le Dr. Albert D. Wheelon⁸¹⁹ a parfaitement résumé la situation dans laquelle se trouvaient à l'époque les autorités américaines en écrivant que :

« Les Etats-Unis avaient besoin d'énormément d'informations concernant presque toutes les régions de l'U.R.S.S. Le programme de missiles de l'Union soviétique était vigoureux et la présence de sites de lancement d'I.C.B.M. avait été rapportée en de nombreux endroits. Le système de défense anti-aérien [de l'ennemi] était vaste et les soviétiques développaient un système de missiles antibalistiques à même de contrer les fusées américaines à longue portée. Le programme nucléaire soviétique était [également] vigoureux et l'U.R.S.S. fit exploser une bombe à hydrogène opérationnelle avant les Etats-Unis. [De plus] un programme d'armes biologiques et chimiques extensif était en cours. Les services de renseignement américains ne pouvaient plus surveiller cette immense entreprise en ayant [seulement] recours à des agents au sol. Bien qu'il ait été important durant la deuxième guerre mondiale, le renseignement traditionnel ne permettait plus de suivre ces activités. Les prévisions initiales étaient que le programme U-2 de la C.I.A. ne pourrait opérer que pendant une année ou deux. En 1957, il en était à sa deuxième année de survols. Ces missions étaient nécessairement peu nombreuses et elles ne pouvaient surveiller que des zones restreintes [du territoire de l'U.R.S.S.]. Il apparaissait irréaliste de compter sur elles pour orienter la politique nationale en matière de missiles nucléaires⁸²⁰. ». Et A. D. Wheelon de clore cette brève récapitulation en assurant que *« Les satellites constituaient alors la seule solution⁸²¹. ».*

⁸¹⁹ Diplômé du M.I.T., physicien de formation, Albert D. Wheelon occupa le poste de *Deputy Director for Science and Technology* à la C.I.A. de 1962 à 1966 (année où il rejoignit la *Hughes Aircraft Company*). Dans ce cadre, on sait qu'il eut à s'occuper des vols d'U-2, du développement de l'avion espion SR - 71 *Blackbird*, ainsi que de celui des satellites de reconnaissance *Corona*.

⁸²⁰ Albert D. Wheelon, « *Corona: The First Reconnaissance Satellites*. Based on remarkable scientific and technical achievements, a series of 145 American spy satellites provided strategic information that helped stabilize East-West relations during the cold war. », in *Physics Today*, pp. 24-30, février 1997.

⁸²¹ *Ibidem*, p. 25.

De manière évidente, placer en orbite des satellites espions exigeait, outre des technologies optique et électronique particulièrement abouties, que l'on dispose de lanceurs spatiaux fiables pourvus d'une capacité d'emport suffisante. Or à la fin des années cinquante, c'était là deux paramètres essentiels que les américains ne maîtrisaient pas parfaitement. Tandis que les soviétiques accumulaient littéralement les premières et les réussites spatiales⁸²², qu'ils parvenaient à expédier dans l'espace des artefacts de plus en plus massifs en limitant leur taux d'échec, les américains, après avoir essuyé de nombreux revers avec diverses fusées (*Vanguard, Thor, Atlas*), parvenaient enfin à mettre en orbite Explorer 1 le 31 janvier 1958. Il doit cependant être précisé que ce satellite ne pesait que 14 kg alors que Spoutnik 3, lancé trois mois plus tard par l'U.R.S.S. affichait une masse de 1327 kg (dont 968 kg de charge utile scientifique). Cet exemple typique suffit à se forger une idée assez précise du retard que les U.S.A. pouvaient accuser à l'époque sur l'Union soviétique en matière de lanceurs spatiaux (et donc de missiles). Il permet aussi de commencer à comprendre pourquoi, dans la course à l'espace, les américains travaillèrent énormément à la *miniaturisation* de leurs matériels tandis que les soviétiques, eux, privilégièrent le gigantisme avec des lanceurs de plus en plus puissants et imposants. L'histoire de l'épopée spatiale, tout au moins celle que l'on présente ordinairement au grand public, se concentre en général sur les missions habitées et occulte (ou encore passe rapidement) sur celle des satellites artificiels. Pourtant, la fin des années cinquante et le tout début de la décennie soixante connurent un très notable accroissement du nombre de lancements de ces instruments de haute technologie. Ainsi entre le 31 janvier 1958 et le 25 août 1961, les américains n'expédièrent pas moins de 13 satellites scientifiques de classe Explorer dans l'espace (avec un taux de réussite allant grandissant lui aussi puisque deux d'entre eux seulement ne parvinrent pas à atteindre leur trajectoire orbitale). Pour ce qui concerne notre présent propos toutefois, l'aspect le plus important de cette affaire ne réside pas dans ce type de dispositifs mais doit plutôt être recherché dans sa contrepartie militaire. En 1958, c'est-à-dire trois ans après que l'U.R.S.S. ait rejeté la proposition américaine « *Open Skies* », James Killian et Edwin Land, tous deux conseillers scientifiques du Président

⁸²² Pesant 87 kilogrammes, Spoutnik 1, le premier satellite artificiel de l'histoire, est mis en orbite le 4 octobre 1953. Spoutnik 2 le suit le 3 novembre 1953 avec à son bord la chienne Laïka. L'engin pèse 508 Kg. Le 2 janvier 1959, la sonde Luna 1 (361 Kg.) passe à 6400 kilomètres de la lune. La petite sonde scientifique Luna 2 (390 Kg.) aluni quant à elle le 12 septembre 1959 dans une zone située à l'est de la Mer de la Sérénité (*sic*). Le 4 octobre 1959, Luna 3 (278, 5 Kg.) contourne la lune et prend 29 clichés de sa face cachée (17 d'entre elles seulement pourront être radio transmises avant la réentrée de la sonde dans l'atmosphère terrestre). Enfin, le coup le plus dur tombe le 12 avril 1961 quant la planète apprend que Youri Alekseyevich Gagarine, un ancien ingénieur fondeur devenu pilote de chasse dans l'Armée Rouge, a effectué un vol orbital de 1 h 29 mn et 6 s autour de la terre. Le module de descente sphérique Vostok à bord duquel il était pesait 2,6 tonnes. Il fut placé en orbite par un lanceur SL-3, une fusée dérivée du missile intercontinental SS-6 (*Sapwood* en nomenclature OTAN).

Eisenhower, préconisèrent vivement - et obtinrent en février 1958 - le démarrage d'un nouveau programme de surveillance satellitaire. Opéré sous le couvert d'un programme scientifique baptisé *Discoverer*, réalisé par la *Space Systems Division* de *Lockheed Martin Missiles & Space*, ce projet ultrasecret reçu pour nom de code *Corona* et fut placé sous l'égide du *National Reconnaissance Office*, organisme « fantôme » dépendant conjointement de la C.I.A. et de l'*Air Force*. Moins ambitieux, techniquement, que son « rival » S.A.M.O.S.⁸²³ - il s'agissait au départ de concevoir une série de satellites espions simplifiés en attendant que ce dernier devienne opérationnel – les satellites du programme *Corona* (ou satellites KH pour *Keyhole*, comme on les appellera à partir de 1964), formèrent la colonne vertébrale du renseignement spatial américain douze années durant (d'août 1960 à mai 1972). Jusqu'en février 1995, date à laquelle l'administration Clinton décida d'en dévoiler certains aspects confidentiels, il fut aussi l'un des secrets les mieux gardés des Etats-Unis. Si, comme on le sait aujourd'hui, les douze premières missions *Corona* se soldèrent par des échecs et que la treizième se limita en fait à un test à vide (le satellite envoyé à cette occasion était dépourvu d'instrumentation embarquée), la quatorzième, elle, fut un succès complet. Non content de marquer les véritables débuts de la surveillance militaire spatiale par moyens photographiques, la mission *Corona* 14 fut aussi le théâtre de la toute première opération aérienne de récupération de véhicule extra atmosphérique (le « *Becket* », c'est-à-dire la capsule qui contenait les films photographiques fut récupérée en vol par un avion militaire *Fairchild C-119* spécialement équipé pour remplir cette fonction). Hormis le fait qu'à l'époque cela représentait en soi une prouesse technologique remarquable, la réussite de cette quatorzième mission revêtit d'emblée une importance politico-militaire extrême pour le gouvernement américain. En effet, elle survint un mois et demi seulement après qu'un missile SAM-2 ait abattu l'U-2 de Francis G. Powers, lequel se trouvait en mission de reconnaissance profonde au dessus du territoire de l'Union soviétique⁸²⁴. La réalisation de la vieille crainte d'Eisenhower, le 1^{er} mai 1960, eut bien entendu pour conséquence immédiate l'arrêt définitif

⁸²³ Le programme de système satellitaire S.A.M.O.S. (*Satellite And Missile Observation System* ou encore *Weapons System 117L*) fut proposé par la *Rand Corporation* en 1954. A l'origine ses spécifications correspondaient aux besoins du *Strategic Air Command* et de l'*Air Force*. D'importantes difficultés techniques auxquelles vinrent également s'ajouter des insuffisances budgétaires répétées, entravèrent toutefois son développement au point que le gouvernement américain prit la décision de l'abandonner définitivement à la fin de l'année 1962. Au moment où le programme S.A.M.O.S. fut lancé, les U.S.A. ne possédaient aucune espèce d'expérience dans le domaine des satellites.

⁸²⁴ Ainsi qu'en a témoigné son fils, Francis G. Powers, Jr., dans « The U-2 Incident : A Personal Overview » (conférence prononcée le 24 juin 1998 devant l'*Alpha Literary And Philosophical Society*, à l'Hôtel de Ville de Fairfax, U.S.A.), Francis G. Powers décolla de Peshawar (Pakistan) le 1^{er} mai 1960 avec pour mission de traverser l'U.R.S.S. dans toute sa largeur ! Les renseignements que le pilote de la C.I.A. devait collecter à cette l'occasion concernaient les sites de lancement de missiles, les installations défensives, les aéroports, les sites de stockage de munitions, les lignes ferroviaires, et les installations de production atomique soviétiques.

des missions aériennes américaines au dessus de l'U.R.S.S. (comme en témoigne le rôle déterminant qu'il joua par la suite dans la crise des missiles de Cuba, les U.S.A. ne renoncèrent pas pour autant à l'emploi de cet appareil). Toutefois, grâce à l'entrée en service « opportune » des satellites *Corona* au mois de juin suivant, la C.I.A. et l'armée de l'air ne restèrent pas très longtemps privées de l'usage de ces « yeux célestes » qui, jusqu'à l'incident de mai 1960, les avaient autorisées à surveiller si efficacement les activités militaro-industrielles de leurs principaux adversaires. De plus, puisque ces nouveaux instruments étaient destinés à opérer automatiquement en orbite terrestre basse et qu'ils « voyaient » aussi bien, si ce n'est mieux, que leurs prédécesseurs, il n'était plus du tout nécessaire de violer l'espace aérien d'une nation pour collecter des informations sensibles à son sujet. Réduisant à néant toute possibilité d'interception du système espion par l'adversaire, cette triple spécificité – positionnement orbital, automatisation complète des processus exécutés et grande qualité des prises de vue - diminuait donc d'autant les risques politiques et militaires liés à son utilisation. Il va de soi qu'à l'époque détenir un outil de renseignement pareillement sophistiqué signifiait posséder un avantage stratégique considérable sur l'ennemi, particulièrement pour une puissance nucléaire qui venait d'être prise, comme on dit, en « flagrant délit » d'espionnage dans les cieux de son adversaire le plus dangereux...

Sur le plan technologique, puisque c'est ce qui nous intéresse ici au premier chef, les concepteurs des satellites *Corona* et ceux de leurs lanceurs *Thor-Agena* firent très largement appel à des composants électroniques solides pour fabriquer nombre des sous-systèmes vitaux de ces engins. Ainsi en allait-il spécialement des instruments de guidage et de contrôle (systèmes inertiels, capteurs de vitesse, senseurs infrarouges, etc.), et des multiples dispositifs de communication (système de télémétrie, de suivi par radar, récepteur de commandes, programmeur de séquence orbitale ajustable depuis le sol, etc.) installés dans l'étage orbital *Agena*. Inutile de préciser que ces composants électroniques miniaturisés, compte tenu des immenses contraintes mécaniques qu'ils étaient appelés à endurer et de l'environnement fortement bruité dans lequel ils devaient fonctionner, avaient besoin d'être singulièrement fiables... Depuis que les informations afférentes au système satellitaire *Corona* ont fait l'objet d'une procédure officielle de déclassification, de nombreux auteurs se sont employés à souligner le rôle prépondérant, pour ne pas dire essentiel, que ce dernier a joué au cours de la guerre froide dans la prise de décisions politiques et l'orientation stratégique des Etats-Unis. Albert D. Wheelon, que nous avons précédemment cité, a par exemple comparé la nature décisive des photographies fournies par ces satellites aux informations cruciales qu'avait permis d'obtenir le décryptage (électromécanique) des codes

secrets allemands pendant la deuxième guerre mondiale. Dans son ouvrage *America's Secret Eyes in Space: The U.S. Keyhole Satellite Program*, l'analyste Jeffrey T. Richelson a quant à lui décrit la reconnaissance spatiale comme étant :

« ...l'un des développements technologiques militaires les plus significatifs de ce siècle, et peut-être même de l'histoire. En fait, poursuit Richelson, son impact sur les affaires internationales d'après-guerre doit probablement être situé juste derrière celui de la bombe atomique. Le satellite de photo surveillance, en faisant se dissiper les peurs liées à l'état réel de l'arsenal de destruction de l'autre, en permettant de dire si oui ou non une action militaire était imminente, a joué un rôle stabilisateur énorme dans les relations entre les deux superpuissances⁸²⁵. ».

De fait, et ce n'est là qu'un exemple parmi bien d'autres tout aussi dignes d'être produits, six mois seulement avant la mise en orbite réussie du premier *Corona*, les experts de la C.I.A. estimaient à 200 le nombre de missiles balistiques intercontinentaux qui seraient déployés en Union soviétique à la fin de 1961. En plus de recueillir plus de photographies qu'il n'en avait été collecté au total au cours de l'ensemble des missions de surveillance effectuées par les U-2, ce satellite permit de réduire cette prévision à 25 unités « seulement ». On peut donc dire que les *Corona* furent au « *Missile Gap* » ce que les U-2 avaient été quelques années auparavant au « *Bomber Gap* ». De la même façon que la disponibilité de ce nouvel outil de surveillance devait modifier en profondeur les relations entre les deux superpuissances nucléaires au début de la décennie soixante, les technologies avancées sur lesquelles il reposait eurent une influence déterminante sur de multiples secteurs de l'industrie humaine, à commencer bien entendu par ceux, fondamentaux, de la conquête spatiale et de l'informatique. Une des conséquences immédiates du programme *Corona* en matière d'informatique appliquée au traitement de données, et en particulier au traitement de données relevant du domaine de la sécurité nationale, fut le renforcement, à Washington, des capacités opérationnelles du *National Photointerpretation Center*. En effet la quantité d'images devant désormais être analysée était si considérable – et les temps de réaction en cas de problème si brefs - que l'on dû rapidement concevoir des machines spéciales, couplées à des ordinateurs

⁸²⁵ In Jeffrey T. Richelson, *America's Secret Eyes in Space: The U.S. Keyhole Satellite Program*, Ballinger Pub Co, Cambridge, Mass., U.S.A., Avril 1990, p. 265.

programmés en conséquence, capables de faire de la reconnaissance automatique de formes⁸²⁶ pour alléger et accélérer la tâche des photo-interpréteurs.

Pour les américains le programme de satellites espions *Corona* fut surtout l'occasion – « forcée » mais idéale puisque stratégiquement obligée – d'éprouver des technologies de pointe dans des conditions d'utilisation extrêmes. S'il permit la réalisation de perfectionnements techniques remarquables, notamment en ce qui concerne la durée de vie des composants électroniques des équipements embarqués et l'automatisation du fonctionnement de ces derniers, ce projet spatial de grande envergure déclencha aussi une prise de conscience double chez tous ceux qui, à un titre ou à un autre, en étaient concepteurs, commanditaires et utilisateurs. Premièrement, au contraire de ce que tous les indices, témoignages et rapports avaient pu laisser entendre jusque-là, la capacité de frappe stratégique de l'Union soviétique n'avait pas l'importance que la plupart des spécialistes américains, il est vrai malgré eux, se plaisaient alors à lui accorder (ou à lui prédire sur la base de données souvent inexactes). Comme cela se produit de temps à autre lorsqu'il sait maintenir le secret absolu et mettre savamment à profit l'art des leurres et de la dissimulation, la force de l'adversaire, bien que considérable, avait donc été mal appréciée – pour tout dire surestimée – par les experts de l'autre camp. Deuxièmement, la mise en orbite réussie des premiers satellites *Corona*, et les résultats décisifs que ceux-ci permirent d'obtenir de façon quasi immédiate dans le domaine du renseignement militaire, contribuèrent grandement à restaurer une confiance dans leurs technologies de pointe que les américains, voyant les soviétiques accumuler les réussites là où eux ne cessaient d'enregistrer les déconvenues partielles ou complètes, avaient vu quelque peu s'éteindre depuis le lancement du premier Spoutnik. Le système satellitaire *Corona*, en plus d'autoriser les américains à prendre la mesure véritable de leur puissance militaire en dévoilant celle de leur principal adversaire, représenta un tournant crucial dans la façon dont ceux-ci envisageaient la course à l'espace à la fin des années cinquante. Les progrès réalisés dans le cadre de ce programme (que l'on pense à la télémétrie, à la miniaturisation et l'isolation électronique des instruments ou à leur automatisation), prouvèrent de manière on ne peut plus éclatante que les U.S.A. pouvaient dorénavant concevoir des lanceurs spatiaux pourvus d'équipements fort sophistiqués alliant fiabilité et parfaite autonomie fonctionnelle. Qui plus est, les dimensions de ces fusées n'avaient pas à être gigantesques. En fonction du profil des missions, la miniaturisation des systèmes électroniques – synonyme de réduction de masse et de volume - rendait possible

⁸²⁶ Ces formes pouvaient par exemple correspondre à des silhouettes de silos à missiles, d'usines, de bombardiers lourds, etc.

l'emploi d'étages de missiles intercontinentaux tels que ceux déjà développés par l'*Air Force* ou l'*Army*. Après moult déconvenues, l'horizon paraissait enfin se dégager pour les U.S.A.

Même si les Etats-Unis eurent à patienter jusqu'au 20 février 1962 pour voir enfin un de leurs ressortissants, en l'occurrence John Glenn⁸²⁷, égaler l'exploit du cosmonaute Youri Gagarine, c'est bien l'ensemble des éléments que nous venons d'évoquer que le Président John F. Kennedy, sans jamais mentionner le projet *Corona* cela va de soi, mit en avant le 25 mai 1961 lorsqu'il délivra son fameux « *Message spécial au Congrès sur les besoins urgents de la Nation* ». Ainsi quant six semaines seulement après le vol de Youri Gagarine (et un mois après le fiasco de la Baie des Cochons), le jeune Président démocrate lança officiellement les Etats-Unis dans une des plus grandes aventures humaines qui aient jamais été imaginées en déclarant qu'il croyait « *que cette nation devrait s'engager à réaliser, avant la fin de cette décennie, l'objectif de faire atterrir un homme sur la Lune et de le ramener sur Terre sain et sauf.* »⁸²⁸, il le fit non sans avoir affirmé auparavant « [que les Etats-Unis possédaient] *toutes les ressources et les talents nécessaires [pour cela]* »⁸²⁹. Le programme *Apollo* fut on le sait un pari outrageusement ambitieux qui, en plus de mobiliser 400000 personnes et de coûter 26 milliards de dollars de l'époque (100 milliards d'euros), se trouva d'emblée placé sous le coup d'une échéance indépassable car éminemment symbolique et politique. Après tout il ne s'agissait ni plus ni moins que de battre les soviétiques sur un terrain où, depuis octobre 1957, ils avaient largement fait la preuve de leur excellence, pour ne pas dire de leur dangerosité. Au moment précis où J. F. Kennedy prononça son discours historique devant les représentants du Congrès américain, nous étions à la fin du mois de mai 1961. En d'autres termes, il ne restait à l'infortuné Président que huit ans et sept mois pour voir la promesse par laquelle il avait solennellement engagé son pays et sa personne se réaliser. Autant dire, et ce n'est pas ici un vain mot, que *tout* fut dès lors mis en œuvre pour que les choses aillent dans le sens d'une totale domination américaine dans l'espace.

Si les capsules du programme *Apollo* ne furent pas les premiers véhicules spatiaux habitables à être équipés d'un « ordinateur » de bord – le *Gemini Guidance Computer*, construit pour la N.A.S.A. par le *Space Guidance Center* d'I.B.M. devança de quelques années les *Apollo Guidance Computer Block I* et *II* conçus par le M.I.T. *Instrumentation*

⁸²⁷ Certes le 5 mai 1961, Alan Shepard tourna autour de la terre pendant 15 minutes à bord d'une capsule *Mercury*, mais il s'agissait d'un vol suborbital (185 km d'altitude).

⁸²⁸ Président John F. Kennedy, « *Special Message to the Congress on Urgent National Needs* », Section 9 (IX. *Space*), 25 mai 1961. Le texte de ce discours peut être consulté dans son intégralité sur le site web du *John F. Kennedy Library and Museum* (<http://www.jfklibrary.org/j052561.html>).

⁸²⁹ *Ibidem*.

Laboratory et l'*Information Systems Division* de la *Raytheon Manufacturing Company*⁸³⁰ – ce dernier, de par son ampleur, sa durée, et son immense complexité, mobilisa des ressources informatiques considérables. De façon assez naturelle, il se peut que l'on songe ici aux *mainframes*, c'est-à-dire aux gros ordinateurs, qui constituaient le *Real-Time Computer Complex* (R.T.C.C.) du *Manned Spacecraft Center*⁸³¹ de Houston ou bien encore aux rangées de terminaux informatiques qui peuplaient la *Mission Operations Control Room* (M.O.C.R.) de ce même centre spatial. Il s'agit en effet d'images célèbres, aussi impressionnantes qu'elles peuvent être persistantes, et si elles sont loin de rendre compte du nombre exact d'ordinateurs que la N.A.S.A. employa à cette époque pour ses programmes spatiaux habités – après tout les machines du R.T.C.C. et de la M.O.C.R. n'étaient que la partie la plus « visible » d'un iceberg monumental – le sentiment de froideur et de puissance machinique qui s'en dégageait empreignit durablement les esprits.

Les machines du *Real-Time Computer Complex*, sorte de « cerveau » du centre de contrôle de la base astronautique de Houston, servaient à collecter, à traiter, à évaluer, puis à renvoyer à la M.O.C.R. les informations nécessaires pour conduire chaque séquence de vol des missions *Gemini* ou *Apollo*. Travaillant en temps réel – nous examinerons cette notion par après - sur la base d'informations auparavant transmises par le vaisseau, le R.T.C.C. calculait ce que ce dernier était en train de faire et comparait ce schéma de données à celui, précalculé (simulé), correspondant à ce qu'il était prévu qu'il fasse à ce moment précis. Lors de son entrée en service, en 1965, la configuration matérielle du *Real-Time Computer Complex* était la suivante : cinq ordinateurs I.B.M. 7094-II interconnectés, cinq unités de stockage à tores de ferrite I.B.M. 2361⁸³², deux I.B.M. 1460 *Data Center* ainsi que deux *Sperry Rand Univac 490* chargés d'assurer les communications avec l'extérieur. Le décès accidentel des astronautes Gus Grissom, Ed White et Roger Chaffee dans l'incendie (au sol) de leur capsule *Apollo 1*, le 27 janvier 1967, contraignit la N.A.S.A. à suspendre son programme lunaire pendant 21 mois. En plus de procéder à une sécurisation complète des réseaux électriques équipant son vaisseau, l'agence spatiale américaine mit à profit cette interruption forcée pour renouveler les

⁸³⁰ Le contrat pour le *Gemini Guidance Computer* (G.D.C.), d'un montant de 26,6 millions de dollars, fut conclu entre I.B.M. et la N.A.S.A. le 19 avril 1962. Le premier prototype du G.D.C. entra en phase finale de test le 31 août 1963 et vola pour la première fois à bord d'une capsule *Gemini* le 19 janvier 1965. Au mois de décembre de la même année, 20 ordinateurs de ce type avaient été livrés à l'agence spatiale américaine. Dotés d'une mémoire en tores de ferrite comprenant 4096 adresses (de 39 bits chacune), ces dispositifs fabriqués par I.B.M. étaient architecturés autour de circuits en *Solid Logic Technology*. Les *Apollo Guidance Computer Block I* et II (A.G.D.) – on les rencontre parfois aussi sous le nom d'*Apollo Digital Computer* - furent quant à eux fabriqués par *Raytheon* avec des *circuits intégrés* conçus par *Fairchild Semiconductors* mais produits par *Philco*.

⁸³¹ En 1973, le *Manned Spacecraft Center* fut rebaptisé *Johnson Space Center*.

⁸³² L'unité 2361 fut la plus grosse mémoire à tores de ferrite jamais construite par I.B.M. Constituée de 20 millions de tores, elle était capable de stocker 2,6 mégabytes de données.

matériels du *Real-Time Computer Complex*. Aux cinq I.B.M. 7094-II (successeurs transistorisés de l'I.B.M. 7090), succédèrent donc des I.B.M. *System/360 Model 75J* construits en S.L.T. (avec tous leurs périphériques). Les Univac 490, eux, furent remplacés par des modèles plus récents du même fabricant (Univac 494).

Avec son R.T.C.C. et les ordinateurs de la salle de contrôle des opérations (*Mission Operations Computers*), le *Manned Spacecraft Center* de Houston était certainement un des centres informatiques les plus importants – et aussi les plus coûteux - de la planète. Et encore n'était-ce là qu'une des nombreuses installations de ce genre que la N.A.S.A. possédait à travers le pays. A notre sens cet exemple illustre parfaitement les énormes besoins en ressources informatiques qui furent ceux de l'agence spatiale américaine au cours des années soixante. Pourtant, aussi représentatif qu'il puisse être, celui-ci échoue à démontrer exactement en quoi le programme *Apollo*, ou plutôt certains des choix technologiques qui furent effectués dans son cadre, se révélèrent décisifs pour le devenir de l'industrie informatique dans son ensemble. Certes, à l'époque, les I.B.M. 7094, pour ne considérer que ces seuls systèmes, coûtaient plus de trois millions de dollars l'unité et le *Real-Time Computer Complex* de Houston en totalisait déjà cinq. Mais la N.A.S.A., bien évidemment, n'était pas le seul organisme à disposer de machines de cette catégorie. La plupart des grands centres de calcul, qu'ils soient militaires ou civils (universitaires), en possédaient également. En outre les industriels et les grandes compagnies commerciales (on citera notamment les assurances et les transporteurs aériens), n'hésitaient plus à s'équiper en ordinateurs puissants pour faciliter et accélérer leur travail. Le parc informatique de la N.A.S.A. avait beau être imposant et moderne, particulièrement pour tout ce qui concernait le programme *Apollo*, il serait donc exagéré de prétendre que cette organisation, de par l'importante « consommation » d'ordinateurs qu'elle fit au cours la décennie soixante, concourut « plus » que *l'Air Force*, *l'Army*, le *National Bureau of Standards*, *l'Atomic Energy Commission*, *l'A.R.P.A.* ou encore les grands centres de recherche américains à la profonde transformation que ce secteur de pointe commença à subir à partir de 1964-65.

Si contribution, ou plutôt impact essentiel, il y eut ici concernant l'industrie informatique, celui-ci doit en réalité être recherché du côté du *Gemini Guidance Computer* (G.G.C.) et de *l'Apollo Guidance Computer* (A.G.C.) – les ordinateurs de bord qui équipaient respectivement ces deux familles d'engins spatiaux habités - et non du côté des grands ordinateurs (*mainframes*). Bien que relativement rudimentaires sur le plan fonctionnel, ces systèmes dont nous avons brièvement fait mention un peu plus haut possédaient en commun plusieurs caractéristiques absolument remarquables. Fait déjà notable, le G.G.C. et l'A.G.C.

initiaient tous deux la lignée des *spaceborne computers*, c'est-à-dire celle des ordinateurs spatiaux embarqués (sur vols habités). Surtout, à un moment où cette sorte de dispositifs électroniques coûtait excessivement cher, leurs processeurs furent élaborés en recourant à des circuits « monolithiques » constitués de silicium. L'impératif draconien de limiter la masse, le volume et la consommation de ces ordinateurs⁸³³ mais aussi la nécessité de faire en sorte que leur fiabilité soit et demeure très élevée - toutes contraintes évidemment liées aux spécificités de l'habitacle ainsi qu'à l'hostilité de l'environnement dans lesquels la N.A.S.A. entendait les déployer - présidèrent à l'élection de cette technologie alors récente et peu éprouvée (*a fortiori* dans le secteur astronautique). La N.A.S.A. ayant décidé en avril 1962 de confier le développement du *Gemini Guidance Computer* à I.B.M., cet ordinateur capable d'effectuer 7000 opérations élémentaires par seconde fut donc construit en *Solid Logic Technology*, les modules électroniques compacts sur lesquels l'industriel devait par ailleurs s'appuyer pour réaliser ses différentes machines du *System/360*. Compte tenu de ce dernier point, et même s'il reste fort intéressant à bien des égards, la considération du petit ordinateur qui équipait les capsules *Gemini* ne nous est guère utile ici. En revanche, il en va tout autrement de celle de l'*Apollo Guidance Computer*. L'étude de faisabilité, puis le développement de cet ordinateur, furent confiés en août 1961 à l'*Instrumentation Laboratory* du M.I.T., un laboratoire qui possédait déjà une solide expérience en matière de systèmes digitaux de contrôle puisque la *Navy* l'avait chargé quelques années auparavant de la réalisation de celui du S.L.B.M. *Polaris* (un missile balistique nucléaire à moyenne portée pouvant être mis en œuvre à partir d'un sous-marin). L'A.G.C., il convient ici de bien insister sur ce point, n'était pas n'importe quel ordinateur. Il s'agissait d'un instrument informatique pourvu d'une plateforme inertielle intégrée et de deux communicateurs à clavier⁸³⁴, qui, interfacé à une multitude d'autres systèmes vitaux, avait pour fonction principale le contrôle des différents modules constituant le véhicule spatial *Apollo*⁸³⁵. Cet engin, comme nous le savons, était chargé de placer trois astronautes en orbite autour de notre satellite naturel puis, une fois cette procédure délicate accomplie, il devait déposer deux d'entre eux à sa surface (avant de les récupérer et de les ramener sur Terre bien entendu). Compte tenu du caractère absolument exceptionnel de cette entreprise, de tous les enjeux symboliques, politiques, militaires et technologiques dont elle

⁸³³ Ainsi le *Gemini Guidance Computer* ne pesait-il que 26,75 kilogrammes et pouvait être logé dans un réceptacle de 48 cm de hauteur, 37 cm de largeur et 32,5 cm de profondeur. Quant à l'*Apollo Guidance Computer*, il occupait un volume de 0,3 mètre cube, pesait 31,75 kg et consommait 55 watts.

⁸³⁴ Désignée par l'acronyme D.S.K.Y. - pour *Display Keyboard* - cette interface électronique permettait aux astronautes de communiquer avec l'A.G.C. en tapant de brefs messages obéissant à une syntaxe du type « nom/verbe ». Chaque A.G.C. était relié à deux D.S.K.Y.

⁸³⁵ Les vaisseaux *Apollo*, pour simplifier, étaient composés d'un module de commande (*Command Module* ou C.M.), d'un module de service (*Service Module* ou S.M.), et d'un module lunaire (*Lunar Module* ou L.M.)

était porteuse, le gouvernement américain de l'époque fit tout ce qui était en son pouvoir pour qu'elle soit couronnée de succès. De cette réussite dépendait l'orgueil d'une nation, certes, mais aussi et surtout la reconquête, face à une U.R.S.S. triomphante, de la suprématie politique et technologique des Etats-Unis. Comme tout le reste, le choix des composants électroniques de l'*Apollo Guidance Computer* s'opéra en fonction de cet objectif prioritaire ; autant dire qu'ici aussi l'argent ne constitua jamais un obstacle majeur.

Dans son *History of Modern Computing*, Paul E. Ceruzzi nous apprend que le M.I.T. *Instrumentation Laboratory* (I.L.) se porta acquéreur de circuits intégrés auprès de la société *Texas Instruments* dès 1959⁸³⁶. Après les centres militaires de recherche, ce laboratoire habitué à collaborer avec l'armée fut donc une des premières organisations scientifiques américaines à entrer en possession du dispositif révolutionnaire qu'indépendamment, Jack S. Kilby et Robert N. Noyce avaient mis au point. Au mois d'août 1961, après que la N.A.S.A ait attribué à l'I.L. la charge de développer l'ordinateur de bord des vaisseaux *Apollo*, Eldon C. Hall, designer en chef du projet, entama une série de négociations « commerciales » avec *Texas Instruments* et *Fairchild Semiconductor*. Fondamentalement il s'agissait de savoir si l'I.L. recourrait, ou non, aux circuits intégrés pour concevoir l'A.G.C. Les facteurs qui plaidaient ici en faveur de l'utilisation de ces derniers étaient bien sûr leur légèreté, leur compacité, leur solidité et leur faible consommation électrique. En leur défaveur, maintenant, jouaient principalement leur coût à l'unité – environ mille dollars – et le manque presque total d'informations quant à la capacité réelle des industriels concernés à les fabriquer à la fois en grande quantité et d'une façon garantissant un taux de fiabilité très élevé. Finalement, indique encore P. E. Ceruzzi, Eldon C. Hall prit la décision de construire l'unité arithmétique et logique de l'A.G.C. avec les circuits intégrés planaires que Robert N. Noyce avait mis au point chez *Fairchild Semiconductor*⁸³⁷. Il proposa également de confier la production de ces puces à cette firme ainsi qu'à deux autres entreprises, *Texas Instruments* et *Philco-Ford* (la N.A.S.A. approuva cette solution au mois de novembre 1962). Dans un travail qu'il a consacré aux ordinateurs « spatiaux » de l'agence américaine - *Computers in Spaceflight, The NASA Experience* - le Dr. James E. Tomayko a apporté des précisions essentielles quant au type et au nombre de circuits intégrés qu'exigeait la fabrication de l'A.G.C. (c'est à l'industriel *Raytheon* que revint le montage des systèmes). Tout d'abord, les sous-éléments de ces circuits planaires étaient des portes NOR consistant en un assemblage de trois transistors

⁸³⁶ In [Ceruzzi, 1998], p. 188.

⁸³⁷ Pour expliquer (au moins en partie) ce choix, P. E. Cerruzi rappelle que R. N. Noyce, lui-même diplômé du *Massachusetts Institute of Technology*, avait reçu à plusieurs reprises des délégués de cette prestigieuse institution en 1961-62.

et quatre resistors (ces portes étaient fabriquées en *direct-coupled transistor logic* ou D.C.T.L.). Surtout, et c'est ce qui revêt ici une importance cruciale pour la suite de notre analyse, James E. Tomayko nous apprend que ce ne sont pas moins de *cinq mille* circuits de ce genre qui étaient nécessaires pour construire *un* exemplaire de l'*Apollo Guidance Computer*⁸³⁸. Compte tenu du fait qu'au total la *Raytheon Corporation* réalisa soixante-quinze ordinateurs A.G.C. pour le compte de la N.A.S.A, un rapide calcul suffit à montrer que les systèmes informatiques de bord des capsules *Apollo* réclamèrent à eux seuls la conception de 375000 circuits intégrés (cette rapide évaluation ne prenant en considération ni les pièces identifiées comme défectueuses par les fabricants, ni les pièces rejetées par le récipiendaire, etc.).

Pareille production, on s'en doute, dû faire l'objet d'un étalement sur plusieurs années. Il convient alors de rappeler qu'au moment où elle fut lancée, le circuit intégré planaire était vieux d'à peine trois ans. Il s'agissait par conséquent d'un dispositif original dont très peu d'industriels – il en existait au moins trois, ceux sélectionnés par l'*Instrumentation Lab.* – maîtrisaient complètement le difficile processus de confection. Le fait d'avoir à produire ici en masse obligea en outre ces rares fabricants à s'équiper en équipements de production lourds. Au début, et en raison même de cela, le coût unitaire du circuit intégré demeura extrêmement élevé (celui-ci avoisinait encore le millier de dollars). Assez vite toutefois, il enregistra une spectaculaire diminution. Ainsi entre 1962, année où démarra vraiment le projet A.G.C., et 1965, année qui vit *Raytheon* livrer à la N.A.S.A. les premières unités opérationnelles de l'*Apollo Guidance Computer*, ce prix chuta considérablement pour se stabiliser enfin dans une fourchette comprise entre *vingt-cinq et trente dollars* la pièce ! Il nous faut encore ajouter ici que la *presque totalité* des circuits intégrés planaires produits aux Etats-Unis pendant ce même intervalle de temps fut absorbée par le programme *Apollo*. Elaboré dès l'origine pour tirer pleinement parti des avantages multiples offerts par l'invention de Robert N. Noyce, l'*Apollo Guidance Computer* constitua ainsi une opportunité économique exceptionnelle pour les quelques firmes pionnières du circuit intégré. Assurées de la solidité financière de leur client et de la durabilité des liens par lesquels elles et lui se trouvaient réciproquement engagés, celles-ci fabriquèrent en deux ou trois années à peine une quantité très importante de ces dispositifs. En même temps que de représenter pour ce nouvel objet technique un des meilleurs cautionnements institutionnel et industriel qui puisse se concevoir, ce vaste effort productif entrepris au nom de la N.A.S.A. et de son projet

⁸³⁸ In [Tomayko, 1998], chapitre 2.

d'envoyer des hommes sur la lune ne manqua donc pas d'entraîner une baisse très substantielle de son prix de vente. Dès lors, *Fairchild Semiconductor*, *Texas Instruments* et quelques autres sociétés américaines (entre autres *General Electric*, *Transitron* et *Amelco*) se trouvèrent en mesure de le proposer sur le marché « civil » à un prix réellement abordable. Le fait que le circuit intégré planaire ait été employé ici afin de fabriquer un ordinateur embarqué dont la fonction consistait pour l'essentiel à seconder les astronautes durant les phases d'opération les plus critiques de leur mission lunaire fit clairement et définitivement la preuve de ses diverses qualités matérielles, de sa robustesse, de sa fiabilité, bref, pour l'exprimer de façon plus générale, de son excellence technologique. De toute évidence, si cette nouvelle sorte de composant avait été sélectionnée et produite en quantité pour une application aussi exigeante et aussi peu tolérante à l'erreur ou à la panne que l'était celle-là, elle ne pouvait alors que parfaitement convenir à des instruments informatiques plus ordinaires. Avant les années 1964-65, le coût prohibitif du circuit intégré, tout de même que les incertitudes liées à ses performances et à son comportement dans le long terme, avaient représenté autant d'obstacles de taille à son utilisation courante dans le secteur de l'industrie informatique. En créant de toutes pièces un marché exceptionnellement important et lucratif pour les rares sociétés qui étaient capables de le fabriquer à cette époque, le programme spatial *Apollo* – une des entreprises scientifiques les plus ambitieuses et les plus richement dotées de l'histoire moderne - renversa ainsi complètement cette situation.

Les éléments d'explication que nous venons de présenter permettent, en grande partie, de rendre compte du fait que des sociétés telles que la R.C.A. et la *Scientific Data Systems* se soient trouvées en position d'offrir des ordinateurs à circuits intégrés sur le marché américain dès 1965 alors que le leader incontesté du domaine, I.B.M., avait écarté cette solution technique un peu plus de trois ans auparavant pour motif qu'elle aurait été beaucoup trop coûteuse à mettre en œuvre sur une grande échelle. Nous avons écrit « en grande partie » car, pour être parfaitement exact, le programme spatial *Apollo* ne fut pas ici l'unique responsable de la chute du prix du circuit intégré. Un autre projet de grande envergure, mais militaire celui-là, doit à présent être évoqué afin que nous puissions comprendre ce phénomène dans son intégralité.

2.3.3.3. Les missiles balistiques intercontinentaux *Minuteman I* et II.

La question du « *Missile Gap* », dont nous avons déjà fait mention plus haut, reçut un éclairage particulièrement alarmiste dans les conclusions du rapport que le *Gaither Committee*, suite au lancement du premier *Sputnik*, remit au Président Dwight D. Eisenhower à la fin de l'année 1957. Dans ce document classé top secret rédigé par un panel d'experts scientifiques et militaires, étaient en particulier soulignées l'inadéquation des mesures de défense prévues pour protéger la population civile ainsi que l'extrême vulnérabilité des forces nucléaires stratégiques du pays (*Strategic Air Command*) en cas d'attaque aérienne surprise. Ce constat très inquiétant, réalisé quelques mois seulement après que les soviétiques aient démontré de façon éclatante la puissance et la fiabilité de leur lanceur *Semiorka R-7*, correspondit toutefois au moment où l'U.S. *Air Force*, via sa *Ballistic Missile Division* (A.F.B.M.D.), débuta avec la collaboration de l'avionneur *Boeing* le développement d'un tout nouveau missile balistique intercontinental⁸³⁹. De petite taille, en tout cas par rapport à des I.C.B.M. tels que l'*Atlas* (*Army Air Corps*) ou le *Titan* (*Air Force*), ce vecteur militaire capable d'emporter une tête nucléaire de 1,2 mégatonne devait posséder trois étages et utiliser- il s'agissait là d'une première technologique - un carburant à l'état solide. Au début, il fut décidé par les autorités militaires que ce nouvel engin devrait indifféremment pouvoir être mis à feu à partir de plateformes de lancement mobiles (en l'occurrence des trains spécialement aménagés), ou depuis des silos souterrains renforcés. Ces spécificités opérationnelles étant très contraignantes – notamment au regard de la masse et de l'encombrement maximum du missile – elles jouèrent comme autant de facteurs limitatifs au moment de sa conception. Un premier prototype du futur missile LGM-30⁸⁴⁰ – fusée mieux connue de nous sous l'appellation de *Minuteman* - effectua un vol d'essai au mois de février 1961. Lancé à partir de l'*Air Force Missile Test Center*, une base installée en Floride, l'engin atteignit sa zone d'impact sans encombre après avoir parcouru un peu plus de 7400 kilomètres. Le succès de ce test, puis celui d'autres vols expérimentaux qui suivirent peu de temps après, conduisit le *Department of Defense* à accélérer considérablement le programme de développement du *Minuteman*. En mars 1961, il fut décidé qu'on conférerait à ce dernier le même degré de priorité que celui déjà attribué à

⁸³⁹ Ce programme fut officiellement démarré en février 1958. La firme *Boeing* fut choisie comme entrepreneur principal au mois d'octobre suivant.

⁸⁴⁰ La désignation LGM-30(x) n'entra en vigueur qu'à partir de la fin de l'année 1963. Avant cette date, les différentes versions du *Minuteman* (*Minuteman I* et *Minuteman II*) portaient le sigle HSM-80(x) (XSM-80 pour le prototype).

ceux des missiles *Atlas* et *Titan*. Dès lors, les progrès réalisés furent tout aussi rapides que spectaculaires. Ainsi en octobre 1961, la construction d'un ensemble de silos enterrés spécialement conçus pour dissimuler et lancer les *Minuteman* fut achevée sur la Base Aérienne de Malmstrom, (Montana) tandis que la première mise à feu réussie du nouveau missile à partir d'un emplacement de ce genre eut lieu un mois plus tard à l'*Operational Standardization and Test Facility* de la base de Vandenberg (Californie). Quant aux unités transportables par moyens ferroviaires, l'idée en fut tout simplement abandonnée au mois de décembre suivant, et ceci au profit d'un sensible accroissement du parc d'engins enfouis. D'un point de vue militaire, on voit sans peine quels avantages – immenses en vérité – il y avait à détenir une armada de pareils vecteurs stratégiques. Leur carburant se présentant à l'état solide, c'est-à-dire sous forme stable, les *Minuteman* étaient susceptibles d'endurer sans opérations de maintenance lourde d'assez longues périodes de stockage. Dissimulés dans des fosses souterraines soigneusement camouflées – donc « invisibles » aux yeux de l'ennemi - protégés des effets immédiats d'un éventuel assaut par de pesantes portes anti-explosion escamotables au tout dernier moment, ils pouvaient être placés en configuration offensive, puis lancés, en un laps de temps très bref. Dans le cas d'une agression surprise, fut-elle de type nucléaire, cet ensemble de mesures garantissait à l'assailli la possibilité de rapidement mettre en oeuvre sa riposte, quand bien même la plupart de ses installations stratégiques et de ses centres de décision aurait été endommagée ou annihilée par les frappes adverses. Quant à l'assaillant, il était bien entendu assuré d'avoir à supporter en retour une contre-offensive effroyablement destructrice. Comme nous l'énoncions en débutant cette section, le développement du *Minuteman* fut d'emblée placé sous le signe de contraintes techniques assez inhabituelles pour l'époque. Les hauts responsables de l'*Air Force Ballistic Missile Division* et du *Strategic Air Command* qui se trouvaient à l'origine de ce programme (ou le soutenaient), voulurent dès le départ concevoir un missile balistique intercontinental simple, efficace, fiable, et économique. Alors que les coûts de fabrication et d'entretien des différentes sortes d'I.C.B.M. fabriqués jusque-là pour le compte des forces armées américaines n'avaient eu de cesse d'augmenter, il s'agissait, avec ce projet, de mettre un frein à cette tendance dont on estimait qu'elle devenait de plus en plus insupportable. A bien des égards, les deux versions du *Minuteman* I (LGM-30 modèles A et B), concrétisèrent ces nouvelles exigences. La réduction de masse et de volume du missile représentant ici une priorité absolue pour ses commanditaires – surtout tant qu'il fut question de mettre en oeuvre

des unités capables d'être déplacées à travers le pays - toutes les solutions techniques allant dans cette direction se virent privilégiées⁸⁴¹. Le système informatique de guidage et de contrôle embarqué D-17A/B de ces fusées n'échappa pas à cette règle. Imaginé et assemblé par *Autonetics*, la division *Guidance and Control* de l'avionneur *North American Aviation*, ce « petit » ordinateur binaire à disque magnétique rotatif construit en *Diode Transistor Logic* (D.T.L.) possédait pour commencer une forme très inhabituelle. Celle-ci était cylindrique, ce qui se comprend parfaitement puisque par souci d'économie spatiale, ses concepteurs jugèrent approprié de faire en sorte qu'il épouse au mieux la configuration géométrique du missile. Pour satisfaire les desideratas de l'armée de l'air, *Autonetics* résolut d'employer ici des circuits à composants discrets, c'est-à-dire des circuits électroniques petits, solides et légers comportant certes de très nombreux éléments électroniques, mais n'atteignant pas, loin s'en faut, le degré d'intégration et le niveau de fiabilité offerts pas les circuits « monolithiques » mis au point quelques temps auparavant chez *Texas Instruments* et *Fairchild Semiconductor*. C'est d'ailleurs la société *Texas Instruments* qui fut préférée par les autorités politiques et militaires américaines pour la fourniture de ces circuits électroniques. Chaque système de contrôle et de guidage du *Minuteman I* réclamant environ 15000 de ces circuits pour sa fabrication, on ne s'étonnera guère de ce que ce marché gouvernemental se soit révélé extrêmement lucratif pour le faiseur texan. Précisons encore, pour donner une idée peut-être un peu plus nette du caractère exceptionnel de cette commande, qu'au mois de juin 1965, l'arsenal nucléaire du *Strategic Air Command* comptait quelques huit cent missiles de type *Minuteman I* (150 unités en version A et 650 en version B).

En octobre 1963, alors que trois cent *Minuteman I* avaient déjà été positionnés sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis, l'*Air Force*, toujours en collaboration avec la société *Boeing*, entreprit de développer l'*Advanced Minuteman* ou *Minuteman II* (LGM-30F). Plus grand, plus puissant et plus dévastateur que son prédécesseur – il pouvait en effet emporter une ogive nucléaire de 2 mégatonnes – ce missile intercontinental dont la portée maximale devait tout de même atteindre 11300 kilomètres reçut un dispositif de guidage et de contrôle notablement amélioré. Fabriqué par la division *Autonetics* de *North American Aviation*, l'*Advanced Minuteman D37B Computer* était, tout comme le D-17A/B avant lui, un ordinateur léger et très faiblement encombrant. Toutefois, à la différence de cette première machine qui n'en pouvait sauvegarder qu'un seul à la fois, le D37B était capable de stocker

⁸⁴¹ Long de 16,79 mètres, possédant un diamètre de 1,83 mètre, pesant près de 30 tonnes, le *Minuteman I* devait finalement coûter 1315000 dollars l'unité. A titre de comparaison, la longueur du missile *Atlas* – dans sa version opérationnel D, les premiers modèles étaient encore plus monumentaux - avoisinait les 23 mètres, son diamètre dépassait légèrement 3 mètres, et elle pesait 118 tonnes.

simultanément sept vecteurs de coordonnées sous forme binaire. Chacun de ces groupes numériques servait en fait à traduire avec grande exactitude la position géographique d'une cible susceptible d'être sélectionnée pour être détruite par le missile dans le cas où surviendrait une crise militaire majeure⁸⁴². Cette particularité de son ordinateur de guidage et de contrôle concourut largement à faire du LGM-30F un vecteur d'arme nucléaire bien plus flexible d'emploi que ne l'avaient été les deux précédentes versions du missile *Minuteman*. Alors que ces engins, dans l'hypothèse où une reprogrammation tardive de leur (unique) objectif se serait révélée indispensable à effectuer, auraient réclamé pour cela qu'on les manœuvre physiquement – ce qui était comme on l'imagine long et difficile à accomplir – le répertoire de coordonnées de cibles prédéfinies enregistré sur le disque magnétique de l'ordinateur du *Minuteman II* rendait l'exécution de cette opération à la fois simple et rapide. Le perfectionnement le plus significatif ici ne devait cependant pas concerner l'accroissement de la taille de la mémoire auxiliaire de cet ordinateur embarqué. Ainsi au lieu de faire usage exclusif de circuits à composants discrets, comme cela s'était effectivement produit lors de la conception du système informatique du *Minuteman I*, la société *Autonetics* décida cette fois d'utiliser des circuits à composants discrets *et* des circuits intégrés. Cette approche « hybride » qui reposait fondamentalement sur l'emploi de 2000 circuits intégrés permit de réduire à 4000 – contre 15000 pour l'*Autonetics D-17A/B* – le nombre de circuits à composants discrets entrant dans la fabrication du système D37B. Si sur le plan de la vitesse de fonctionnement les performances de ces deux machines étaient sensiblement équivalentes, l'ordinateur D37B était tout de même deux fois et demie moins massif et près de quatre fois moins volumineux que l'ordinateur de guidage du *Minuteman I*. Pour les militaires ce gain d'espace et de masse représentait évidemment une économie précieuse étant bien entendu que tout ce qui pouvait être épargné de la sorte pouvait ensuite se voir réinvesti, si l'on peut exprimer la chose en de semblables termes, dans l'accroissement du rayon d'action, et éventuellement le renforcement du pouvoir de destruction, de l'engin. Le premier essai du missile *Minuteman II* en configuration opérationnelle (non armé) eut lieu le 24 septembre 1964 à Cape Kennedy (Floride) et c'est au début du mois de février 1965, soit cinq mois après le déroulement de ce test, que le 447^{ème} *Strategic Missile Squadron* (base aérienne de Grand Forks, Dakota du Nord), se distingua en devenant la première unité de l'U.S. *Air Force* à recevoir en dotation le nouveau missile intercontinental de *Boeing*. Conformément à l'objectif qui avait été fixé par

⁸⁴² La capacité de stockage du disque magnétique de l'ordinateur *Autonetics D-17A/B* était de 2688 mots de 27 bits contre 6912 mots de 27 bits pour l'*Autonetics D37B*. Cette différence relativement importante de capacité en termes de mémoire de masse permet de comprendre pourquoi cette dernière machine pouvait stocker les coordonnées de plusieurs cibles alors que l'autre ne le pouvait pas.

l'armée et le gouvernement américains dans le courant du mois de décembre 1964, le *Strategic Air Command* disposait de 1000 *Minuteman* au premier trimestre 1967. Parmi ce millier de fusées à capacité nucléaire figuraient 200 vecteurs de type LGM-30F.

L'influence absolument décisive qu'exerça le programme de missiles *Minuteman* sur l'évolution de l'industrie des composants en semi-conducteurs durant la première moitié des années soixante est peut-être moins connue – et sans nul doute moins commentée – que celle qu'eut au même moment le légendaire projet astronautique *Apollo* sur ce même secteur technologique. Si ces deux programmes de très grande envergure différaient largement l'un de l'autre – notamment en raison des objectifs poursuivis de part et d'autre et par le fait aussi que le premier était une entreprise militaire alors que le second relevait fondamentalement de la responsabilité d'une organisation scientifique à caractère civil (la N.A.S.A.) - il n'en demeure pas moins que sur certains points, et non des moindres, ils convergeaient avec force. Ainsi avons-nous vu que les premiers ordinateurs à disposer d'unités de traitement en circuits intégrés furent ceux que l'*Instrumentation Lab.* du M.I.T et le département *Autonetics* de l'avionneur *North American Aviation* conçurent au début de la décennie soixante afin d'équiper respectivement les modules *Apollo* et les missiles *Minuteman II*. Puisqu'elles devaient prendre en charge les fonctions de guidage et de contrôle de vaisseaux spatiaux habités et celles de fusées intercontinentales emportant une ogive nucléaire d'une puissance de feu de deux mégatonnes, les plus grandes contraintes techniques pesèrent évidemment sur le processus de conception de ces deux machines. Comme on peut volontiers l'imaginer, l'optimisation de la fiabilité, mais aussi celle de la compacité, de la légèreté et de la vitesse de fonctionnement de ces ordinateurs constituèrent des facteurs absolument prioritaires pour les scientifiques et les ingénieurs chargés de leur mise au point. Par conséquent, et entre autres questions techniques importantes devant également être solutionnées, c'est avec un soin extrême qu'ils examinèrent chacun de leur côté le problème touchant au choix du type d'éléments électroniques qui serait utilisé pour créer l'unité arithmétique et logique de ces ordinateurs. Dans les deux cas, en dépit de son caractère récent et de son coût très élevé, c'est le circuit intégré qui fut sélectionné.

Le premier vol test du *Minuteman II* eut lieu comme nous l'avons annoncé à la fin du mois de septembre 1964. L'*Autonetics D37B Computer* devint donc opérationnel quelques mois seulement avant que l'*Instrumentation Lab.* n'achève la fabrication des premiers prototypes de l'*Apollo Guidance Computer*. C'est à *Texas Instruments*, *Westinghouse* et *Radio Corporation of America* que le gouvernement américain confia la production en série des circuits intégrés et des circuits à composants discrets destinés à équiper l'ordinateur de

bord des *Minuteman II*. Les responsables de cet ambitieux programme militaire ayant prévu que le rythme de fabrication du nouveau missile devrait finir par atteindre six ou sept unités par semaine, ces trois entreprises spécialisées dans les composants électroniques durent modifier en profondeur leur outil de production de façon à pouvoir faire face à cette demande à la fois énorme et pressante. Ainsi, au départ, ce sont quelques 4000 circuits intégrés que *Texas Instruments*, *Westinghouse* et *R.C.A.* fabriquaient hebdomadairement. Au jour où nous écrivons il est bien sûr de grandes chances pour que ce nombre nous apparaisse comme plutôt insignifiant. Mais à cette époque, il en allait tout autrement. Paul E. Cerruzi nous rappelle fort à propos qu'au mois d'août 1965, la revue américaine spécialisée *Aviation Week and Space Technology*⁸⁴³ présenta le programme *Minuteman* comme étant un « *top Semiconductor User* », c'est-à-dire un consommateur majeur d'éléments électroniques en matériaux semi-conducteurs (sachant que le terme générique « *semiconductors* » servait alors à désigner circuits intégrés et circuit à composants discrets et que l'autre « *top Semiconductor User* » du moment était le programme *Apollo*).

En créant des conditions de production particulièrement favorables à l'abaissement de son coût et à l'accélération de son « envol » commercial, le marché ouvert par le *Minuteman II* au tout début des années soixante joua un rôle assurément prépondérant dans la montée en puissance fulgurante du circuit intégré. Cette très importante commande gouvernementale permit aussi à *Texas Instruments*, *Westinghouse* et *Radio Corporation of America* de se positionner précocement sur un marché qui, grâce au secteur informatique, se révéla être par la suite l'un des plus profitables qu'ait connu ce demi-siècle. En plus des bénéfices financiers colossaux qu'elles réalisèrent au cours de cette opération, deux des trois firmes impliquées – en l'occurrence *T.I.* et la *R.C.A.* – développèrent une capacité de production et acquirent un savoir-faire et une expérience qu'elles surent incontestablement mettre en valeur pendant les deux décennies suivantes. Ainsi la première, forte notamment des relations privilégiées qu'elle avait réussi à nouer ici avec l'aérospatiale civile et militaire, s'imposa quinze années durant - de 1960 à 1975 - comme le leader des entreprises américaines productrices de circuits intégrés. A ce titre, *Texas Instruments* approvisionna de nombreux fabricants d'ordinateurs et de mini-ordinateurs en composants électroniques et resserra ses liens avec l'industrie informatique avant de devenir elle-même un fabricant de calculatrices de poche et de micro-ordinateurs de renommée mondiale. Quant à la *Radio Corporation of America*, en plus de toujours figurer en bonne place dans le classement recensant les dix sociétés les plus

⁸⁴³ *Aviation Week and Space Technology*, 26 août 1965, cité par Paul E. Ceruzzi in [Ceruzzi, 1998], p. 187.

puissantes de ce secteur, elle conforta sa position d'*outsider* dans l'industrie informatique en annonçant le lancement de sa gamme commerciale *Spectra* au mois de décembre 1964. Comme nous avons déjà eu l'occasion de le mentionner, cette famille d'ordinateurs compatibles avec les nouvelles machines du *System/360* d'I.B.M. comprenait plusieurs modèles dont deux, les R.C.A. *Spectra 70/45* et *70/55*, possédaient des unités de calcul composées de circuits intégrés.

2.3.3.4. La volte-face d'I.B.M. : le *System 360/Model 85*, l'abandon de la *Solid Logic Technology* et l'adoption du circuit intégré.

La prodigieuse diminution du coût du circuit intégré qu'entraîna la poursuite simultanée des programmes *Minuteman* et *Apollo* pendant la première moitié des années soixante eut pour droite conséquence l'apparition d'ordinateurs commerciaux équipés de ce type de composants dès 1965-66. Pionnières en la matière, les compagnies *Radio Corporation of America* (avec les *Spectra 70/45* et *70/55*), *Scientific Data Systems* (*S.D.S. Model 92*) et *Sylvania Electric Products* (*MSP-24*), furent rejointes en 1966 par la *Computer Control Company* et *Burroughs* (respectivement avec l'ordinateur *DDP-124* et les systèmes *B2500* et *B3500*), puis, en 1968, par la *Control Data Corporation* (*CDC 7600*) et la *National Cash Register* (*Century Series*). Une fois celui-ci amorcé, bien d'autres sociétés continuèrent à s'inscrire dans ce mouvement promis comme on le sait à une formidable expansion. Quant à la toute-puissante firme dirigée par Thomas J. Watson Jr., laquelle était rappelons-le leader absolu sur le marché de l'informatique avec environ 70% des ordinateurs et des périphériques installés dans le monde, il fut nécessaire d'attendre la fin du mois de janvier 1968 pour la voir enfin annoncer la mise sur le marché prochaine d'un ordinateur - le *System/360 Model 85* - qui soit équipé d'une unité de calcul en circuits intégrés. Qui plus est, et c'était là la toute première fois que ce type de dispositif faisait son apparition sur une machine de série, cet ordinateur était pourvu d'une *mémoire cache* (concernant cette dernière notion, on parlera aussi d'antémémoire, de mémoire tampon, de *buffer* ou plus simplement encore de cache). Fabriquée elle aussi au moyen de matériau semi-conducteur, il s'agissait en fait d'une zone de stockage temporaire de petite taille localisée « entre » l'unité arithmétique et logique de la machine et sa mémoire centrale, laquelle était ici toujours constituée par une matrice en tores de ferrite de grande capacité. Douze fois plus rapide que cette dernière, ce cache permettait de

charger, quand le processeur devait accéder au contenu d'une adresse mémoire⁸⁴⁴ lors de l'exécution d'un programme, un ensemble de mots incluant évidemment celui exigé par l'instruction en cours d'exécution. Sachant que pour un couplage mémoire interne/antémémoire convenablement conçu la probabilité que le contenu d'une adresse mémoire se trouve *déjà* dans le cache au moment précis où l'unité de calcul de la machine en a besoin est en général supérieure à 90%, on mesure parfaitement le gain de rapidité conféré par un pareil agencement. De plus, en couplant de cette manière mémoire principale en tores de ferrite et *buffer* en semi-conducteur, il devenait possible de combiner les extraordinaires performances de ces composants avec le coût peu élevé des matrices à tores (une technologie déjà « ancienne » qu'I.B.M. maîtrisait à la perfection). Le principe de l'antémémoire devint par la suite un concept standard de l'industrie informatique. Aujourd'hui la quasi-totalité des microprocesseurs des ordinateurs que nous utilisons intègre directement deux, voire trois niveaux de mémoire cache afin d'accélérer le traitement des informations.

La véritable innovation technique dont était porteuse cette machine n'avait donc qu'indirectement à voir avec le type de composants électroniques sélectionné pour construire son unité arithmétique et logique (bien que l'usage de circuits intégrés à cette fin ait bel et bien constitué une première pour I.B.M.). Comme nous le savons, d'autres fabricants d'ordinateurs s'étaient montrés suffisamment audacieux pour réaliser des systèmes de ce genre – et les commercialiser à un prix très attractif - quelques années avant que « Blanche Neige » ne se décide enfin à faire de même. *Non, ce qui, plus que tout, doit impérativement être souligné à présent est le fait que pour la première fois dans toute l'histoire de l'informatique, on avait affaire ici à un dispositif d'enregistrement de l'information – autrement dit une mémoire – constitué du même matériau que l'unité de calcul de l'ordinateur sur lequel il était monté.* Cette antémémoire, évidemment, n'était en aucun cas une mémoire principale d'ordinateur. Jouant le rôle d'interface mémorielle entre cet organe essentiel – constitué à l'époque de tores en ferrite - et l'unité de calcul de la machine – faite elle d'un assemblage de circuits intégrés - elle n'était capable de conserver qu'une toute petite quantité de données en vue d'une utilisation extrêmement rapprochée. Il ne saurait par conséquent être question pour nous de la confondre avec le dispositif *M* longuement décrit par John Von Neumann dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*. Toutefois, puisqu'il s'agissait quand même d'une forme de mémoire interne, on ne peut pas non plus ne pas voir

⁸⁴⁴ La quantité d'informations correspondant au contenu d'une adresse mémoire est couramment appelée « mot ». La taille de ces mots, que l'on exprime généralement en bits ou en octets, peut avoir des longueurs variables en fonction des ordinateurs considérés.

en elle le premier pas effectué dans la direction d'une complète homogénéisation des matériaux utilisés pour élaborer le processeur de la machine et sa mémoire centrale. Rappelons que le fait de parvenir à opérer cette uniformisation matérielle (que nous qualifions plus haut de « Graal » de l'informatique), représentait pour l'ordinateur la condition fondamentale de l'actualisation d'un certain nombre de perfectionnements remarquables (on pensera tout particulièrement à la simplification de la structure de la machine et à l'amélioration de ses performances). Cette convergence, on le sait, ne pouvait se concevoir et se réaliser que dans le champ circonscrit par les technologies dominantes du moment (tubes à vides, dispositifs d'enregistrement électromagnétiques divers, transistors, circuits intégrés). Or depuis l'invention de l'ordinateur, et pour divers motifs, il avait toujours existé une hétérogénéité physique entre les matériaux utilisés pour façonner l'unité arithmétique et logique de la machine et ceux employés pour réaliser sa mémoire principale... Certes la petite mémoire cache en silicium proposée par I.B.M. au début de l'année 1968 ne représentait pas le « point de concours » de ces deux « droites » qui, jusqu'à cette date, ne s'étaient jamais réellement croisées et encore moins durablement superposées. Cependant, alors que la décennie soixante touchait à son terme, ce dispositif à la capacité et aux performances modestes laissait parfaitement augurer de ce qui ne tarderait pas à se produire : la création d'une mémoire principale d'ordinateur en silicium.

Les livraisons du *System/360 Model 85*, première machine d'I.B.M. renfermant des circuits intégrés, ne débutèrent qu'à partir du mois de décembre 1969. Il va de soi qu'on ne manquera pas de s'interroger ici sur les raisons qui conduisirent la direction du géant mondial de l'informatique à reconsidérer aussi radicalement sa position concernant à la fois la S.L.T., une solution technologique développée en interne dont on se souviendra qu'elle avait exigé un effort financier énorme de la part d'I.B.M., et le circuit intégré, autre approche qu'elle avait également examinée en 1961 et qu'elle avait fini par rejeter en raison de son coût trop élevé. Afin de donner une idée plus précise de l'engagement industriel gigantesque que représenta en son temps la *Solid Logic Technology*, on soulignera le fait qu'en 1966, les quatre grandes usines qu'I.B.M. avait spécifiquement édifiées à cette fin produisirent un total de 90 millions de modules S.L.T. (contre 36 millions l'année précédente). Et encore: pour la période 1965-66, il sortit des chaînes de production de la seule unité d'East Fishkill (petite localité située non loin de Poughkeepsie), plus de composants électroniques en silicium qu'il n'en sortit de celles de l'ensemble des usines de tous les fabricants de composants en semi-conducteur du monde entier ! En d'autres termes la production d'une seule de ses fabriques de modules S.L.T. suffisait à faire d'I.B.M., entreprise dominant déjà de manière quasi absolue le marché

mondial de l'informatique, le premier producteur au monde de composants électroniques en matériau semi-conducteur. Compte tenu de l'extraordinaire position de force qui était alors la sienne, mais aussi de l'ampleur des investissements qu'elle avait réalisés pour parvenir à ce résultat, comment expliquer maintenant que la firme de T. J. Watson Jr. ait abandonné la S.L.T. pour se tourner entièrement vers le circuit intégré ?

La période où I.B.M. s'engagea sur la voie de la *Solid Logic Technology* correspondit très précisément au moment où de grandes organisations gouvernementales et militaires américaines (tels la N.A.S.A., l'*Air Force* et le S.A.C.), décidèrent de soutenir, c'est-à-dire de financer sans compter, le développement du circuit intégré. Ceci fut entrepris avec, en ligne de mire, la volonté affirmée de recourir rapidement et massivement à ce dispositif dans le cadre de programmes militaires et scientifiques extrêmement vastes et exigeants. Evidemment ces différents projets devaient se trouver mis en œuvre dans le contexte à la fois tendu, secret et propagandiste qui particularisait la guerre froide. C'est dire ici si les enjeux, en plus d'être évidemment politiques et militaires, étaient aussi d'ordre industriel et financier...

Une fois le circuit intégré sélectionné, le gouvernement américain, relayé par les organes de la presse économique du pays, commença à adopter une posture extrêmement critique à l'égard de la *Solid Logic Technology*. Compte tenu des investissements énormes que le soutien au développement et l'achat massif de circuits intégrés représentaient, compte tenu également du fait que l'on ne disposait après tout que de peu d'informations sur la capacité réelle des industriels à le produire correctement en grande série, les autorités avaient bien entendu tout intérêt à mettre l'objet de leur choix en valeur, fut-ce en dépréciant d'autres approches technologiques peut-être moins performantes, mais aussi beaucoup moins coûteuses. Cette façon de faire s'explique d'autant mieux si l'on se souvient à présent que le gouvernement américain avait déjà investi des dizaines de millions de dollars dans les projets militaires *Micro-Module* et *Molecular Electronics*, lesquels, sur le principe, ne différaient qu'assez peu de la *Solid Logic Technology*. Le fait que l'administration Kennedy ait décidé d'apporter son complet appui au circuit intégré – cautionnant officiellement ce dernier et le plaçant du même coup dans une situation de compétition inégale avec la technologie microélectronique d'I.B.M. – ne permet toutefois de rendre qu'incomplètement compte de l'accueil plutôt partial, et pour tout dire défavorable, qui fut en général réservé à la S.L.T. aux Etats-Unis.

L'autre élément d'explication que l'on avancera ici dans le but de mettre en lumière les raisons de cette attitude « hostile » est le vif mécontentement qu'éprouvèrent les grands fabricants de semi-conducteurs américains lorsqu'ils apprirent que la toute-puissante société

I.B.M. était en passe de devenir à elle-même son principal fournisseur de composants électroniques. Pour ces compagnies, cette nouvelle signifiait qu'à court ou moyen terme un manque à gagner considérable menaçait de toucher une de leurs activités industrielles les plus rentables. Leurs divisions informatiques, quant elles existaient, se trouvaient déjà bien en peine de surnager au sein d'un marché mondial presque totalement dominé par I.B.M. Dans ces conditions, on conçoit aisément que la perspective de voir une firme de cette envergure accéder à une pareille autonomie n'ait pu les contenter outre mesure. De toute évidence, cela indiquait qu'ils risquaient désormais d'être perdants sur tous les plans. Ainsi non seulement ces constructeurs voyaient-ils un de leurs plus gros clients leur échapper mais en plus, il était pratiquement certain que celui-ci se trouverait bientôt en mesure de les concurrencer rudement dans le secteur de la vente de composants. On ne saurait donc réellement s'étonner de ce qu'ils se soient eux aussi évertués à dénigrer la voie empruntée par I.B.M.

Contrairement à la S.L.T. qui exigeait que l'on se serve de plusieurs puces pour concevoir un circuit individuel, l'approche monolithique, elle, permettait de fabriquer plusieurs circuits sur une seule et même puce. Dans ce qui précède, nous avons expliqué de manière détaillée en quoi cette technologie consistait tout de même que nous nous sommes employés à démontrer combien cette façon inédite de réaliser des circuits électroniques pouvait se révéler incroyablement intéressante pour tous ceux qui étaient susceptibles d'en devenir les utilisateurs. C'est un fait avéré qu'au début des années soixante, les performances et les multiples avantages offerts par les circuits intégrés étaient déjà supérieurs à celles et ceux des circuits conçus en S.L.T. Cependant, à partir de ces seuls éléments, on ne saurait conclure à l'inefficacité ou encore à l'obsolescence technologique prématurée des composants que la compagnie I.B.M. fabriquait en très grande série afin d'équiper l'ensemble des ordinateurs constituant la gamme *System/360*. Assurément moins performants, moins compacts et moins solides que les circuits monolithiques produits au même moment par *Texas Instruments* ou *Fairchild Semiconductor*, les modules miniatures en S.L.T. demeuraient cependant des dispositifs compétitifs et fiables, surtout au regard de leur coût qui restait très bas par rapport à celui initialement exorbitant des composants intégrés. Le temps passant, il devint de plus en plus clair que la S.L.T. serait tôt ou tard surclassée par le circuit intégré. Néanmoins, avant que cela ne se produise, il était tout aussi évident que quelques années de recherche, de développement et de production seraient encore nécessaires afin que celui-ci devienne un composant aussi rentable que pouvaient l'être les modules S.L.T. Ce répit, s'il nous est permis de parler ici en ces termes, devait énormément profiter à la compagnie I.B.M.

Au mois de septembre 1964 – soit à peu près six mois avant que les premières machines du *System/360* n'arrivent sur le marché américain – John Haanstra, ancien Président de l'I.B.M. *General Products Division* récemment écarté de ses fonctions pour s'être opposé à l'idée du *System/360*, rendit à ses supérieurs un rapport alarmant. Dans ce document interne intitulé « *Monolithics and IBM* », celui-ci mettait ainsi vivement en garde sa hiérarchie contre la menace que représentait selon lui le circuit intégré. A son sens il était parfaitement clair qu'en termes d'avance technologique, des compagnies telles que *Fairchild*, *T.I.* ou *Motorola* devançaient I.B.M. d'au moins deux années. Le risque semblait par conséquent bien réel de voir rapidement frappée d'obsolescence la nouvelle famille d'ordinateurs sur laquelle la société I.B.M. avait misé en grande partie son avenir. Afin d'empêcher une telle catastrophe, J. Haanstra recommanda la mise en place accélérée d'un programme de recherche et de développement très ambitieux. En effet, de par l'ampleur des moyens mobilisés et la prétention des objectifs à remplir – créer des « *monolithics* » et multiplier par dix, voire *cent*, le nombre de circuits présents sur une seule puce - il devait non seulement autoriser la société I.B.M. à réduire son retard technologique sur les autres firmes productrices d'éléments en semi-conducteurs, mais également lui permettre de les devancer. En janvier 1965, J. Haanstra fut appelé à prendre la direction de la nouvelle *Systems Development Division* (laquelle héritait en fait de l'activité développement de la *Components Division*, unité démantelée quelques temps auparavant sur décision de T. J. Watson Jr.). Travaillant conjointement à la conception des systèmes informatiques et à la mise au point de leurs composants, la mission première de la *Systems Development Division* (S.D.S.) consistait à élaborer ce que serait la prochaine « génération » de machines I.B.M. (laquelle devait évidemment être architecturée autour du circuit intégré et non plus autour de la S.L.T.). Finalement, après avoir dû affronter d'importantes difficultés techniques et organisationnelles - complications qui précisons-le étaient en partie liées aux méthodes de J. Haanstra ainsi qu'au caractère irréaliste des objectifs initialement définis par lui - les hommes en charge du développement des « *monolithics* » à la S.D.S. parvinrent à fabriquer des circuits intégrés dont la qualité et les performances rivalisaient sans peine aucune avec celles des meilleurs composants alors produits par *Fairchild Semiconductor* ou *Texas Instruments*. A la fin des années soixante, et pour la première fois de son histoire, ce sont des circuits intégrés de cette sorte qu'I.B.M. utilisa pour confectionner l'unité arithmétique et logique – ainsi que l'antémémoire – de son *Model 85*, l'ordinateur qui devait pour ainsi dire clore la série des compatibles *System/360* et annoncer la future famille *System/370*.

Les ordinateurs composant le *System/360*, nous avons déjà fait état de cela, furent surnommés « *les machines qu'I.B.M. fit et qui firent I.B.M.* ». A propos d'une compagnie industrielle d'envergure mondiale tout de même vieille de plus d'un demi-siècle au moment des faits, cette façon de présenter les événements pourra peut-être sembler excessive. Pourtant, ici, la réalité des choses ne se trouvait qu'à peine grossie par la tournure un peu radicale donnée à cette formule demeurée fameuse. Qu'on en juge: un mois après qu'ait été annoncée la disponibilité prochaine de cette nouvelle gamme d'ordinateurs, la société I.B.M. reçut quelques 1100 ordres de commande. En septembre 1964, soit cinq mois plus tard, ce nombre avait doublé surpassant ainsi, et de très loin, les capacités du géant de l'informatique à honorer ses commandes et à respecter ses délais ordinaires de livraison. Afin de pouvoir faire face à cette incroyable demande, la compagnie de T. J. Watson Jr. dû d'ailleurs procéder au renforcement de son outil de production, ce qui l'amena par conséquent à ouvrir de nouvelles usines. Durant cette période d'intense effervescence où, une complication n'arrivant jamais seule, des problèmes techniques relatifs à la fabrication des modules S.L.T. vinrent temporairement s'ajouter aux difficultés logistiques déjà existantes, I.B.M. recruta aussi énormément de personnel pour assembler, vendre ou installer ses nouveaux ordinateurs. En 1967, ses effectifs à l'échelon de la planète avoisinaient ainsi un quart de million d'individus (contre un peu moins de 145000 personnes un an avant le lancement du *System/360*). En dépit de l'ampleur de ces efforts, l'entreprise éprouva encore toutes les peines du monde à satisfaire la multitude de commandes sous laquelle elle croulait littéralement (en 1967 toujours elle n'avait pu honorer que la moitié des 9000 demandes d'achat ou de location enregistrées au cours des deux années précédentes). Dès le moment de sa commercialisation, le *System/360* rencontra donc un succès hors du commun qui, en plus d'être durable, se révéla aussi exceptionnellement profitable. C'est en effet en très partie grâce à cette nouvelle ligne d'ordinateurs que le revenu brut d'I.B.M. fit plus que doubler entre le milieu de la décennie soixante et le début des années soixante-dix. Notons également que c'est au cours de la même période que les bénéfices nets de cette société franchirent pour la première fois la barre du milliard de dollars ! A la mention de ces résultats financiers impressionnants, on prendra peut-être un peu mieux la mesure du rôle crucial que joua le *System/360* dans le renforcement de la position impérieuse qu'occupait déjà I.B.M. au sein de l'industrie informatique de l'époque. Même si le défi technologique et économique lancé en 1962 par la direction d'I.B.M. avait comporté des risques considérables pour l'avenir même de l'entreprise, Thomas J. Watson Jr. et ses collaborateurs étaient parvenus à le relever haut la main, transformant ainsi ce qui aurait pu devenir un fiasco sans précédent - compte tenu de l'arrivée progressive du circuit intégré

sur le marché - en un formidable exemple de réussite industrielle et commerciale. A la fin des années soixante, la société I.B.M. faisait par conséquent figure d'invincible colosse. Non seulement le *System/360* avait autorisé celle-ci à conserver, et même à élargir, une clientèle déjà nombreuse et diversifiée, mais la commercialisation réussie de cette gamme de machines, parce qu'elle s'était précisément produite à un moment où le circuit intégré commençait tout juste à devenir un composant abordable, avait permis de rapidement saturer un marché prêt au renouvellement qui, dans d'autres circonstances, aurait très certainement réservé un excellent accueil aux systèmes informatiques équipés de « *monolithics* ». Tandis que les premiers exemplaires de ces machines commençaient à faire leur discrète apparition sur une place commerciale littéralement « prise d'assaut » par les ordinateurs du *System/360*, les chercheurs de l'I.B.M. *Systems Development Division* s'évertuaient quant à eux à rattraper le retard que leur groupe avait accumulé en matière de circuits intégrés. En l'espace de deux années à peine – ce qui représentait tout de même un laps de temps très bref - ceux-ci parvinrent à mettre au point des circuits intégrés d'une qualité équivalente à celle des composants hauts de gamme proposés par les entreprises leaders dans le domaine. Mais ce ne fut pas là l'unique prouesse technologique dont les chercheurs d'I.B.M. se montrèrent capables. C'est en effet un scientifique employé à la *Research Division* d'I.B.M., le docteur Robert Dennard, qui, en 1966, conçut la première cellule mémoire monotransistor à accès aléatoire dynamique en semi-conducteur. Comme on le sait fort bien, la *Dynamic Random Access Memory* - dispositif désormais beaucoup mieux connu sous les acronymes D.R.A.M. ou R.A.M. – est une des pierres angulaires de l'informatique moderne en général, et de la micro-informatique en particulier.

2.3.3.5. Les mémoires vives à accès aléatoire en matériau semi-conducteur : *Static Random Access Memory* (S.R.A.M.) et *Dynamic Random Access Memory* (D.R.A.M.).

Les mémoires d'ordinateurs en semi-conducteur, que l'on songe ici à des modules conçus en technologie planaire/bipolaire ou au moyen de transistors à effet de champ M.O.S.F.E.T.⁸⁴⁵ (*Metal-Oxyde Semiconductor Field-Effect Transistor*), ne firent leur réelle

⁸⁴⁵ Le principe de fonctionnement du transistor M.O.S.F.E.T. fut formellement décrit par le physicien d'origine allemande Julius E. Lilienfeld dès 1925. Il fallut cependant attendre la fin de la décennie soixante pour le voir enfin prendre la forme d'un dispositif efficient et susceptible d'être produit à l'échelle industrielle Il doit être

apparition sur le marché informatique qu'au début des années soixante-dix. Entre 1965 et 1971 trois entreprises américaines, I.B.M., *Fairchild Semiconductor* et *Intel Corporation* (une nouvelle venue cofondée par Robert N. Noyce and Gordon Moore, deux « anciens » de *Fairchild* qui avaient fait leurs premières armes au *Shockley Semiconductor Laboratories*), jouèrent un rôle assurément décisif dans le processus de création, puis l'irrésistible montée en puissance de ces dispositifs miniaturisés qui, très vite, allaient bouleverser radicalement l'univers informatique en détrônant tout d'abord les mémoires internes à tores de ferrite et en permettant ensuite la fabrication de machines de plus en plus petites et de moins en moins coûteuses. L'histoire des mémoires d'ordinateur en semi-conducteur ne débute évidemment pas au début des années soixante-dix. Elle trouve son point d'origine et son lieu propre de déploiement à la confluence de deux grandes entreprises scientifiques et militaro-industrielles qui sont l'informatique – et tout ce qui a trait à l'évolution des éléments matériels, en particulier ceux destinés au stockage de l'information, dont sont faits les ordinateurs – et la microélectronique. Il n'est peut-être pas dénué d'intérêt de rappeler à ce point que l'ordinateur et le transistor, tout au moins en tant qu'objets tangibles et opérationnels, ont respectivement fait leur apparition au mois de décembre 1947 et au mois de mai 1949⁸⁴⁶. Précédant fort logiquement la première rencontre entre la création de John Von Neumann et le circuit intégré d'une dizaine d'années, la réunion de l'ordinateur et du transistor se produisit effectivement au milieu des années cinquante. Ces deux moments de convergence technologique revêtirent comme on le sait une extrême importance pour les constructeurs et les utilisateurs de

précisé que parmi ses caractéristiques typiques, la technologie M.O.S. en possède au moins trois ne pouvant que contribuer à la rendre extrêmement attrayante aux yeux des concepteurs de circuits électroniques : 1°) dotés d'une architecture simple, les transistors à effet de champ M.O.S. offrent un très faible taux d'encombrement sur substrat) ; 2°) leur consommation énergétique étant basse, ils sont économiques et ne dégagent que peu de radiations thermiques (on peut donc en disposer un nombre important dans un volume restreint sans avoir à redouter outre mesure les habituels effets néfastes occasionnés par les dégagements calorifiques dus au fonctionnement) ; 3°) les transistors M.O.S. pouvant être utilisés à d'autres fins que la seule opération de commutation (par exemple comme des capacités ou des résistances), leur technologie n'exige pas l'emploi d'autres composants électroniques miniatures. A ce titre la fabrication de circuits intégrés planaires à base de composants à effet de champ M.O.S., parce qu'elle requiert moins d'étapes fondamentales que d'autres approches, est simple et avantageuse. Compte tenu de leurs caractéristiques physiques et fonctionnelles, on comprend que les transistors conçus en technologie M.O.S.F.E.T. aient été tout particulièrement bien adaptés au processus de l'intégration planaire. Avec eux en effet, la production automatisée d'unités électroniques à forte densité de composants élémentaires devenait chose envisageable tandis que cette uniformisation industrielle, en retour, devait garantir d'une part un abaissement significatif des coûts de production et, d'autre part, une amélioration de la qualité des circuits. Bien évidemment ces nouveaux dispositifs n'étaient pas exempts de défauts propres, le plus important d'entre eux étant assurément représenté par une vitesse de commutation inférieure à celle généralement constatée pour les transistors à jonction. Mais puisqu'il était possible ici de balancer cette lenteur (toute relative) par une très nette augmentation du nombre de transistors par circuit, la chose, comme on a souvent coutume de le formuler aujourd'hui, devenait « transparente ».

⁸⁴⁶ Nous faisons référence ici au transistor à point de contact (*Bell Labs.*), et à l'E.D.S.A.C., l'ordinateur que le mathématicien britannique Maurice Wilkes conçut d'après les plans de l'E.D.V.A.C. pour l'Université de Cambridge et que les spécialistes de l'histoire de l'informatique s'accordent généralement à regarder comme ayant été le premier ordinateur véritablement opérationnel.

matériels informatiques puisque grâce aux atouts multiples offerts par ces deux nouvelles catégories de composants et de métacomposants électroniques, les machines, peu à peu, virent augmenter leur rendement et leur fiabilité tandis que dans le même temps leur coût, leur masse et leur volume, eux, se réduisirent spectaculairement. Jusqu'au début des années soixante-dix toutefois ce progrès formidable n'intéressât directement que les unités arithmétiques et logiques des ordinateurs. En raison des sérieuses difficultés techniques rencontrées dans le cadre de la mise au point des mémoires en semi-conducteur, mais aussi parce que cette technologie datant du milieu des années cinquante avait largement fait ses preuves et était financièrement amortie, les dispositifs internes d'enregistrement de ces machines continuèrent donc à être construits au moyen de matrices à tores de ferrite (on parlait alors parfois de « bloc mémoire »). En quelques mots rappelons maintenant quels étaient les avantages, puis les défauts principaux, de ces mémoires électromagnétiques. Premièrement, les matrices à tores de ferrite étaient des systèmes de stockage qui autorisaient un accès aléatoire à leurs constituants individuels. En d'autres termes chacun des minuscules anneaux ferromagnétiques qui les composaient - et chaque élément d'information, ou bit, qui s'y trouvait éventuellement emmagasiné - pouvait être accédé indépendamment de tous les autres, sans qu'il soit pour cela besoin de respecter un ordre ou un cheminement stricts et précis au sein de la mémoire. Théoriquement donc, écrire, lire ou régénérer un bit enregistré sur un tore situé en tel ou tel secteur de la matrice prenait autant de temps qu'effectuer la même opération sur une cellule mémoire localisée n'importe où ailleurs. Deuxièmement, les matrices à tores constituaient des systèmes mémoires extrêmement rapides. Ainsi pour les plus performantes d'entre elles le temps d'accès, en lecture, à un bit, était de l'ordre du millionième de seconde. Troisièmement, et ce sera là le dernier point « positif » dont nous ferons mention ici, il s'agissait de mémoires non volatiles, cette propriété signifiant simplement que les informations enregistrées dans la mémoire interne de l'ordinateur n'étaient pas perdues (ou ne se volatilisaient pas), quand le courant électrique alimentant celui-ci se voyait coupé. Reconsidérons à présent les défauts majeurs de ces mêmes dispositifs. Pour commencer, étant donné l'extrême méticulosité qui était requise pour assembler les divers et nombreux composants élémentaires des matrices à tores, il était quasiment impossible d'automatiser leur production. D'où le coût de cette technologie qui demeurait élevé, en tout cas au regard de sa relative ancienneté. Ensuite, la puissance de traitement des ordinateurs et la dimension logicielle de l'informatique s'étant considérablement développées depuis que celles-ci existaient, il avait fallu procéder à l'augmentation de la capacité - et donc du volume physique - des matrices à tores. De ce fait, malgré les progrès notables et rapides

qui avaient été enregistrés ici aussi en matière de miniaturisation, ces mémoires, à la fin des années soixante, constituaient encore des sous-systèmes vitaux très encombrants. Enfin, les matrices à tores étaient par nature destructives. Comprendre par là, comme nous l'avons déjà expliqué plus haut, que la lecture des éléments individuels d'information stockés sur les anneaux ferromagnétiques du dispositif impliquait obligatoirement leur effacement (autrement dit leur destruction). Pour restaurer ces bits – lesquels pouvaient s'avérer nécessaires lors d'une phase de travail subséquente - il fallait par conséquent adjoindre au système des circuits électroniques dont la fonction consistait à les régénérer. Or il est évident que cet équipement spécial ne pouvait que contribuer à accroître encore la complexité matérielle, l'encombrement, la consommation et le coût des matrices à tores. Comme on l'aura compris, les matrices à tores représentaient la technologie dominante sur le marché mondial des mémoires principales d'ordinateur au moment où furent commercialisées leurs premières contreparties en matériau semi-conducteur. En une dizaine d'années à peine, celles-ci, toujours plus petites, plus performantes et plus économiques réussirent à détrôner définitivement les mémoires à tores de ferrite. Avant de parler de quelques circuits mémoire particulièrement représentatifs du début des années soixante-dix – les puces *Fairchild S.R.A.M. 4100* et *Intel D.R.A.M.1103* pour les citer nommément – il nous faudra au préalable évoquer cinq événements déterminants, d'ordre technique, théorique et/ou organisationnel, qui formèrent autant de prémisses essentielles à cette révolution technologique annoncée.

Chronologiquement le premier de ces moments correspondit sans nul doute possible à l'invention de la technologie *Complementary Metal-Oxyde Semiconductor*, ou C.M.O.S. Celle-ci fut imaginée⁸⁴⁷ en 1963 par Frank Wanlass, un scientifique qui travaillait alors à la mise au point de transistors à effet de champ M.O.S. pour le compte de la *Fairchild Semiconductor*. Pour la décrire dans ses grandes lignes, on dira que la technologie C.M.O.S. consiste, sur un *seul et même* substrat semi-conducteur, à créer côte à côte puis à faire *simultanément* usage de transistors M.O.S.F.E.T. à canal N et P. De la coexistence de ces deux sous-catégories de transistors que leurs dopages chimiques respectifs, en quelque sorte, opposent, naît la possibilité de microarchitectures qui, sur les plans de la phase d'élaboration et du fonctionnement, se caractérisent par de très intéressantes propriétés fonctionnelles. Puisqu'on les confectionne en recourant à des transistors M.O.S.F.E.T. dopés N *et* à des transistors M.O.S.F.E.T. dopés P, les circuits C.M.O.S., comme l'indique précisément la toute

⁸⁴⁷ Frank Wanlass déposa une demande de brevet le 18 juin de la même année. Intitulée "Low Stand-By Power Complementary Field Effect Circuitry", elle lui fut officiellement accordée le 5 décembre 1967 (brevet U.S. n° 3356858).

première lettre de cette abréviation, fonctionnent selon le régime de la *complémentarité*. Ainsi, une même charge électrique qui permettra par exemple de faire basculer un ou plusieurs transistors appartenant à l'un des deux types mentionnés à l'état passant sera également mobilisée pour faire passer un ou plusieurs transistors de l'autre type à l'état bloqué. Il résulte de ceci plusieurs choses remarquables: 1°) les circuits conçus en technologie C.M.O.S. peuvent être fabriqués au moyen de transistors, et de transistors seulement ; 2°) en raison de cela, et comparativement à celui d'autres approches, leur processus de fabrication est « simple » ; 3°) les coûts liés à leur production se trouvent donc réduits.

Il ne s'agit pas là, bien entendu, des seuls atouts recelés par la technologie C.M.O.S. Lorsque Frank Wanlass travaillait à leur élaboration, en 1963, il se rendit compte que par rapport à des dispositifs réalisés en technologie planaire/bipolaire ou P.M.O.S., les montages créés en *Complementary Metal-Oxide Semiconductor* – à ce moment il s'agissait encore de circuits à composants discrets et non de circuits monolithiques - ne consommaient que très peu d'énergie. En revanche, à cause de la moindre vitesse de commutation de leurs composants élémentaires, ils devaient se révéler nettement plus lents que ceux-là. Le premier circuit intégré en C.M.O.S. ne vit en réalité le jour qu'en 1968. Il fut l'œuvre d'une équipe de chercheurs de la *Radio Corporation of America*. Pendant plusieurs années, et comme conséquence directe des propriétés qui la singularisaient à l'origine, cette nouvelle technologie fut essentiellement utilisée dans le cadre de la production de systèmes électroniques où l'importance de l'autonomie énergétique l'emportait largement sur celle de la puissance de calcul. On ne sera donc guère étonné d'apprendre que les fabricants de montres à cristaux liquides absorbèrent une partie non négligeable de la production mondiale de puces C.M.O.S. pendant les premières années où celles-ci se virent commercialisées. Les progrès rapides et constants accomplis ici comme ailleurs en matière de miniaturisation et d'intégration conduisirent ensuite l'industrie informatique à se tourner de plus en plus vers l'usage de cette famille de circuits au point que, de nos jours, elle la domine totalement ou presque.

La deuxième chose sur laquelle nous souhaiterions revenir ici est l'observation désormais célèbre que Gordon E. Moore, qui occupait à cette époque le poste de Directeur des Laboratoires de Recherche et de Développement de la *Fairchild Semiconductor*, publia au mois d'avril 1965 dans un numéro de la revue américaine *Electronics Magazine*⁸⁴⁸. Dans cet article intitulé « Cramming more components onto integrated circuits » – littéralement

⁸⁴⁸ Gordon E. Moore, « Cramming More Components Onto Integrated Circuits », *Electronics Magazine*, Volume 38, n°8, 19 avril 1965, pp. 114-117.

« Entasser plus de composants sur les circuits intégrés » - l'auteur énonçait une hypothèse relative à une tendance fondamentale qu'il avait eu l'occasion de repérer antérieurement, en préparant un graphique destiné à illustrer un exposé sur l'évolution des circuits monolithiques pour la période 1959-1965. Connue de nous sous l'appellation de « loi » de Moore⁸⁴⁹, cette constatation empirique, tout au moins dans sa version première, a été énoncée dans un court paragraphe de l'article précité:

« La complexité autorisant la minimisation du coût des composants a été approximativement multipliée par un facteur deux chaque année (voir graphique page suivante). A court terme on peut s'attendre à ce que ce taux de croissance se maintienne, il est même possible qu'il augmente. Sur le long terme, le rythme de cette augmentation est un peu plus incertain, toutefois il n'existe aucun motif qui porte à croire qu'il ne demeurera pas à peu près constant pendant au moins une dizaine d'années. Ceci signifie qu'en 1975, le nombre de composants par circuit intégré minimisant le coût sera de 65000⁸⁵⁰. ».

En règle générale nous connaissons une variante plus élémentaire (et aussi plus récente puisque sa formulation date de 1975), de la « loi » de Moore. Celle-ci, qui constitue en quelque sorte la version standard de cette « loi », assure qu'à coût constant les performances (la puissance de calcul), des microprocesseurs doublent tous les dix-huit mois. Remarquons bien qu'en 1965, année où G. E. Moore formula pour la première fois sa fameuse règle, le microprocesseur n'existait pas encore. En outre, compte tenu du fait qu'au moment où il rédigeait son article le circuit intégré était une invention récente et fort peu répandue (car réservée aux seules applications militaires ou spatiales), le futur co-fondateur d'*Intel* ne disposait en tout et pour tout que de données techniques recueillies sur un intervalle d'une demi-décennie. A l'aune de ceci, on prendra certainement beaucoup mieux la mesure de l'audace, mais aussi de la clairvoyance, qui furent celles de Gordon E. Moore. Sur la base de cet ensemble d'informations somme toute relativement limité, le propos originaire et central

⁸⁴⁹ Il convient de noter au passage que cette désignation parfaitement abusive, mais depuis longtemps rentrée dans les mœurs, fut d'abord et avant tout le fait de la presse. Dans le texte original de Moore – lequel n'a jamais prétendu que son observation avait ou devait avoir valeur de loi - ne figure aucune occurrence du terme « law ».

⁸⁵⁰ « *The complexity for minimum components costs has increased at a rate of roughly a factor of two per year (see graph on next page). Certainly over the short term this rate can be expected to continue, if not to increase. Over the long term, the rate of increase is a bit more uncertain, although there is no reason to believe it will not remain nearly constant for at least 10 years. That means by 1975, the number of components per integrated circuit for minimal cost will be 65,000* », in Gordon E. Moore, « Cramming More Components Onto Integrated Circuits », *Electronics Magazine*, volume 38, n°8, p. 115, 19 avril 1965. La traduction ci-dessus est nôtre.

de l'auteur visait à mettre en évidence la corrélation existant entre le coût moyen de production des circuits intégrés et leur complexité (c'est-à-dire finalement le nombre de composants élémentaires qu'ils comportaient). Son analyse le conduisait alors à avancer l'idée selon laquelle un certain niveau de complexité était identifiable pour lequel le coût moyen d'un élément de circuit intégré se révélait minimal. Les données technologiques à sa disposition lui permettaient ensuite de démontrer que ce niveau de complexité était multiplié par deux chaque année. Eut égard à la constance passée de cette évolution de type exponentiel, le chercheur déclarait que rien, au moins durant les dix années suivant la publication de son article (1965-1975), ne semblait s'opposer à la poursuite de ce phénomène. Une projection dans le long terme lui permettait donc d'évaluer à 65000 le nombre de composants que comporterait un circuit intégré à l'issue de cette période décennale. On fera état à ce point de ce qui nous paraît constituer vraiment la double valeur de la pseudo loi de Moore. En premier lieu, et c'est là finalement sa raison d'être originale, il s'agit d'une règle hypothétique prédictive. A ce titre, bien loin de prétendre à une quelconque forme d'universalité ou de pérennité, elle ne fait que dire ce qui, normalement, surviendra à plus ou moins longue échéance dans un certain secteur de la technicité grâce à l'analyse de ses états passés et actuels. Jamais elle n'affirme que la tendance dont elle autorise la description et la quantification durera longtemps (ou toujours). Mais à côté de cela, elle peut également être considérée comme une instance prescriptive puisqu'en indiquant de la sorte une direction à suivre, elle assigne du même coup aux laboratoires de recherche un certain nombre d'objectifs à poursuivre et à atteindre dans un intervalle de temps défini. De ce point de vue, où elle assure incontestablement la fonction d'élément catalyseur de l'innovation scientifique et technique, la pseudo loi de Moore enjoint au moins autant qu'elle conjecture. En évaluant, elle encourage donc à réaliser – sinon à dépasser – cela même dont elle se fait l'annonciatrice. Dans son ouvrage *L'intelligence et le calcul*⁸⁵¹, le chercheur en informatique fondamentale Jean-Paul Delahaye n'a pas d'ailleurs pas manqué de rappeler que Gordon E. Moore, lequel joua plusieurs décennies durant un rôle de tout premier plan au sein de l'industrie des semi-conducteurs, avait parfaitement pris acte du caractère « auto-réalisateur » de sa prophétie...

⁸⁵¹ In [Delahaye, 2002], pp. 79-80.

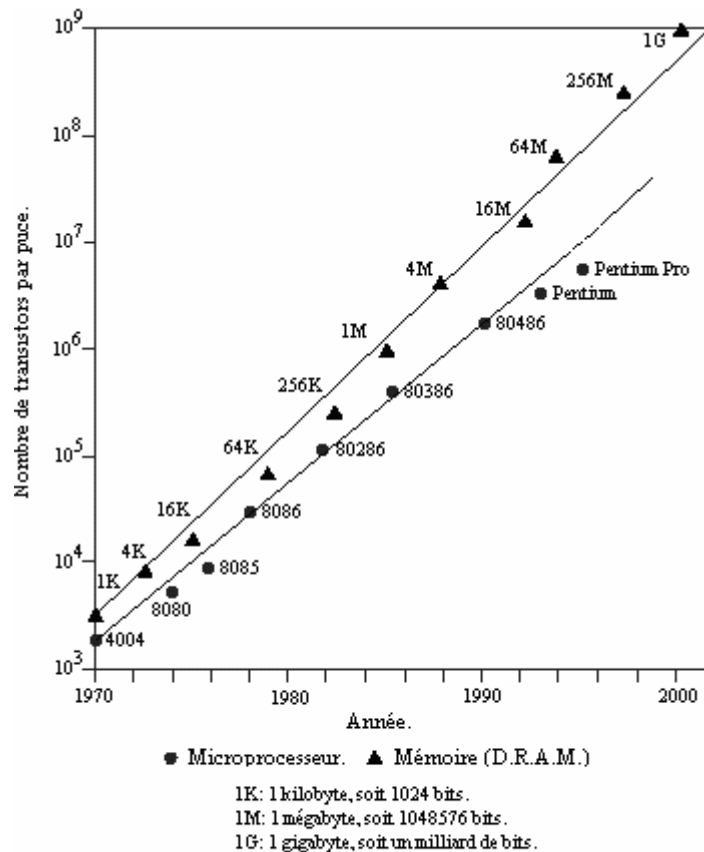


Fig. 43: diagramme illustrant la pseudo loi de Moore (d'après G. E. Moore, 1965-1975).

La « loi » de Moore, nous le disions plus haut, a connu deux versions. Pour être exacts, il nous faudrait en réalité dire trois. Énoncée en 1965, la première d'entre elles pronostiquait un doublement de la complexité des circuits - *i.e.* une multiplication du nombre de leurs composants fondamentaux par deux – chaque année. En 1975, à la lumière d'un corpus de données nécessairement plus étoffé qu'il ne l'était dix ans auparavant, G .E. Moore procéda au réajustement de la fréquence de cette croissance. De douze mois, celle-ci passa alors à vingt-quatre (c'est-à-dire deux ans). Prenant en compte la moyenne de ces deux « lois » ainsi que différents facteurs additionnels, tels la fréquence d'opération des processeurs, des collègues de G. E. Moore reconsidérèrent bientôt cette dernière estimation pour donner naissance à ce qu'il convient d'appeler la version standard de la « loi » de Moore. Cette dernière affirme que « les performances des ordinateurs doublent tous les dix-huit mois ». Comme on l'entend dire de plus en plus souvent, cette troisième « loi » de Moore a tenu bon pendant les trente dernières années. Pour les chercheurs, comme du reste pour les industriels ou les utilisateurs de systèmes informatiques, elle n'a ainsi jamais cessé d'être un outil de prédiction estimable car véritablement précis et fiable. Cependant ni la longévité, ni les succès antérieurs ou contemporains de la « loi » de Moore ne sauraient garantir que la

situation plutôt « confortable » dans laquelle nous nous trouvons toujours aujourd'hui est appelée à durer encore longtemps.

Au fur et à mesure que la densité des composants électroniques par unité de surface s'accroît, les performances des circuits intégrés, à commencer bien évidemment par leur fréquence de fonctionnement, augmentent aussi. Ce phénomène bien connu de tous – puisqu'en définitive nous en sommes tout autant les bénéficiaires que les victimes - s'explique assez aisément. La création des constituants élémentaires des circuits intégrés grâce au procédé de la photolithographie suppose que l'on emploie une certaine échelle de gravure⁸⁵². Chaque réduction appliquée à cette échelle de gravure entraîne une diminution de la distance physique séparant les transistors les uns des autres. Fort logiquement les sous éléments des transistors – par exemple leur source et leur drain – et les espacements qui dissocient ceux-ci se trouvent également affectés par cette modification. Il découle de ceci deux choses : 1°) la distance que les électrons ont à parcourir entre les transistors ou au sein de ceux-ci allant toujours en s'amointrissant, les circuits dont ils sont les composants sont de plus en plus petits et rapides ; 2°) pour reprendre le terme utilisé par G. E. Moore dans son article de 1965, il est possible d'« entasser » de plus en plus de composants – c'est-à-dire finalement de fonctions logiques - sur une même unité de surface. Les circuits intégrés, en plus d'être de plus en plus rapides et minuscules, peuvent donc aussi le cas échéant devenir de plus en plus polyvalents (en intégrant pas exemple des fonctionnalités graphiques ou sonores autrefois gérées par des circuits séparés).

Au jour où nous écrivons les dispositifs que produisent les grands fabricants mondiaux de composants intégrés - *Intel*, *Motorola* et *A.M.D* pour ne citer que les principaux - renferment fréquemment plusieurs dizaines de millions de transistors. Tel était par exemple le cas du microprocesseur P4N (pour *Pentium 4 Northwood*), que la firme *Intel* a présenté publiquement en janvier 2002⁸⁵³. Réalisée en technologie 0,13 micron (ou 130 nanomètres), cette puce à peine plus grande que l'ongle d'un pouce ne comportait pas moins de 55 millions de transistors ! Au mois d'août 2002, la même société a annoncé que ses chercheurs étaient parvenus à mettre au point un nouveau procédé photolithographique permettant de graver des circuits en technologie 0,09 micron (soit 90 nm). Déjà utilisée à cette époque pour concevoir des modules mémoire expérimentaux *S.R.A.M.* capables de performances exceptionnelles, et

⁸⁵² On parlera de « règle de dessin », celle-ci représentant la plus petite longueur réalisable dans le cadre d'une technologie donnée. Dans son ouvrage *Demain le nanomonde*, Jean-Louis Pautrat rappelle par ailleurs qu'en matière de conception de circuits intégrés, la règle de dessin actuelle correspond de fait à la longueur du canal des transistors *M.O.S.F.E.T.S.* (in [Pautrat, 2002], pp.46-47).

⁸⁵³ Commercialisé à la fin de l'année 2000, le *Pentium 4 Willamette* (P4W) était gravé en technologie 0,18 microns.

ce tant en termes de rapidité que de capacité, cette technologie a fait son apparition dans l'industrie des semi-conducteurs dans le courant de l'année 2003. Récemment *Intel* a annoncé que ses équipes de recherches avaient réalisé une nouvelle percée dans le domaine des techniques lithographiques. Baptisée *Extreme Ultraviolet* cette approche basée sur la réflexion – et non la diffusion directe - de faisceaux lumineux émis en lumière ultraviolette extrême (plage des 200-10 nm) devrait permettre la fabrication de puces avec une finesse de gravure de 50 nanomètres dans le courant de la décennie actuelle. Depuis un peu plus d'une décennie maintenant, la firme I.B.M. explore quant à elle de nouvelles techniques de photolithographie basées, entre autres, sur l'emploi de rayons X (domaine électromagnétique de 10 nm à 0,01 nm). En 1999, à l'occasion de la *Photomask Japan Conference* de Yokohama, des prototypes opérationnels de microprocesseurs et de modules mémoire (D.R.A.M. et S.R.A.M.), conçus selon ce principe ont ainsi pu être présentés à des spécialistes du monde entier. D'autres, à l'instar de la compagnie *Bell*, privilégient la microphotolithographie par faisceau d'électrons...

Comme tout un chacun peut sans difficulté s'en rendre compte puisque la presse informatique, désormais florissante, s'en fait régulièrement l'écho, la course à la miniaturisation à laquelle nous assistons depuis presque une trentaine d'années ne paraît pas vouloir connaître de fin. Au contraire. Connaissant déjà un rythme effréné, elle semble n'avoir de cesse de s'accélérer encore. La « loi » de Moore, nous l'avons dit, concerne le devenir d'un phénomène technologique. En l'occurrence celui de l'accroissement du degré de miniaturisation des circuits électroniques et de leurs composants fondamentaux. Elle décrit et prévoit ce que sera ce déploiement, cette croissance. Celle-ci étant par nature exponentielle, on ne s'étonnera guère de ce que la difficulté à réaliser concrètement les objets dont elle pronostique l'existence le soit aussi. A présent que les chercheurs s'apprêtent à quitter l'empire du micrométrique pour explorer les frontières du nanométrique, de nouvelles interrogations, à la fois troublantes et stimulantes, se font graduellement jour. Dans son livre *Demain le nanomonde, Voyage au cœur du minuscule*, le physicien Jean-Louis Pautrat a considéré quelques-unes des questions essentielles que soulevait ce radical changement d'échelle dimensionnelle :

« *La préoccupation de tous les technologues et prévisionnistes est bien d'essayer de deviner si cette loi va rester valable longtemps. Deux logiques s'affrontent. La logique industrielle et technologique prédit que, en y mettant le prix et en y consacrant l'essentiel de l'effort de recherche, il sera possible de fabriquer des transistors de plus en plus petits et de*

plus en plus nombreux pour fabriquer des microprocesseurs d'une puissance inégalée. Mais une autre logique est à l'œuvre, celle des lois physiques qui régissent le fonctionnement des transistors. Dans quelle mesure voudront-elles leur permettre de fonctionner si leurs dimensions flirtent avec le nanomètre ? Pendant combien de générations de transistors accepteront-elles d'accompagner l'évolution de la technologie ? Finalement le principe même des transistors utilisés – les transistors à effet de champ – sera-t-il remis en cause et remplacé par un autre concept, mieux adapté aux futurs microprocesseurs ? Ne peut-on imaginer que l'on fabrique un jour des transistors radicalement différents qui utiliseraient tout simplement des molécules ?⁸⁵⁴ ».

Si Charles Lieber, professeur de chimie à l'Université d'Harvard et cofondateur de la société *NanoSys*, a pu estimer à cinq milliards le nombre – faramineux – de transistors que les processeurs de nos ordinateurs comporteront en 2015⁸⁵⁵, il n'en reste pas moins que, tôt ou tard, à force d'illuminer toujours plus finement les replis les plus intimes de la matière afin de la façonner, nous nous heurterons inmanquablement à de très sérieuses difficultés techniques et théoriques (tout au moins avec les méthodes et les outils qui sont les nôtres à ce jour). La *Semiconductor Industry Association* (S.I.A.), consortium américano asiatique qui regroupe de nombreux acteurs oeuvrant dans le secteur de la production des semi-conducteurs et des matériels informatiques, édite depuis plusieurs années maintenant une *International Technology Roadmap for Semiconductors* (I.T.R.S.). Dans une de ces récentes « feuilles de route » trisannuelles, outil de planification dont l'objectif consiste non seulement à favoriser la concertation entre les différentes organisations participantes mais aussi à leur permettre d'orienter leurs efforts de développement dans des domaines de recherche avancés, il était affirmé que l'industrie du microprocesseur – et des mémoires – se « rapprochait d'une barrière annoncée pour 2013⁸⁵⁶ ». L'échéance paraît donc dangereusement proche où, la « loi » standard de Moore touchant peu à peu aux limites de ses capacités prédictives, il ne nous sera plus possible de nous appuyer entièrement sur elle pour éclairer et baliser notre route. Il va de soi que sa validité empirique ne cessera pas d'être comme ça, soudainement, du jour au lendemain. Dans un premier temps au moins, on observera un ralentissement assez net du rythme auquel le nombre des transistors que comporte un circuit électronique double. De

⁸⁵⁴ In [Pautrat, 2002], p.44.

⁸⁵⁵ Charles Lieber, « Puces lilliputiennes », in *Pour la Science*, n°290, pp. 60-65, décembre 2001.

⁸⁵⁶ Stéphane Raud, « Pourquoi une Roadmap ? », in *Lettre Etats-Unis Micro Electronique*, Publication trimestrielle de la Mission Scientifique et Technologique de l'Ambassade de France aux Etats-Unis, n°25, p. 3, 2001.

l'avis même de Gordon E. Moore, les chances pour que ce rythme passe à quarante-huit mois d'ici une dizaine d'années sont d'ailleurs élevées (ce qui signifie que la « loi » de Moore subira très vraisemblablement une révision à la hausse). Par la suite, les prévisionnistes tendent à penser que ce phénomène s'amplifiera encore. Comme on le sait, de nouvelles approches reposant notamment sur les nanotechnologies et l'exploitation de certaines propriétés microphysiques des particules électroniques font depuis quelques années déjà l'objet d'études poussées en prévision de ce moment qu'on sait être inéluctable. L'*Extreme Ultraviolet Lithography* d'I.B.M., la microphotolithographie par faisceaux électroniques de Bell, mais également l'électronique moléculaire, la spintronique, le *Single Electronic Transistor* (le S.E.T. étant un transistor à un électron), ou encore les calculateurs quantiques et génétiques représentent autant de pistes prometteuses qui nous permettront peut-être de franchir avec succès les obstacles qui nous attendent. L'existence de ces différentes démarches exploratoires d'un très haut niveau de scientificité, toutes entreprises en vue d'étendre toujours plus loin dans l'infiniment petit nos capacités à réaliser les éléments fondamentaux de nos ordinateurs, représente bien évidemment quelque chose de très encourageant. Ainsi, non seulement le prix Nobel de physique Richard Feynman ne se trompait pas quant, à l'occasion d'une conférence prononcée en 1959 devant les membres de l'*American Physical Society*, il avait affirmé qu'il y avait « *plein de place au fond*⁸⁵⁷ », mais encore, il semblerait que nous nous trouvions incessamment en position d'assurer notre pouvoir sur cette « place », ce qui s'y trouve, et ce que notre action industrielle, d'une manière ou d'une autre, nous permettra d'y façonner ou d'y disposer. Toutefois il se pourrait fort que la menace qui pèse véritablement sur nos moyens calculatoires futurs ne provienne pas tant de nos éventuelles incapacités scientifiques et techniques à les concevoir et à les réaliser, mais bien plutôt des difficultés grandissantes que nous rencontrerons pour assurer le financement des équipements et des structures devant permettre leur mise au point et leur production.

Avatar de la « loi » de Moore, la « loi » de Rock – du nom de l'économiste Arthur Rock, lequel contribua pour une large part à l'établissement du capital de départ de la société *Intel* – énonce que regardant l'industrie des semi-conducteurs, le volume des investissements nécessaires à la poursuite du perfectionnement des dispositifs produits ainsi qu'à celui des

⁸⁵⁷ « *There's Plenty of Room at the Bottom, An Invitation to Enter a New Field of Physics* » est le titre d'une célèbre conférence prononcée par Richard Feynman le 29 décembre 1959 au *California Institute of Technology*. Dans ce texte à l'intitulé plutôt évocateur, le grand physicien qu'on présente aujourd'hui volontiers comme le prophète des nanotechnologies envisageait – entre autres exemples particulièrement frappants - la possibilité de stocker les 24 volumes que compte l'*Encyclopaedia Britannica* sur une tête d'épingle, en manipulant ses atomes un par un.

matériels requis pour leur fabrication se voit multiplié par un facteur deux tous les quatre ans. Pour l'année 2004, les spécialistes prévoient que cette industrie pèsera quelques 190 milliards de dollars. Il s'agit là d'une somme proprement colossale dont 10% environ seront réinvestis dans le secteur de la recherche et du développement. Sachant cela, et connaissant aussi la rapidité à laquelle les équipements informatiques se trouvent frappés d'obsolescence tout en continuant à nécessiter encore et toujours plus d'argent pour évoluer et être produits – bref pour répondre comme attendu aux injonctions de la « loi » de Moore - il existe de solides raisons de penser que l'aspect économique jouera un rôle résolument prépondérant dans le ralentissement de la fréquence à laquelle les performances des ordinateurs doublent.

De fait s'agissant de la « loi » de Moore et de sa « fin » annoncée, on s'est très souvent attaché à mettre l'accent sur les limites indépassables que les lois physiques régnant à l'échelle de l'infiniment petit imposeraient tôt ou tard aux chercheurs. Ceci bien sûr relève d'une préoccupation fort légitime et ce ne sont pas les différents travaux auxquels nous avons fait brève allusion plus haut qui démentiront le fait que les scientifiques, avec les extraordinaires outils que la science actuelle met à leur disposition, s'évertuent par tous les moyens à repousser le moment où surviendra cette échéance. Maintenant il apparaît également nécessaire de ne pas perdre de vue que certaines des solutions proposées non pour demain, mais pour après-demain, ne constituent pas un simple prolongement des techniques photolithographiques auxquelles nous recourons depuis plusieurs décennies pour forger ce qui forme bel et bien le cœur de nos machines. En conséquence, et pour commencer, il n'est absolument pas exclu qu'à terme nous soyons contraints d'abandonner la modalité de fabrication dite *top down* ou descendante – laquelle, classique, consiste finalement à « tailler dans la masse » les composants électroniques dont nous avons besoin - pour passer à une approche productive de type ascendante (ou *bottom up*). Ici, à l'inverse de la précédente méthode, il s'agira de *bâtir* ces mêmes éléments en partant du « bas », c'est-à-dire en les élaborant brique élémentaire par brique élémentaire (*e.g.* par synthèse chimique ou assemblage atomique dans le cas des nanotechnologies). Les enjeux et les complications dont est porteur ce changement d'échelle ne sont pas seulement technologiques ou méthodologiques. Certes le passage de l'ordre micrométrique à l'ordre nanométrique exigera peut-être de nous que nous repensions en profondeur la façon même dont nous concevons la notion de composant électronique en général, et celle de transistor en particulier. Quant aux accès les plus « exotiques » – songeons par exemple à la spintronique qui utilise le spin de l'électron pour représenter, stocker, et traiter l'information – sans doute nous conduiront-ils à opérer en la matière un changement de paradigme encore plus radical. On imagine avec cela

que les bouleversements technologiques annoncés, et le bond en avant que ceux-ci provoqueront certainement dans le domaine des performances des machines, ne seront pas des moins spectaculaires. Cependant l'aspect le plus immédiatement inquiétant du problème ne réside peut-être pas dans les difficultés technoscientifiques qui scandent le déploiement de cette nouvelle ligne évolutive aux ramifications multiples. Le fait qu'il se soit souvent trouvé remis à l'arrière-plan de la scène au profit, si l'on ose dire, des obstacles concrets que rencontrent ou rencontreront les chercheurs ne doit ainsi pas nous faire perdre de vue le rôle éminemment limitatif – et donc essentiel – qui reviendra ici à l'économie. Lors d'une conférence donnée au début du mois de mars 1998 à L'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris, le physicien Claude Weisbuch a rappelé le caractère plutôt singulier de la situation vers laquelle nous nous acheminons à grands pas : « ... *la croissance du coût des usines est vertigineuse et supérieure à la croissance de la vente des semi-conducteurs. Alors que le marché mondial des circuits intégrés est de l'ordre de 140 milliards de dollars [190 aujourd'hui], une usine moderne coûte environ 2 milliards de dollars, et on se dirige rapidement vers des usines à 10 milliards l'unité alors qu'elles se périment en trois à cinq ans*⁸⁵⁸. ».

Suivant ce constat qui illustre parfaitement ce qu'énonce la « loi » de Rock, il arrivera nécessairement un moment où, à moins que nous ne soyons disposés à consacrer l'intégralité des ressources économiques terrestres pour lui permettre de poursuivre son activité, l'industrie des semi-conducteurs ne se trouvera plus en mesure de concevoir et de fabriquer les circuits intégrés au rythme auquel elle le fait depuis maintenant plus de trente ans.

Se présentant sous la forme d'une courbe exprimant la densité de transistors par circuit intégré en fonction du temps, la « loi » standard de Moore accompagne et guide la croissance de l'industrie des semi-conducteurs et de l'informatique depuis l'année 1965. Autant dire depuis que le circuit intégré existe. Aujourd'hui, on sait que la cadence de développement qu'elle impose à ces deux secteurs clefs de l'activité économique mondiale est sur le point de subir un infléchissement notable. En l'occurrence, et au moins dans un premier temps, il s'agira d'un ralentissement sensible provoqué non par notre incapacité à surmonter des limitations physiques fondamentales, mais par des contraintes générales relevant directement de la sphère économique. Les réponses que nous serons alors capables d'apporter à ce problème inédit – à *ces problèmes inédits* devrions-nous écrire car tôt ou tard nous nous

⁸⁵⁸ Claude Weisbuch, *La physique et les enjeux contemporains*, conférence prononcée dans le cadre de la Journée Recherche de l'E.N.S.C.P., 5 mars 1998.

heurterons fatalement aux lois de la matière - joueront assurément un rôle décisif dans la détermination des figures de l'informatique de demain et d'après-demain.

Troisième point que nous souhaiterions à présent considérer: la création, dans le courant de l'année 1966, de la cellule mémoire à transistor unique (*single transistor memory cell* en anglais). Ce dispositif électronique miniature auquel on fait d'ordinaire assez peu souvent référence occupe pourtant une place de tout premier plan dans l'histoire de l'informatique puisque c'est grâce à lui que la mise au point des mémoires dynamiques à accès aléatoire en semi-conducteur (les *Dynamic Random Access Memory* ou D.R.A.M.), a été rendue possible. Diplômé du *Carnegie Institute of Technology*, le Dr. Robert Dennard – son inventeur - a rejoint la *Research Division* de la société I.B.M. en 1958. Là, pendant cinq ans, il a approfondi ses connaissances sur les circuits électroniques (spécialement ceux construits pour les applications logiques et les mémoires d'ordinateurs), et s'est également formé aux techniques de communication des données. En 1963, il a quitté la Division Recherches d'I.B.M. pour intégrer une des équipes du Thomas J. Watson *Research Center*. Cette dernière oeuvrait dans le domaine de la microélectronique et travaillait notamment à la conception de circuits intégrés à transistors à effet de champ M.O.S.

C'est en 1966, quelques mois après avoir assisté à une conférence donnée par une équipe de chercheurs d'I.B.M. sur le thème des mémoires à films magnétiques, que R. Dennard eut l'idée de la cellule mémoire à transistor unique. A cette époque, rappelons-le, la grande majorité des ordinateurs en service étaient équipés d'une mémoire centrale à anneaux de ferrite. Cette technologie était alors dominante. D'autres sortes de dispositifs destinés eux aussi à assurer le stockage interne de l'information - mais offrant un volume et une masse inférieurs à ceux qui caractérisaient habituellement les matrices à tores – se trouvaient bien entendu à l'étude chez les grands constructeurs d'ordinateurs. Parmi ceux-ci figuraient ainsi des mémoires en semi-conducteur constituées de cellules individuelles formées de six transistors bipolaires et des appareils reposant sur l'utilisation de minces films magnétiques. Nous l'avons dit, c'est cette dernière catégorie de systèmes qui devait inspirer Robert Dennard pour la création de la cellule mémoire à transistor unique. Pour le décrire très schématiquement, le prototype de cellule mémoire à film magnétique exhibé par le groupe de recherches I.B.M. à la présentation duquel le scientifique assista au cours de l'année 1966 consistait en une minuscule pièce de matériau magnétique flanquée de deux fils électriques de contrôle. Ce petit assemblage qui en réalité n'était rien d'autre qu'une sorte de brique élémentaire, permettait d'écrire, de stocker et de lire un bit d'information (à partir de cet élément fondamental, il s'agissait ensuite de bâtir un bloc mémoire pourvu d'une capacité

d'enregistrement suffisante pour stocker programmes et données). Très intéressé par les problèmes théoriques et techniques engendrés par la fabrication des mémoires d'ordinateur - notamment ceux, incontournables et liés, que représentaient une masse, un encombrement et un coût par bit beaucoup trop importants - le scientifique qui travaillait déjà à la conception de cellules (ou « points) mémoires à six transistors d'une capacité de un bit commença à réfléchir au sujet de ce qui lui avait été donné à voir au cours de cette conférence, à savoir un dispositif miniature unitaire autorisant lui aussi le stockage d'un seul « atome » d'information. Quelques mois après la tenue de cet événement, R. Dennard put ainsi exposer à sa hiérarchie une nouvelle façon de concevoir les mémoires centrales d'ordinateurs. Une façon, qui, en vérité, devait avoir sous peu d'immenses répercussions sur l'ensemble de l'industrie informatique et de son marché⁸⁵⁹. Cette approche révolutionnaire, dont, soit dit en passant, le principe ne manquera certainement pas de nous paraître bien peu compliqué aujourd'hui, consistait à écrire, stocker et lire un bit en chargeant ou en déchargeant un condensateur. Le contrôle de ces différentes opérations, lui, était assuré par un transistor à effet de champ M.O.S. Pour simple qu'elle puisse être, la cellule ou « point mémoire » que nous venons de décrire se trouve au cœur de toutes les *Dynamic Random Access Memory* construites dans le monde, y compris bien sûr celles qui, de nos jours, autorisent le stockage d'une quantité de données supérieure au gigaoctets⁸⁶⁰. Quand Robert Dennard proposa cette microarchitecture, des mémoires en matériau semi-conducteur réalisées au moyen de transistors bipolaires étaient déjà en train de voir le jour dans certains laboratoires de recherche industriels ou universitaires⁸⁶¹. De fait, et comme nous avons eu l'occasion de le voir antérieurement, I.B.M., en janvier 1968, se distingua en introduisant le premier sur le marché un ordinateur de série pourvu d'une mémoire interne secondaire en matériau semi-conducteur (cette machine, le *Model 85*, appartenait à la famille de compatibles *System/360*). Possédant une capacité de 64 bits, renfermant quelques 664 composants électroniques, cette mémoire cache ultrarapide construite en technologie bipolaire servait de tampon (de zone temporaire de stockage), entre l'unité centrale de la machine, et sa mémoire principale (en l'espèce une matrice à tores de ferrite). La voie novatrice ouverte ici par I.B.M. fit rapidement école et, bientôt, c'est-à-dire à l'orée des années soixante-dix, de plus en plus d'ordinateurs pourvus d'unités centrales de

⁸⁵⁹ En 1968 l'U.S. *Patent & Trademark Office* a décerné le brevet n° 3387286 à Robert Dennard, et à l'I.B.M. T.J. *Watson Research Center*. Ce brevet couvre la cellule D.R.A.M. à un transistor et un condensateur ainsi que le concept de cellule D.R.A.M. à trois transistors.

⁸⁶⁰ Celle-ci est fréquemment appelée « 1T 1C D.R.A.M. *cell* », ce que l'on peut traduire par « cellule D.R.A.M. à un transistor et un condensateur ».

⁸⁶¹ On pensera par exemple au docteur Dr. Thomas A. Longo, de la compagnie *Transitron*, qui mit au point une des premières R.A.M. bipolaires en 1966. La capacité d'enregistrement de ce prototype était de 16 bits.

traitement *et* de mémoires principales en circuits intégrés firent leur apparition. Il doit toutefois être souligné que dans un premier temps au moins, les circuits qui composaient les machines équipées de la sorte furent confectionnés avec des composants bipolaires, non avec des transistors à effet de champ M.O.S. A ce jour pourtant les premiers ne sont plus utilisés pour confectionner les mémoires principales des ordinateurs. Les M.O.S.F.E.T. les ont en effet complètement remplacés dans le cadre de cette application.

Les questions que nous nous trouvons en droit de poser à partir de ce point sont alors les suivantes. Nous avons précisé qu'aujourd'hui les mémoires principales des ordinateurs étaient toutes fabriquées au moyen de transistors M.O.S.F.E.T. (selon le modèle architectural proposé par R. Dennard en 1966 ou sur des variations de celui-ci). Dès lors comment expliquer qu'en l'espace de quelques années à peine – tout ou presque se jouera en effet au cours de la décennie 70 - nous soyons passés d'un emploi à la fois « pionnier » et majeur de la technologie bipolaire à une utilisation croissante, puis finalement ultra dominante, de la technologie M.O.S. et ce non seulement pour la fabrication des mémoires informatiques mais aussi pour celle, un peu plus tardive, des microprocesseurs ? Quel(s) intérêt(s) les grands constructeurs informatiques pouvaient-ils donc trouver à substituer de la sorte un type de composant élémentaire connu pour sa fréquence de commutation relativement peu élevée, à un autre, réputé pour opérer au contraire avec une très grande rapidité ? En quoi – puisqu'en définitive les questions qui précèdent trouvent leur origine et viennent d'une certaine manière se résumer en cela – résidaient donc les avantages offerts par la cellule mémoire à transistor M.O.S. qu'inventa Robert Dennard ? Enfin quelles répercussions son utilisation grandissante a-t-elle eu sur l'industrie informatique étant bien entendu qu'à l'époque dont il est question, la technologie dominante en matière de mémoires centrales était celle des matrices à tores de ferrite ?

Avant de tenter d'apporter des éléments de réponse probants à ces interrogations il nous apparaît impératif, pour la cohérence du propos, d'évoquer à présent ces deux événements déterminants de l'année 1968 que furent, d'une part, l'invention de la *Silicon Gate Technology* par Federico Faggin et, d'autre part, la fondation de l'*Integrated Electronic Corporation*⁸⁶². Ce seront là les deux derniers points que nous examinerons avant de répondre aux questions qui viennent d'être soulevées.

C'est le physicien d'origine italienne Federico Faggin qui mit au point la *Silicon Gate Technology*, durant l'année 1968, quelques mois seulement après qu'il eut rejoint le

⁸⁶² Cette compagnie est mieux connue de tous sous le nom d'*Intel*, un terme obtenu en procédant pour ainsi dire au télescopage des mots « *Integrated* » et « *Electronic* ».

laboratoire R&D de *Fairchild Semiconductors*, à Palo Alto (Californie, U.S.A.). Peut-être mieux connu pour le rôle clef qu'il joua dans la création de l'*Intel 4004*, le premier microprocesseur de l'histoire, ou bien encore comme co-fondateur de la société *Zilog*, le fabricant de la très célèbre puce logique Z80 qui devait équiper bon nombre de micro-ordinateurs 8 bits au début des années quatre-vingt, F. Faggin est aussi à l'origine de la « technologie de la grille de contrôle en silicium », une des innovations techniques qui permirent aux transistors à effet de champ M.O.S. de prendre définitivement le dessus sur les composants bipolaires dans le courant des années soixante-dix. Avant d'obtenir son titre de docteur en physique à l'Université de Padoue, en 1965, Federico Faggin travailla environ deux ans (de 1959 à 1961), en qualité d'assistant ingénieur pour le compte de la firme *Olivetti* (au laboratoire de recherche de Borgolombardo, près de Milan). C'est dans ce cadre que le savant commença à se familiariser vraiment avec les transistors et l'électronique digitale. C'est également chez *Olivetti* qu'il eut l'opportunité de participer à la conception et à la construction d'un « petit » ordinateur à composants discrets⁸⁶³. Federico Faggin était alors âgé de 19 ans et d'après ce qu'il confia oralement à Rob Walker⁸⁶⁴ lors d'une interview réalisée le 3 mars 1995, cette expérience professionnelle le détermina à s'orienter par la suite vers l'étude approfondie des mathématiques et de la physique. Il considérait en effet qu'une excellente maîtrise de ces disciplines fondamentales entre toutes représentait un socle aussi solide qu'indispensable pour continuer à œuvrer dans la voie où il avait choisi de s'engager. Après l'obtention de son doctorat, F. Faggin rejoint le consortium italo-américain *Societa Generale Semiconduttore-Fairchild* pour y prendre la direction d'un groupe qui travaillait sur les composants M.O.S. et le design de circuits électroniques. Fort de ces nouveaux acquis, il quitta cette compagnie et sa terre natale au mois de février 1968 afin d'intégrer le laboratoire R&D de *Fairchild Semiconductor*, à Palo Alto. Là, s'appuyant sur des travaux qu'avait préalablement réalisés le physicien Tom Klein, le savant italien développa la *Silicon Gate Technology* (S.G.T.). A cette époque, la grille de contrôle des transistors à effet de champ M.O.S. était encore constituée d'une très fine couche d'aluminium (comme l'indique très

⁸⁶³ L'adjectif « petit », que nous reprenons à dessein ci-dessus, a été employé par Federico Faggin lui-même dans une conférence qu'il donna en octobre 2001, afin de qualifier l'ordinateur *Olivetti* à l'élaboration duquel il travailla jeune homme. De cette machine nous ne savons que très peu de choses si ce n'est qu'elle était « petite » - de la taille d'une armoire tout de même -, qu'elle était transistorisée et qu'elle disposait d'une mémoire de 4000 bytes.

⁸⁶⁴ Témoin de l'épopée de l'industrie des semi-conducteurs et interlocuteur privilégié de ses acteurs majeurs en tant qu'initiateur du projet *Silicon Genesis* (lequel vise à préserver l'histoire de la *Silicon Valley* en recueillant notamment les témoignages oraux de ceux qui firent sa légende), l'américain Rob Walker a travaillé successivement comme ingénieur chez *Fairchild Semiconductor* et *Intel*, puis s'en est allé co-fonder la société *L.S.I. Logic*, en 1981.

clairement la première lettre de l'acronyme M.O.S.F.E.T., qui signifie *Metal*). En remplaçant cette grille d'aluminium par une électrode de silicium polycristallin, laquelle devait bien entendu toujours accomplir la même fonction de contrôle que l'ancienne microstructure, Federico Faggin réussit à mettre au point un transistor à effet de champ bien plus performant que ne l'avaient jamais été les composants à grille métallique. Comparativement en effet, ceux-ci étaient de trois à quatre fois moins rapides que le nouveau dispositif tandis que leur fabrication, elle, réclamait une quantité deux fois plus importante de silicium. Il nous faut encore ajouter à ceci le fait que les M.O.S.F.E.T. « traditionnels » étaient en général moins fiables que leurs équivalents à grille en semi-conducteur. Invité en tant que conférencier au *Microprocessor Forum* qui s'est déroulé au mois d'octobre 2001 dans la ville de San José, Federico Faggin a profité de son intervention pour revenir à la fois sur l'histoire des circuits intégrés et sur les moments saillants qui sont venus ponctuer sa carrière de chercheur (moments au rang desquels figuraient évidemment en très bonne place le design et la fabrication du microprocesseur *Intel 4004*, en 1971). A cette occasion il n'a donc pas manqué d'évoquer les perfectionnements majeurs que l'introduction de la *Silicon Gate Technology* rendit possibles alors que la décennie soixante touchait quasiment à sa fin:

« Avec la grille en silicium, rappelait le savant, il devint possible de fabriquer des circuits intégrés 3 à 5 fois plus rapides, 50 à 100% plus denses, offrant une plus grande fiabilité ainsi qu'une moindre sensibilité au phénomène de perte de courant, qu'on ne le pouvait avec la technologie des grilles en aluminium.⁸⁶⁵ ».

A lire ceci on comprend sans peine en quoi la « technologie de la grille de contrôle en silicium » constitua une avancée décisive pour l'industrie des semi-conducteurs. Avec la S.G.T. se concrétisa en effet la possibilité de créer des transistors à effet de champ minuscules, capables de commencer à rivaliser avec les transistors bipolaires en termes de vitesse d'opération. La fiabilité et la rapidité de ces composants améliorés, mais aussi et surtout la densité d'intégration autorisée désormais par la technologie novatrice sur laquelle ils reposaient, représentèrent autant de facteurs décisifs pour le devenir de la filière des semi-conducteurs et, comme par extension « naturelle », celui de l'informatique. La *Silicon Gate Technology* développée chez *Fairchild Semiconductor* par Federico Faggin, puis les travaux

⁸⁶⁵ F. Faggin, *The Birth of the Microprocessor - My Recollections*, article présenté lors du *Microprocessor Forum* de San José, Californie, 15 octobre 2001. Une retranscription de l'intégralité de la conférence prononcée par F. Faggin est disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://www.intel4004.com/speech.htm>.

capitaux entrepris sensiblement à la même période par Robert Dennard et son équipe chez I.B.M. – nous allons procéder sous peu à l'examen de ceux-ci - permirent aux M.O.S.F.E.T. de s'imposer peu à peu face aux transistors bipolaires si bien qu'en 1970-72, des mémoires intégrées et des circuits logiques faisant appel à ces éléments et exhibant des caractéristiques et des performances inédites commencèrent à faire leur apparition.

Mise à part l'invention de la S.G.T., l'année 1968 fut aussi et entre autres choses marquée par la naissance de la compagnie *Intel*. Federico Faggin, qui rejoint les rangs de cette entreprise en avril 1970 afin d'assurer le développement d'un assortiment de douze puces logiques spécialisées que le fabricant japonais de calculateurs électroniques *Busicom* avait commandé à la jeune société, a rappelé à ce sujet une chose primordiale dans son discours d'octobre 2001. Ainsi, parmi les membres fondateurs et les premiers employés d'*Intel*, figuraient une majorité d'anciens de *Fairchild Semiconductor*. Au nombre de ces derniers étaient notamment Leslie Vadasz et Andy Grove, deux hommes qui pour l'avoir côtoyé pendant plusieurs mois au centre *Fairchild* de Palo Alto, possédaient une assez bonne connaissance des travaux de recherche du scientifique italien. De par son inhabituelle capacité à innover *Intel*, une société spécialisée à l'origine dans la fabrication de mémoires en matériau semi-conducteur a joué un rôle plus que décisif – l'expression n'est certainement pas exagérée - dans la formation de l'informatique moderne, c'est-à-dire de l'informatique telle que nous la connaissons à ce jour. Nul par conséquent ne saurait s'étonner du fait que cette entreprise au succès littéralement planétaire, et à laquelle nous allons à présent nous intéresser, ait fait sienne la *Silicon Gate Technology* dès le départ.

Robert N. Noyce et Gordon Moore, le « découvreur » de la « loi » éponyme, sont les fondateurs de la société *Intel*⁸⁶⁶. Cette firme qui aujourd'hui a accédé au statut de multinationale figure sans nul doute possible parmi les plus renommées – et aussi les plus riches - de la planète. Rappelons qu'en juillet 1968, époque où elle fut constituée, elle ne comptait en tout et pour tout qu'une douzaine d'employés. En raison de cela, nous serions volontiers séduits par l'idée qui consiste à voir dans la réussite extraordinaire d'*Intel* le symbole par excellence de la montée en puissance et des transformations phénoménales que l'informatique a connues – entre autres grâce à l'action de cette société - depuis les années 1974-75. Bien qu'il se soit agi ici de leur première véritable expérience en tant que créateurs et dirigeants d'entreprise, les deux hommes, outre le fait qu'ils se connaissaient bien pour

⁸⁶⁶ On n'oubliera surtout pas de mentionner le « troisième » homme d'*Intel*, Andy Grove. Après être sorti diplômé de l'Université de Berkeley en 1963, le Docteur Grove rejoignit la branche Recherche et Développement de *Fairchild Semiconductor*. Il accéda au poste de Directeur Assistant de ce département en 1967 avant de démissionner en 1968, en même temps que Gordon E. Moore et Robert N. Noyce.

avoir travaillé côte à côte une année durant au *Shockley Semiconductors Laboratory*, ne faisaient pas à proprement parler figure de premiers venus au sein de l'industrie des semi-conducteur. Dans les années 1958-59, Robert N. Noyce, qui venait de quitter l'entreprise de Williams S. Shockley en compagnie de Gordon Moore et de six autres « traîtres » pour rejoindre incontinent la toute jeune division semi-conducteurs de *Fairchild*, conçut en effet un circuit intégré six mois seulement après que l'ingénieur Jack St Clair Kilby, de la *Texas Instruments*, ait eu la même idée, l'ait concrétisée et ait immédiatement déposé une demande de brevet auprès des autorités compétentes. En dépit de l'avance dont disposait ici Jack S. Kilby, c'est pourtant à R. N. Noyce et à son employeur que l'*United States Patent & Trademark Office* décerna le brevet correspondant à cette invention⁸⁶⁷ au mois d'avril 1961. Une querelle de « paternité technologique » s'ensuivit aussitôt qui donna lieu comme nous avons déjà eu l'occasion de le mentionner à une longue bataille légale. En 1966 *Fairchild Semiconductors* et *Texas Instruments* – laquelle société, entre-temps, avait également obtenu un brevet pour le circuit intégré – parvinrent toutefois à formuler un compromis reconnaissant à J. S. Kilby et à R. N. Noyce un rôle d'égale importance dans l'invention du circuit intégré. Outre cela, cet arrangement prévoyait aussi que les deux compagnies pourraient désormais procéder à l'exploitation « croisée » des droits industriels qu'elles détenaient respectivement. Selon les historiens Michael Riordan et Lillian Hoddeson, certains des événements qui advinrent ensuite, notamment l'attitude « courtisane » adoptée par Wall Street ainsi que les « grossières erreurs managériales⁸⁶⁸ » commises par les responsables de *Fairchild Camera and Instruments* (la maison mère de *Fairchild Semiconductors*), poussèrent R. N. Noyce et G. Moore à quitter leur employeur commun au début de l'année 1968. C'est au mois de juillet de cette même année que les deux scientifiques créèrent *Intel Corporation* avec leur collègue Andy Grove.

Trois ans avant que l'équipe de recherches dirigée par l'ingénieur Marcian E. Hoff ne conçoive le premier microprocesseur de l'histoire – le fameux circuit *i4004* – la jeune société *Intel* avait démarré son activité économique en fabricant des puces mémoires informatiques hautement intégrées. L'objectif que s'étaient dès l'origine assigné les anciens employés de *Fairchild Semiconductors* était de ce fait on ne peut plus évident. Pour eux, à court ou moyen

⁸⁶⁷ Rappelons s'il est encore besoin que la version du circuit intégré mise au point par Robert R. Noyce en janvier 1959 faisait appel au procédé planaire de Jean Hoerni (*Fairchild Semiconductor*), alors que bien évidemment ce n'était pas le cas du dispositif imaginé par J. S. Kilby en juillet 1958.

⁸⁶⁸ Les termes employés exactement par les deux épistémologues américains sont « ...*dissatisfied with the management antics of their parent company... Moore and Noyce left...to form another new semiconductor firm* ». On rendra peut-être mieux le sens du mot « *antics* » par « bouffonneries » ou « singeries ». In [Riordan et Hoddeson, 1997], pp. 283-284.

terme, les mémoires d'ordinateurs en matrices à tores étaient nécessairement appelées à être remplacées par des dispositifs en semi-conducteur. Alors que la concurrence dans ce secteur précis d'activité était encore relativement embryonnaire, il fallait chercher à tirer au mieux profit de cette situation idéale ce qui signifiait anticiper l'évolution à venir – voire même s'efforcer de la « catalyser » - en mettant au plus vite sur le marché des mémoires de ce genre. Parce que cela illustre parfaitement « l'état de l'art » de cette époque charnière tout de même que les incertitudes qui pesaient quant à la voie technologique particulière sur laquelle il conviendrait de s'engager une fois le moment venu, il est très intéressant de noter qu'à ses débuts, la société *Intel* avait recours à deux procédés de fabrication différents pour réaliser ses mémoires en silicium. Le premier reposait sur l'utilisation de « transistors Schottky », éléments bipolaires ainsi nommés car ils incorporent entre leur base et leur collecteur une diode Schottky (c'est-à-dire une jonction métal silicium dopée N caractérisée par un temps de recouvrement très bref, ce qui permettait d'accélérer la sortie de l'état saturé). C'est avec cette sorte de transistors que le circuit intégré *i3101*, premier produit commercialisé par *Intel* et première véritable puce mémoire de l'histoire – en tout cas cette qualité lui est-elle fréquemment reconnue par de nombreux spécialistes du domaine - fut élaboré. Appartenant à la catégorie des *Static Random Access Memory* et introduit un an à peine après la création d'*Intel*, ce circuit, à l'instar de la mémoire tampon de l'I.B.M. *System/360 Model 85*, était doté d'une capacité de stockage modeste (64 bits organisés en 16 mots de 4 bits). Peu performante au regard de son coût qui restait tout de même relativement élevé, cette puce « pionnière » ne reçut qu'un accueil modéré de la part de la très grande majorité des constructeurs d'ordinateurs, lesquels, encore fort circonspects à l'égard des mémoires intégrées, étaient coutumiers des matrices en tores de ferrite, dispositifs d'enregistrement certes plus lents, mais assurément moins chers et plus fiables. Le circuit *i3101* fut bientôt suivi par une S.R.A.M. de 256 bits de capacité, la puce *i1101*⁸⁶⁹. A la différence tout à fait notable de son prédécesseur, les composants fondamentaux de ce circuit mémoire n'étaient pas des éléments bipolaires mais des *transistors à effet de champ* M.O.S. (des P.M.O.S. plus exactement). Affirmer comme nous venons tout juste de le faire que le circuit mémoire *i3101* était le *prédécesseur* de la puce *i1101* constitue en vérité un abus de langage qui, pour être léger, n'en est pas moins susceptible de venir jeter le voile sur un aspect important des choses.

⁸⁶⁹ Le codage utilisé par *Intel* pour nommer ses circuits intégrés reposait sur l'utilisation d'une suite de quatre chiffres. Les numéros des circuits formés de composant P.M.O.S. commençaient par un « 1 » (un « 2 » pour les transistors N.M.O.S.), tandis que ceux des circuits à composants bipolaires débutaient par un « 3 ». Quant le deuxième chiffre de la série était un « 1 », cela indiquait que l'on avait affaire à une R.A.M. (un « 2 » à un contrôleur, un « 3 » à une *Read Only Memory*, etc.). Enfin, les deux derniers chiffres servaient à identifier le circuit au sein de la classe de dispositifs à laquelle il appartenait.

Chronologiquement, il est exact que le *i3101* fit bel et bien son apparition sur le marché américain quelques temps avant le *i1101*. Cependant il convient de rappeler à nouveau que les deux projets furent entrepris *simultanément* puis développés de manière *parallèle*. Que les dirigeants d'*Intel* aient ainsi pris la décision de démarrer leur activité non pas avec une, mais avec deux sortes de *Static Random Access Memory* - donc avec deux processus de fabrication distincts et autant de difficultés et de dépenses à supporter - ne peut évidemment pas s'expliquer par le fait qu'une demande préexistait déjà pour l'une et l'autre de ces deux catégories de produits. Tout au contraire. Plongés dans l'expectative quant à l'accueil qui serait réservé à leurs mémoires en semi-conducteur, mais aussi incertains vis-à-vis du problème consistant à déterminer quel type de circuits (S.R.A.M. bipolaire ou S.R.A.M. à transistors M.O.S.), pourrait être introduit le premier sur le marché, ils optèrent en définitive pour une solution « globale » - à savoir fabriquer en même temps les deux sortes de mémoires -, seule capable d'apporter une réponse à une partie au moins de leurs interrogations. Il reviendrait ensuite aux acheteurs de décider. De fait si le circuit intégré à transistors bipolaires *i3101* fut effectivement la première mémoire en semi-conducteur distribuée par *Intel*, il ne rapporta que peu d'argent à la jeune société. Son deuxième produit, la S.R.A.M. *i1101* à composants M.O.S., connut fort heureusement pour elle un peu plus de réussite. Bien que le concept de mémoire en semi-conducteur se soit parfois heurté à d'assez fortes résistances au sein de certaines grandes entreprises informatiques ou électroniques à l'orée des années soixante-dix - L. J. Sevin, ingénieur à la *Texas Instruments* et concepteur d'une S.R.A.M. à transistors M.O.S. de 256 bits expérimentale eut par exemple à batailler avec sa hiérarchie pour faire valoir sa création tant ses supérieurs étaient convaincus que l'avenir appartenait sinon aux films mémoire magnétiques, du moins aux S.R.A.M. à éléments bipolaires - il se trouvait quant même quelques firmes, telles *Honeywell*, pour prendre le risque d'y croire un tant soit peu. Dans le courant de l'année 1969 William Regitz, un ingénieur qui travaillait pour ce constructeur d'ordinateurs, démarcha les compagnies américaines de composants en semi-conducteur afin de leur proposer de participer au co-développement d'une mémoire *dynamique* basée sur une nouvelle cellule mémoire que son équipe et lui avaient mise au point. Parmi toutes les sociétés avec lesquelles il prit contact, *Intel* se montra d'emblée la plus intéressée par le projet de l'employé d'*Honeywell*. C'est donc assez rapidement que les deux compagnies - moyennant la signature d'un contrat d'un montant de 50000 dollars - entamèrent une collaboration en vue de le concrétiser. Le résultat de ce travail réalisé avec

Joël Karper, d'*Intel*, fut le circuit intégré *i1102*⁸⁷⁰. Comme le signale la première paire de chiffres de son identifiant numérique, il s'agissait là d'une mémoire à accès aléatoire constituée de transistors à effet de champ P.M.O.S. Quant aux deux derniers chiffres de cette même série, en fait des ordinaux, ils servaient à indiquer que cette puce « succédait » au circuit *i1101* au sein de la famille des R.A.M. produites par *Intel*. En dépit du caractère contigu de leurs codes d'identification, les circuits *i1101* et *i1102* étaient très différents l'un de l'autre. Ainsi qu'il a déjà été dit, le premier de ces dispositifs appartenait à la catégorie des *Static Random Access Memory*, c'est-à-dire au groupe des mémoires à accès aléatoire *statiques* (l'expression « *non rafraîchie* » est quelquefois usitée en lieu et place de ce dernier terme), tandis que le second était une *Dynamic Random Access Memory*, autrement dit une mémoire à accès aléatoire *dynamique* (ou, si l'on préfère, « *volatile* »). Puisque les circuits *i1101* et *i1102* avaient en partage la même modalité d'accès aux données – on sait par conséquent en quoi ils peuvent être dits technologiquement proches – on s'interrogera naturellement sur ce qui permet de faire le départ entre eux. Qu'est-ce donc, alors, qui discriminait ou individualisait ces puces ou, si l'on accepte de reformuler cette question en des termes plus généraux, en quoi S.R.A.M. et D.R.A.M. différaient-elles – et différent-elles – fondamentalement ?

Répondre à cette interrogation exige que nous considérions ces deux circuits, et par extension les catégories auxquelles ils appartiennent, selon deux perspectives complémentaires : celle de leur mode opératoire d'abord, puis celle de leur cellule électronique de base. En procédant de la sorte, c'est-à-dire en considérant tour à tour la manière dont elles fonctionnent et leur architecture intime, il nous sera possible de comprendre pourquoi ces deux familles de mémoires ont pu transformer radicalement l'industrie informatique, tout de même que le rapport de l'homme à l'ordinateur, au cours des années soixante-dix. Nous trouverons également en mesure de montrer pour quelles raisons les D.R.A.M. se sont peu à peu imposées, et ce au détriment des S.R.A.M. Comme nous avons eu l'occasion de le préciser un peu plus haut, l'acronyme S.R.A.M. veut dire *Static Random Access Memory*. Cette expression, une fois traduite, signifie « mémoire statique à accès aléatoire ». Une mémoire à accès aléatoire, rappelons-le, est une mémoire dans laquelle n'importe quel emplacement de stockage individuel, et par là même n'importe quel bit d'information, peut être accédé (*i.e.* écrit, lu, effacé), dans n'importe quel ordre. Le fait d'être

⁸⁷⁰ Les deux hommes signèrent ensemble un article, « A Three Transistor Cell, 1024 bits, 500NS MOS RAM », présenté lors de l'I.E.E.E. *International Solid-State Circuits Conference* qui se tint du 18 au 20 février 1970 dans la ville de Philadelphie.

statique, pour autant qu'une telle mémoire se trouve effectivement réalisée sous la forme d'un circuit intégré, signifie que celle-ci, sans adjonction d'une circuiterie spécifique, peut conserver intactes les données informatiques qu'elle contient tant que la source électrique qui l'alimente n'est pas interrompue. En ce sens, et en ce sens seulement⁸⁷¹, elle est susceptible d'être qualifiée de « *non volatile* ». A l'inverse les mémoires *dynamiques* à accès aléatoire (D.R.A.M.), ne sont pas capables de cela. Le fonctionnement normal de ces dispositifs nécessite en effet que leur contenu informationnel – bien évidemment représenté sous forme électronique – fasse *périodiquement* l'objet d'un rafraîchissement. Pour le formuler encore autrement, on dira que ce contenu doit être très fréquemment soumis à un processus de réactualisation. Ceci tient au fait que chacune des minuscules cellules élémentaires qui composent les D.R.A.M. renferme en sa structure un condensateur, composant électronique élémentaire dont la fonction première consiste comme on le sait à emmagasiner une petite charge électrique. C'est cette charge électrique – ou son absence – qui se trouve mobilisée pour représenter l'information binaire au cœur de ce genre de mémoire en semi-conducteur. Le principal problème posé par ces condensateurs est qu'une fois stockée, la faible quantité d'énergie électrique qu'ils permettent d'accumuler tend à se décharger de façon excessivement rapide (on appelle cela « le courant de fuite »). Afin de compenser cette perte de charge systématique et éviter du même coup que l'information représentée en mémoire ne se « dissipe » purement et simplement au bout de quelques millisecondes, il est absolument impératif de procéder à sa régénération. Cette opération automatique, qui consiste à lire puis à réécrire les bits enregistrés avant que ceux-ci ne deviennent inexploitable par l'ordinateur en raison du phénomène de « fuite » évoqué, implique que l'on intervienne de façon cyclique sur l'ensemble des points mémoire constituant la D.R.A.M. en vue de restaurer leur contenu (ou état) particulier. De manière obligatoire, une logique câblée spécialement dédiée à l'effectuation de cette tâche périodique doit donc être rattachée à la mémoire pour que celle-ci puisse fonctionner.

Parvenus à ce point, et en première analyse, il est permis de tirer au moins deux conséquences essentielles de ce tout qui vient d'être dit. Pour commencer, une mémoire de type D.R.A.M., de par son mode opératoire, paraît devoir être plus complexe qu'une R.A.M. statique sur le plan architectural attendu que la nécessité d'employer ici une circuiterie additionnelle pour assurer la fréquente régénération des données suppose inévitablement

⁸⁷¹ Seules les puces de type *Read Only Memory* (R.O.M.), sont de véritables mémoires non volatiles puisque leur contenu informationnel, toujours nécessaire au fonctionnement des dispositifs auxquels elles sont rattachées, ne disparaît pas quand le courant est coupé.

l'usage d'un surcroît de composants électroniques. Ensuite, il est évident que l'exécution de ce processus, ou cycle de rafraîchissement, prend du temps. Même si sa durée se chiffrait autrefois en centaines de nanosecondes – des centaines de nanosecondes devenues aujourd'hui des dizaines de nanosecondes – il n'en demeure pas moins que pendant un laps de temps d'une extrême brièveté, l'unité de traitement d'un ordinateur équipé d'une mémoire dynamique à accès aléatoire se trouve dans l'impossibilité d'accéder aux données enregistrées sur son principal support de stockage interne⁸⁷². On peut aisément rendre compte de ce phénomène. Puisqu'elle est condition *sine qua non* de l'accomplissement de ce dernier il est des plus logique que les processus visant à la préservation de l'intégrité des données – ou plutôt celle de leur représentation électronique – précèdent *en permanence* ceux ayant trait à leur traitement. Evidemment la très grande fugacité des temps d'exécution avancés pour la réalisation de cette opération – des centaines de nanosecondes représentent en effet des segments temporels presque instantanés que leur caractère infinitésimal place à jamais en dehors de nos capacités perceptives naturelles – peut de façon légitime laisser présager de son incapacité à affecter « négativement » la marche de l'ordinateur. Ce postulat, pourtant, ne correspond en rien à la réalité. De fait si la quasi immédiateté caractérisant ce processus (envisagé ici dans son individualité), peut à la limite constituer un motif susceptible de nous inciter à ne pas en faire un élément central de notre présente analyse, il en va tout autrement dès lors qu'on le considère dans ce que l'on nous permettra peut-être d'appeler la « réalité de son accomplissement ». La vitesse fulgurante à laquelle les condensateurs électroniques des cellules élémentaires des D.R.A.M. se déchargent commande ainsi que l'on procède à la régénération automatique de leur contenu à une fréquence extraordinairement élevée (typiquement plusieurs milliers de fois par seconde). La répétition vertigineuse mais absolument obligatoire de ce cycle de réactualisation informationnel va alors avoir des répercussions non seulement sur les performances des mémoires dynamiques à accès aléatoire, mais aussi, par voie de conséquence, sur celles des ordinateurs qu'elles équipent.

Ainsi l'obligation dans laquelle on se trouve de recharger en quasi permanence les condensateurs de leurs cellules fait que les R.A.M. dynamiques consomment une quantité d'électricité assez importante (toutes proportions gardées bien évidemment). A l'inverse, les cellules des mémoires statiques à accès aléatoire ne comptent aucun élément de ce genre parmi leurs composants électroniques fondamentaux. Sur le plan énergétique, celles-ci sont

⁸⁷² Nous parlons ici des D.R.A.M. telles qu'elles étaient fabriquées au début des années soixante-dix, c'est-à-dire des D.R.A.M. asynchrones. Les D.R.A.M. d'aujourd'hui sont synchrones (S.D.R.A.M.), ainsi la gêne occasionnée par le fréquent rafraîchissement des données enregistrées est-elle minimisée de façon à ne pas trop ralentir le fonctionnement de l'ordinateur.

donc plus économiques que leurs « concurrentes ». Il faut encore ajouter à la liste des imperfections propres aux R.A.M. dynamiques les nombreuses micro interruptions que provoquent les exécutions multiples du cycle de rafraîchissement des informations enregistrées. Spécifique à cette catégorie de mémoires, ce processus impose comme il a déjà été dit que l'on procède très souvent à la lecture et à la réécriture des données stockées dans les cellules de la mémoire. Or cette opération de réactivation électronique d'une extrême brièveté, parce qu'elle doit être recommencée sitôt achevée ou presque, génère autant de moments très courts où le dispositif d'enregistrement dynamique, mobilisé par les exigences de sa propre économie interne, ne peut plus être accédé par le système informatique dont il constitue pourtant un centre vital entre tous. On pourra encore exprimer ceci en écrivant que, comparativement aux mémoires statiques, les mémoires dynamiques sont (relativement) lentes et qu'étant donné ce fait elles sont susceptibles de pénaliser le fonctionnement de l'ordinateur en le ralentissant de façon plus ou moins sensible ou perceptible.

Au début des années 70, la supériorité des dispositifs d'enregistrement statiques à accès aléatoire sur leurs équivalents dynamiques ne semblait faire aucun doute. Nécessitant moins d'énergie pour fonctionner que les D.R.A.M., les S.R.A.M. étaient en outre plus rapides que ces dernières (les transistors bipolaires commutaient plus rapidement que les transistors M.O.S. et les S.R.A.M. n'intégraient aucun condensateur). De façon on ne peut plus claire, on perçoit par conséquent tout l'intérêt qu'il pouvait y avoir à en faire usage en informatique. Pourtant, en dépit des défauts qui leur étaient propres, les R.A.M. dynamiques ont fini par largement supplanter les R.A.M. statiques. A n'en point douter la chose ne manquera pas de nous paraître quelque peu étrange, voire même paradoxale, si l'on songe que la recherche d'une vitesse d'opération toujours plus élevée a constamment représenté un des pans principaux de la quête de la mémoire « parfaite » dont nous avons ici tenté de retracer l'histoire. Toute la question est alors de savoir pourquoi, au juste, il en a été ainsi ?

La réponse à l'interrogation que nous venons de formuler doit en priorité être recherchée du côté de l'architecture fine qui caractérise chacune de ces deux familles de mémoires en semi-conducteur. L'expression « architecture fine » nous sert ici à désigner les cellules fonctionnelles élémentaires dont l'assemblage massif, qui obéit bien sûr à des règles de configuration matricielle parfaitement définies, permet de former les mémoires intégrées des ordinateurs. Composées de sous éléments électroniques interconnectés (des transistors *ou* des transistors et des condensateurs), celles-ci peuvent être vues à la manière d'individus techniques capables de réaliser une fonction simple. En l'occurrence il s'agit de stocker un unique bit sous forme électronique. Si, à titre comparatif, on s'intéresse à présent aux schémas

logiques qui fixent respectivement la structure des cellules de base des R.A.M. statiques et celle des cellules des R.A.M. dynamiques, une différence très importante apparaît qui ne peut pas ne pas être relevée tant elle semble immédiatement perceptible (quand bien même saurions-nous complètement ignorants en matière d'électronique).

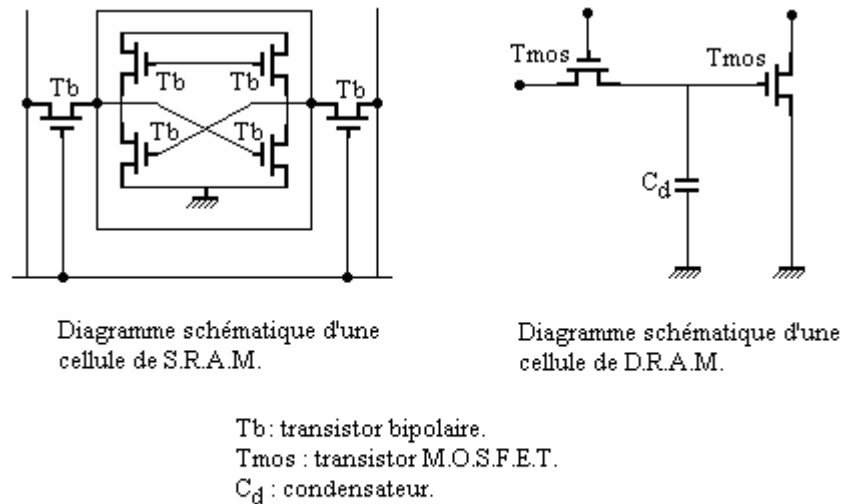


Fig. 44: diagrammes logiques correspondant à l'architecture d'un point mémoire de R.A.M. statique (à gauche) et à l'architecture d'un point mémoire de R.A.M. dynamique (à droite).

En dehors du fait, déjà mentionné, que les composants électroniques employés pour confectionner ces deux sortes de microcircuits ne sont pas exactement les mêmes – d'un côté on trouve des transistors bipolaires, de l'autre des transistors M.O.S.F.E.T. et un condensateur – on constate encore, en collationnant leurs représentations graphiques respectives, qu'il existe entre eux d'autres importants facteurs de dissemblance. On se souviendra alors des propriétés inédites de la cellule mémoire que le Dr. Robert Dennard réussit à mettre au point en 1966, après s'être inspiré d'un prototype de système d'enregistrement interne à film magnétique conçu et présenté la même année par une équipe de chercheurs d'I.B.M. Les premières mémoires informatiques en matériau semi-conducteur, nous l'avons dit, virent le jour sensiblement à la même période. Pour leur immense majorité, ces circuits intégrés furent tout d'abord réalisés avec des transistors bipolaires assemblés selon les principes d'assemblage de la *Transistor-Transistor Logic* (le modèle logique d'ordonnement qui dominait alors largement ce secteur industriel, aux côtés de familles de circuits moins prépondérantes, telles la *Diode-Transistor Logic* et l'*Emitter-Coupled Logic*). Empressons-nous cependant d'indiquer que le fait d'implémenter un circuit en T.T.L. n'imposait

nullement que l'on ait recours à telle ou telle famille de transistors en particulier. Si à l'époque dont il est question maintenant la plupart d'entre eux fut élaborée au moyen de transistors bipolaires c'est que, premièrement, ces derniers relevaient d'une technologie éprouvée offrant un rapport coût/performances acceptable et que, deuxièmement, les transistors à effet de champ M.O.S., de conception plus récente, étaient plus lents, plus rares, plus chers et que leur fonctionnement, dans des conditions véritablement opérationnelles, était moins bien connu. De fait lorsque les M.O.S.F.E.T. commencèrent à devenir des composants plus courants, donc un peu moins onéreux et mieux maîtrisés, quelques circuits mémoire réalisés en T.T.L. furent effectivement fabriqués aux U.S.A. qui avaient pour particularité d'être basés sur l'utilisation exclusive de transistors à effet de champ M.O.S. (ainsi en allait-il par exemple de la S.R.A.M. *i1101* qu'*Intel* produisit en 1971). Il est à noter toutefois que les performances de ces dispositifs n'incitèrent pas leurs concepteurs à les développer plus avant pour le motif excellent que les mêmes circuits développés en technologie bipolaire étaient tout simplement plus rapides (et toujours moins chers). Ce qui importe à présent en tout premier lieu, c'est de bien repérer que le diagramme logique qui correspond au point mémoire de la D.R.A.M. (à droite sur la figure ci-dessus), comporte beaucoup moins d'éléments électroniques, et par conséquent d'interconnexions, que celui représentant le point mémoire de la S.R.A.M. (à gauche). Un rapide examen de ces deux schémas fondamentaux suffit ainsi à se rendre compte que les cellules des mémoires dynamiques sont nettement moins complexes, du point de vue architectural, que celles des mémoires statiques. C'est précisément en cela que résidait la propriété la plus déterminante, la plus essentielle, bref la plus révolutionnaire, de l'invention de Robert Dennard. La simplicité exceptionnelle qui caractérisait la structure de cette nouvelle catégorie de cellules de stockage devait par la suite avoir des conséquences très importantes pour le secteur de la production des circuits électroniques destinés aux ordinateurs. D'abord, c'est évident, le fait de n'avoir à recourir seulement qu'à deux ou trois composants électroniques de base pour concevoir une cellule de D.R.A.M. - contre six pour confectionner les deux portes logiques entrecroisées NOR ou NAND nécessaires à la fabrication du bistable et des lignes d'accès formant le cœur d'une cellule de S.R.A.M. - avait pour corollaire immédiat la possibilité de réaliser des économies non seulement sur le plan matériel - étant donné qu'on employait moins d'éléments électroniques et de connexions pour les relier - mais aussi sur le plan de l'encombrement - un circuit comportant peu de composants et de jonctions occupe en général beaucoup moins de place qu'un circuit dont ce n'est pas le cas. Il s'agissait là bien entendu de traits technologiques appelés à jouer très fortement en faveur d'une diminution substantielle des

coûts de production des D.R.A.M. Cependant, quand bien même ces dernières se seraient révélées moins chères à fabriquer que les mémoires S.R.A.M. – ce qui était loin d'être le cas au début des années soixante-dix - elles se situaient encore très nettement en retrait par rapport à celles-là au regard des performances. Or comme nous n'avons eu de cesse de nous en apercevoir tout au long de cette réflexion consacrée à l'évolution des mémoires informatiques, une grande vitesse d'accès aux données représentait, avec l'accroissement de la capacité de stockage et la réduction de l'encombrement, l'un des trois objectifs technologiques que les fabricants de mémoires s'efforçaient toujours d'atteindre en priorité (fut-ce parfois au prix d'un coût de production proprement exorbitant). A elle seule la grande simplicité structurelle des points mémoire des R.A.M. dynamiques ne suffit donc pas à rendre compte du fait que ces dispositifs d'enregistrement internes ont graduellement supplanté leurs contreparties statiques. De surcroît, on pourra aussi se demander pour quelle raison l'option technique consistant à fabriquer des D.R.A.M. à l'aide de composants bipolaires ne fut pas retenue ? Après tout les fonctions fondamentales dont sont par définition capables les transistors demeurent identiques quelle que soit la catégorie à laquelle ils appartiennent : de la même façon qu'il était parfaitement possible de concevoir des points mémoire de R.A.M. statique au moyen de M.O.S.F.E.T., rien ne s'opposait donc à ce que l'on crée des cellules de R.A.M. dynamique avec des éléments bipolaires.

Expliquer tout ceci implique que nous procédions d'abord à un bref rappel des propriétés physiques fondamentales des transistors à effet de champ M.O.S. Eux-mêmes caractérisés par une architecture remarquablement simple – une particularité qui contribuait évidemment à en faire des composants faciles à produire en grande série - les M.O.S.F.E.T. présentaient les avantages suivants : 1°) un taux d'encombrement sur substrat singulièrement peu élevé ; 2°) une faible consommation énergétique ; 3°) la capacité à être utilisés comme des résistances ou des condensateurs. Alors certes il est vrai que les transistors à effet de champ M.O.S. commutaient moins vite que les transistors bipolaires mais, considérées dans leur ensemble, associées les unes aux autres, les qualités individuelles qui étaient les leurs compensaient amplement tout ce qui, dans la perspective d'une production de mémoires informatiques à l'échelle industrielle, aurait pu passer en première analyse pour un handicap technologique particulièrement sérieux. Ce sont les attributs que nous venons d'évoquer qui, au final, permirent de faire la différence. Nous avons indiqué à plusieurs reprises que la confection d'une cellule élémentaire de D.R.A.M. ne nécessitait que deux composants, un transistor à effet de champ M.O.S. et un minuscule condensateur (pour le modèle le plus simple, c'est-à-dire la « 1T 1C D.R.A.M. cell » mise au point en 1966 par R. Dennard). Il

ressort par conséquent de cela que dans un espace de dimensions données on pouvait installer – ou plutôt *entasser* pour reprendre à notre compte le terme de Gordon Moore – un plus grand nombre de ces points mémoire qu'on ne pouvait loger de cellules de stockage construites à base de composants bipolaires (lesquelles comprenaient six transistors). A volume occupé égal la capacité d'enregistrement en bits des mémoires à accès aléatoire dynamiques dépassait donc celle des mémoires à accès aléatoire statiques. Cependant à cause des particularités de leur mode opératoire – on se souviendra ici que les données enregistrées dans une D.R.A.M. doivent être périodiquement lues et réécrites sous peine de devenir très rapidement inutilisables - les premières n'étaient pas aussi rapides que les secondes. Alors que la décennie soixante-dix débutait et qu'avec elle le début de la fin du règne des matrices à tores de ferrite commençait à devenir réalité, la question de savoir laquelle de ces deux catégories de mémoires en silicium, S.R.A.M. ou D.R.A.M., prendrait en définitive le pas sur l'autre n'avait pas encore été tranchée par les industriels du secteur de l'informatique et des circuits intégrés. A l'instar de la société *Intel*, et parce qu'ils se trouvaient comme elle dans l'expectative quant au dénouement imminent de ce délicat problème technico-économique, les grands fabricants de matériel microélectronique s'orientèrent donc pour la plupart vers le développement parallèle des deux sortes de puces mémoire (ce fut par exemple le cas de *Texas Instruments*, de *National Semiconductors*, de *Signetics*, de *Motorola*, de R.C.A., d'I.B.M. ou encore de *Fairchild Semiconductors*). Dans tous les cas la diminution drastique du coût de ces nouvelles mémoires devait toujours représenter un objectif prioritaire pour leurs constructeurs: il s'agissait en effet de faire en sorte qu'elles deviennent au plus vite véritablement compétitives avec les systèmes d'enregistrement magnétiques internes.

C'est dans ces circonstances précises qu'une découverte capitale fut réalisée par Robert Dennard et quelques-uns des membres de l'équipe qu'il dirigeait alors au *Thomas J. Watson Research Center*. Au mois de janvier 1968, la direction d'I.B.M. décréta l'abandon du développement des dispositifs de stockage magnétiques centraux (soit les matrices à noyaux de ferrite et les systèmes à films fins). Il s'agissait désormais de privilégier le travail sur les mémoires en semi-conducteur avec, à court terme, deux buts essentiels à atteindre: 1°) réduire l'écart qui, en terme de rapport coût/performance, séparait les mémoires internes monolithiques des disques durs magnétiques (les premières étaient rapides mais onéreuses alors que les seconds étaient bon marché mais souffraient de leur lenteur) ; 2°) se trouver en mesure de produire de gros volumes de R.A.M. dès le début de l'année 1971 en vue d'équiper les différents modèles de la nouvelle famille d'ordinateurs compatibles *System/370*. En 1970, comme tous ses concurrents, le géant américain de l'informatique était donc à la recherche

d'un moyen technique qui lui permettrait de diminuer considérablement le prix de ses R.A.M.⁸⁷³ L'objectif, incroyablement ambitieux, consistant à atteindre un ratio d'un millième de *cent* par bit fut ainsi assigné par la direction de cet institut au groupe de R. Dennard. Avocat résolu de l'approche dynamique (pour des motifs qui ne peuvent évidemment pas nous échapper), l'inventeur de la cellule à transistor à effet de champ unique proposa un design préliminaire reposant sur l'emploi de celle-ci puis se rendit assez rapidement compte qu'on ne pourrait se rapprocher de ce rapport qu'à la seule condition de parvenir à réduire très significativement la taille de ces points mémoire. En vue d'explorer cette voie R. Dennard et ses collaborateurs - Dale Critchlow, Fritz Gaensslen et Larry Kuhn pour ne pas les nommer – décidèrent de partir d'une technologie existante, laquelle autorisait la gravure de circuits avec une finesse de 5 µm. Après qu'ils eurent apporté à cette plateforme de départ les modifications nécessaires, une chose qui impliquait notamment que l'on perfectionne les techniques de traitement du silicium et de photolithographie normalement employées, ils réussirent à ramener la taille nominale de ce pas de gravure à un micromètre. Surtout, ces travaux initiaux permirent à R. Dennard et Fritz Gaensslen de formuler une théorie de la réduction du champ électrique constant (*constant electric field scaling theory*), mettant en évidence les diverses possibilités et limitations liées à l'application d'un facteur d'échelle aux M.O.S.F.E.T. Fait assurément décisif, les chercheurs découvrirent que « *les caractéristiques de bon fonctionnement d'un transistor pouvaient être conservées, voire améliorées, lorsque [ce] facteur d'échelle était appliqué judicieusement*⁸⁷⁴. ». Plus précisément, ils se rendirent compte que si la force du champ électrique appliqué à la grille du M.O.S.F.E.T. était maintenue constante, toutes les caractéristiques physiques du transistor « réduit », y compris ses performances, s'en trouvaient améliorées. Ainsi, par exemple, une division par deux des dimensions linéaires d'un transistor M.O.S. se traduisait par une diminution de moitié du voltage nécessaire à son fonctionnement et du courant le traversant tandis que sa consommation électrique, elle, était réduite par quatre. Quant au nombre de transistors intégrables par unité de surface, il se voyait multiplié dans la même proportion ! Forts des résultats proprement remarquables qu'ils avaient obtenus ici, Robert Dennard et ses collaborateurs profitèrent de l'*International Electron Devices Meeting* de 1972 pour exposer à leurs pairs les principes fondamentaux du « *scaling* » et leur prouver concrètement la viabilité de ces derniers. Présenté aux côtés d'un transistor à effet de champ tenant lieu de composant

⁸⁷³ N'oublions pas qu'à cette époque I.B.M., en plus d'être le plus important fabricant d'ordinateurs au monde, figurait également parmi les principaux producteurs mondiaux de composants en semi-conducteur.

⁸⁷⁴ Jacques Gautier, « Vers la monoélectronique », in Signaux, pp. 23-29, Septembre 1999.

de référence - un dispositif aux propriétés bien connues qui fonctionnait avec une tension de 20V, était doté d'une longueur de canal de 5 μm et d'un oxyde de grille de 100 nm d'épaisseur - un M.O.S.F.E.T. miniaturisé selon des règles de conception d'un micromètre servit ainsi à illustrer la démonstration de R. Dennard (la longueur du canal de ce transistor était d'un μm , l'épaisseur de son oxyde de grille de 20 nm et il fonctionnait avec une tension de 5V). Comme on peut l'imaginer la première présentation formelle des travaux de R. Dennard et *al* sur la réduction d'échelle des M.O.S.F.E.T. suscita grand intérêt, et parfois aussi certaine incrédulité, chez les professionnels qui eurent l'opportunité d'y assister. Dans un premier temps cependant, l'intervention remarquée du scientifique ne donna lieu qu'à la publication d'un résumé assorti de quelques plans et diagrammes explicatifs. Il fallut ensuite attendre l'édition 1974 de l'*International Electron Devices Meeting* - un laps de temps que R. Dennard et son groupe mirent bien sûr à contribution pour parachever leur théorie - pour voir les savants d'I.B.M. officialiser vraiment le fruit de leurs recherches par l'entremise d'une nouvelle conférence et la publication d'un article devenu depuis un classique de la littérature microélectronique, « Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions⁸⁷⁵ ».

Cristallisant les résultats des travaux menés quatre années durant par R. Dennard, F. H. Gaensslen, D. Critchlow et Hua-Nien Yu (*inter allia*), cette publication, bien mieux que les « ébauches » qui la précédèrent, devait clairement poser les principes fondamentaux de la réduction d'échelle, ou *scaling*, dans le domaine de la microélectronique. Elle faisait également la preuve que des transistors à effet de champ M.O.S. élaborés selon des règles de *design* micrométriques constituaient des dispositifs parfaitement viables, y compris et surtout dans le cadre d'applications digitales exigeant une très haute vitesse d'exécution. Dès l'année 1972, les esprits les plus avisés se trouvèrent par conséquent en mesure de comprendre que les jours de la technologie bipolaire étaient dorénavant comptés: s'agissant des systèmes de stockage centraux des ordinateurs, mais aussi de leurs unités arithmétiques et logiques, il semblait que la technologie des M.O.S.F.E.T. finirait inévitablement par la dépasser. La petitesse et la simplicité architecturale de ces transistors ainsi que celles des points mémoires dynamiques dont ils permettaient l'agencement, cumulées aux extraordinaires atouts que conférait maintenant la technique du *scaling* (possibilité de réaliser « facilement » des circuits multifonctionnels hautement, voire très hautement intégrés, faible consommation électrique,

⁸⁷⁵ R. H. Dennard, F. H. Gaensslen, H., Hua-Nien Yu, V. L. Rideout, E. Bassous, A. R. LeBlanc, I.B.M. *T.J. Watson Research Center*, « Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions », in *I.E.E.E. Journal of Solid-State Circuits*, Vol. SC-9, pp. 256-268, Oct. 1974.

rapidité de fonctionnement autorisée par l'ultra miniaturisation des composants M.O.S.), représentaient en effet autant d'éléments indicateurs quant à la tournure que prendrait en définitive cet « antagonisme » technologique. En dépit du fait qu'ils existaient déjà depuis une vingtaine d'années, avec tout ce que cela supposait bien entendu de maîtrise et d'avantages acquis sur les plans scientifique, productif et économique, les transistors bipolaires ne purent plus rivaliser avec les M.O.S.F.E.T.S. à partir du moment où il fut établi – et reconnu – que les performances et leurs caractéristiques physiques de ces derniers pouvaient être démultipliées et fortement optimisées grâce à la technique du *scaling*. Plus complexes, un peu plus volumineux et en tout état de cause beaucoup moins faciles à produire que ne l'étaient les M.O.S.F.E.T.- des facteurs qui expliquent ainsi pourquoi les constructeurs n'eurent pas recours à ce type de composants pour fabriquer des mémoires dynamiques - les transistors bipolaires ne se prêtaient de surcroît pas aussi bien que ceux-là au processus de la réduction d'échelle. De façon logique l'emploi des M.O.S.F.E.T. supplanta alors peu à peu celui des transistors bipolaires et avec le temps, les rares mémoires principales statiques à accès aléatoire qui virent le jour firent place à des mémoires dynamiques qui leur étaient supérieures en tous points. Hormis dans le cas de certaines applications qui, comme les puces servant de mémoire cache, n'exigent pas une capacité de stockage importante mais réclament en revanche un support électronique offrant des temps de réponse extrêmement bas, les R.A.M. à composants bipolaires ne sont plus utilisées en informatique de nos jours.

Neuf ans après que Gordon E. Moore ait formulé la première version de sa « loi » sur le doublement de la complexité des circuits intégrés, la valeur prédictive de celle-ci se trouva considérablement confortée par la théorie de la réduction d'échelle des transistors à effet de champ M.O.S. En découvrant et en démontrant que ces composants pouvaient faire l'objet d'un processus réglé de réduction dimensionnelle, que cette opération n'affectait pas, mais améliorait au contraire notablement leurs performances, l'équipe de recherche emmenée par Robert Dennard avait rempli on ne peut plus brillamment le double objectif qui lui avait été assigné en 1970 par I.B.M. à savoir, premièrement, faire en sorte que le coût par bit des mémoires intégrées descende au niveau de celui des mémoires de masse magnétiques (disques durs et bandes), et, deuxièmement, imaginer au plus vite un moyen qui permettrait de les produire en série. Grâce à la technologie M.O.S., à la *Silicon Gate Technology* et à la théorie de la réduction d'échelle la production industrielle de puces – qu'il s'agisse au demeurant de

mémoires dynamiques ou de circuits logiques⁸⁷⁶ - à haut niveau et à très haut niveau d'intégration (respectivement *Large Scale Integration* ou L.S.I. et *Very Large Scale Integration* ou V.L.S.I.), devint donc chose parfaitement réalisable au cours des deux premières années de la décennie soixante-dix. Compte tenu des progrès considérables qui avaient été par ailleurs déjà réalisés dans le domaine des langages de programmation de haut niveau comme dans celui de l'ergonomie des machines et de leurs périphériques, il apparaît donc qu'à ce moment précis, les conditions de possibilité *technologiques* d'une informatique accessible à tous – autrement dit d'une micro-informatique - se trouvaient bel et bien réunies.

Dans ce qui précède nous avons mis en lumière et explicité les dissemblances conceptuelles et techniques qui existaient entre les deux grandes catégories de mémoires en semi-conducteur ayant fait leur apparition dans les années 1968-1971, à savoir les S.R.A.M. et les D.R.A.M. Nous nous sommes aussi longuement livrés à l'examen des différentes innovations et méthodes qui rendirent possibles la création, puis l'irrépressible montée en puissance, de ces instruments de stockage d'un genre nouveau. En général ceux qui se préoccupent de l'informatique et de son histoire se souviennent plus de 1971 comme de l'année qui vit naître le premier « *ordinateur sur une puce*⁸⁷⁷ » que de celle où *Intel*, la même société qui était à l'origine de cette véritable prouesse en matière d'intégration électronique, vit son *leadership* technologique et marchand naître et se consolider rapidement grâce au spectaculaire succès commercial rencontré par une de ses premières mémoires dynamiques à accès aléatoire, le circuit *i1103*.

Alors que plus haut nous évoquions les débuts de la société de Gordon Moore et Robert N. Noyce, nous avons fait mention du lien de coopération qui, en 1969, se tissa momentanément entre la jeune firme californienne et *Honeywell*. Le fabricant d'ordinateurs était alors à la recherche d'une compagnie spécialisée dans le domaine des semi-conducteurs qui accepterait de participer au développement d'une mémoire dynamique basée sur un type inédit de cellule élémentaire à trois transistors que William Regitz, un de ses ingénieurs, avait conçue. *Intel* dont, à l'origine, la raison d'être économique était très précisément la conception et la production des nouvelles mémoires en silicium saisit bien évidemment cette opportunité à bras-le-corps. Et pour cause : la preuve de la viabilité des technologies (S.R.A.M. et D.R.A.M.) qu'elle entendait imposer, comme du reste la conquête de la place de

⁸⁷⁶ Composé de 2300 transistors, occupant une surface totale de 12mm² et disposant d'autant de puissance que le titanique calculateur électronique E.N.I.A.C., l'*Intel* 4004, premier microprocesseur de l'histoire, fut fabriqué en 1971 par Federico Faggin, Ted Hoff et Stan Mazor, qui utilisèrent pour ce faire la technologie M.O.S.

⁸⁷⁷ L'expression « *computer on a chip* » que nous avons traduite littéralement par « ordinateur sur une puce », fut à l'époque très largement utilisée par l'ensemble de la profession et des médias pour désigner le microprocesseur *i4004*.

ces dernières sur un marché des mémoires informatiques principales totalement dominé par les matrices à tores de ferrite, demeuraient l'une et l'autre choses à faire. Comme il a déjà été dit, la collaboration technique entre les deux entreprises se révéla fructueuse puisqu'en 1970, elle déboucha sur la mise au point du circuit *i1102*, une D.R.A.M. pourvue d'une capacité de 1024 bits (à l'origine celle-ci devait être de 512 bits, mais Joel Karp, son *designer*, pensait à raison qu'elle pouvait être doublée). Bien qu'elle ait fait l'objet d'une présentation officielle au cours de l'*International Solid-State Circuits Conference* de Philadelphie, en février 1970, la D.R.A.M. *i1102* n'était pas dépourvue d'imperfections et dans tous les cas, elle était encore loin de donner pleine satisfaction à ceux qui l'avaient créée. Décidant de mettre à profit l'expérience qu'ils avaient acquise en travaillant à l'élaboration de cette puce, Ted Hoff, Leslie Vadasz, Joel Karp, John Reed, et Robert Abbott se lancèrent alors dans la réalisation d'une version « corrigée » de celle-ci. Le résultat de leur travail acharné prit rapidement la forme d'une mémoire dynamique à accès aléatoire qui, conformément au schéma de désignation en vigueur à cette époque chez *Intel*, reçut le nom de « *i1103* ».

Un an après son introduction sur la scène marchande internationale, en octobre 1970, le succès commercial rencontré par l'*i1103* était proprement phénoménal. Dotée de la même capacité de stockage que celle qui avait caractérisé l'*i1102* – soit 1024 bits nécessitant d'être rafraîchis une fois toutes les deux millisecondes – cette D.R.A.M. réalisée en *Silicon Gate Technology* et constituée de transistors P.M.O.S. occupait une surface totale d'une dizaine de millimètres carrés et était gravée avec un trait d'une finesse maximale de 8 micromètres. Souvent méconnu, parfois même ignoré, le rôle que joua cette puce mémoire dans l'histoire somme toute relativement récente de l'informatique – et tout particulièrement dans ce chapitre assurément essentiel que représenta l'avènement de l'ordinateur personnel – est pourtant immense et c'est pourquoi nous avons jugé indispensable de lui réserver ici la place qui lui revient de droit. A notre sens il convient en effet de prendre toute la mesure des bouleversements que provoqua l'apparition du circuit intégré *i1103* – ou plutôt *des* circuits intégrés *i1103* puisque cette D.R.A.M. connut cinq versions successives⁸⁷⁸ – au sein de l'univers informatique. Comme l'a justement formulé George Rostky⁸⁷⁹, « *l'Intel 1103 est la*

⁸⁷⁸ Il s'agissait des D.R.A.M. *i1103*, *i1103-1*, *i1103A*, *i1103A-1*, et *i1103A-2*. Toutes possédaient une capacité de stockage identique. En revanche elles se distinguaient les unes des autres par leurs temps d'accès maximum (respectivement 300, 150, 205, 145, et 145 nanosecondes), le temps requis pour exécuter leur cycle de rafraîchissement (580, 340, 580, 340, et 400 nanosecondes), et le voltage de leur alimentation électrique.

⁸⁷⁹ Décédé au mois de novembre 2003, G. Rostky exerça la profession d'ingénieur électronique avant de s'orienter vers le journalisme scientifique. Il fut rédacteur en chef de plusieurs revues consacrées à l'électronique, parmi lesquelles *Electronic Design Magazine*, *I.E.E. Magazine* et *Electronic Engineering Times*. Il est notamment l'auteur d'un article intitulé « Ferrite Cores: to Remember Forever », paru en 2000 dans un numéro spécial d'*Electronic Design Magazine*. On pourra consulter une version en ligne de ce travail au

puce qui brisa les reins des mémoires à tores de ferrite ». La formule a beau fidèlement refléter ce qui advint pendant les deux ou trois premières années de la décennie soixante-dix, il est cependant une chose que son caractère quelque peu radical ne peut laisser percevoir de façon directe. Bien sûr on ne saurait remettre en cause le fait que l'arrivée du circuit intégré *1103* sur le marché ait conduit en moins d'une dizaine d'années à peine à la disparition des mémoires matricielles à tores. Comme on peut aisément l'imaginer l'excellent niveau de performances que celui-ci offrait, mais aussi son coût de production avantageux et son prix de vente de plus en plus compétitif représentèrent dans ce processus des facteurs on ne peut plus déterminants. Toutefois, le fait que cette mémoire en semi-conducteur ait réussi à évincer les systèmes d'enregistrement à anneaux de ferrite avec une relative rapidité ne signifie aucunement que ce fut là une chose facile. Il nous faut à présent expliquer pourquoi. Commençons par rappeler que les premières matrices à tores de ferrite virent le jour durant la seconde moitié des années quarante (entre autres grâce aux travaux d'An Wang, d'Andrew D. Booth et de Jay Forrester). En 1970, il s'agissait donc de dispositifs ayant derrière eux une vingtaine d'années de perfectionnements consécutifs. C'est dire s'ils étaient remarquablement bien connus des industriels de l'informatique et de leur clientèle. Lorsqu'ils ne se procuraient pas ces instruments d'enregistrement auprès de producteurs indépendants (tels l'américain *Electronic Memories and Magnetics* par exemple), les constructeurs d'ordinateurs étaient d'ailleurs bien souvent propriétaires de manufactures entièrement dédiées à leur fabrication. Concernant les différentes phases que comptait cette dernière, précisons que la confection des anneaux de ferrite n'était pas celle qui posait le plus de difficultés techniques. C'est leur assemblage sous forme matricielle – leur mise en réseau par liaison filaire si l'on veut - qui représentait en fait, et de très loin, l'opération la plus longue et la plus laborieuse de l'ensemble du processus. On ne s'étonnera donc pas de ce qu'un grand nombre de ces unités de production ait été implanté en Asie du sud-est, une région du monde où la main d'œuvre féminine, déjà coutumière des us professionnels de l'industrie du textile, était réputée à la fois pour la qualité de son travail et le coût remarquablement bas de celui-ci. Ce mode de production basé sur la délocalisation géographique et l'emploi d'un personnel bon marché, mais néanmoins qualifié, permettait de garantir une production de très bonne qualité tout en limitant considérablement les frais de fabrication. Ceci, ajouté au fait que la technologie des matrices à tores était ancienne et par conséquent déjà rentabilisée depuis un certain temps, suffit à expliquer pourquoi cette catégorie de mémoires principales avait la faveur des

http://www.eetimes.com/special/special_issues/millennium/milestones/whittier.html. La citation produite ci-dessus en est extraite.

constructeurs d'ordinateurs et qu'elle représentait pour les utilisateurs des machines une solution de stockage à la fois sûre, économique et familière. Qui plus est, alors que les informations emmagasinées dans la puce *i1103* devaient être lues et réécrites de façon excessivement fréquente sous peine d'être perdues – au grand dam des ingénieurs et ainsi que l'exigeait par définition le mode opératoire des D.R.A.M. - les matrices à tores, en raison de leur non volatilité, pouvaient les conserver indéfiniment, que l'ordinateur ait été ou non sous tension. Auprès d'une multiplicité de catégories d'utilisateurs toutes évidemment aussi peu enclines les unes que les autres à voir leurs précieuses données s'évanouir brutalement, ce dernier argument ne pouvait que plaider en faveur des mémoires à tores. Les partisans et les promoteurs des mémoires informatiques en semi-conducteur, I.B.M. et *Intel* en tête, pouvaient donc bien déclarer révolue l'ère des systèmes en ferrite, l'excellent rapport qualité prix offert par ces derniers, leur fiabilité, et un sentiment de confiance et d'habitude né et renforcé par une pratique vieille de plus de deux décennies rendait très incertaine la possibilité même d'une conversion rapide des constructeurs et des utilisateurs d'ordinateurs à ce nouveau type de support, lequel restait cher et devait encore faire toutes les preuves de son excellence.

A l'image de ce qui se passe en général pour toute technologie inédite, le prix de la puce mémoire *i1103* baissa cependant très vite, et ceci dans d'appréciables proportions. En l'espace de treize ou quatorze mois, c'est-à-dire entre le moment de sa mise sur le marché, en octobre 1970, et la fin de l'année 1971, le prix de vente unitaire de ce produit de haute technologie passa ainsi de 60 à 23 dollars. Ce laps de temps et la baisse significative de prix qui l'accompagna s'avérèrent en fait nécessaires pour que concepteurs et acheteurs d'ordinateurs en viennent à accepter plus volontiers les D.R.A.M. et leur inhabituel principe de fonctionnement (au moins au regard de celui, plus conventionnel, des mémoires internes en matériau magnétique). Dès lors, le circuit intégré *i1103* commença effectivement à être considéré par les différents acteurs du marché comme une alternative sérieuse aux mémoires à noyaux de ferrite. Au fur et à mesure que les mois s'écoulaient, le rapport coût en cent/bit d'information caractérisant la puce de stockage d'*Intel* diminua donc considérablement, au point d'équivaloir bientôt à celui qu'offraient les matrices à tores (c'est-à-dire un cent par bit). Mais cette période « d'équilibrage des forces », comme on pourrait sans doute la qualifier, n'était pas destinée à durer. Déterminés à ne pas laisser *Intel* imposer son nouveau standard technologique sans opposer à cette jeune et ambitieuse compagnie une résistance proportionnée à la menace qu'elle représentait désormais pour eux, les fabricants de matrices magnétiques répliquèrent en faisant subir à la tarification de ces dernières une série de baisses particulièrement importantes. Alors que leur niveau de performances se voyait régulièrement

amélioré – notamment grâce à une diminution constante du diamètre des tores - le coût de stockage d'un bit, sur les dispositifs appartenant à cette catégorie, descendit ainsi progressivement de 1 à 0,3 cent. Les mémoires à anneaux de ferrite, toujours plus compétitives, devinrent *ipso facto* les systèmes d'enregistrement centraux les moins chers de l'histoire de l'informatique. Ce faisant, il se creusa un écart de prix tel entre les deux types de supports qu'il n'était plus du tout question pour Robert N. Noyce et Gordon Moore de continuer à mener leur offensive comme ils l'avaient fait jusqu'à présent. Une stratégie tarifaire immodérée ne constituant pas à proprement parler un levier efficace pour parvenir à imposer durablement à un secteur économique plus ou moins réticent une technologie certes révolutionnaire, mais dont les preuves et l'amortissement économique restaient encore à faire, il existait donc ici une limite financière que la société *Intel* ne pouvait pas se permettre de franchir. En d'autres termes il était évident que pendant une durée indéterminée mais probablement encore assez longue, les mémoires à tores de ferrite demeureraient beaucoup moins onéreuses que les D.R.A.M. Si ces dernières se révélaient encore incapables de rivaliser ouvertement avec eux sur le plan il est vrai primordial du coût, elles pouvaient quand même se prévaloir de certaines propriétés que ne possèderaient jamais les systèmes magnétiques. Or ce sont très précisément ces caractéristiques exclusives qui leur permirent finalement de s'imposer de façon écrasante.

Traditionnellement, nous l'avons vu dans la section que nous avons consacrée plus haut à leur étude, les mémoires à tores de ferrite se présentaient sous la forme d'un « cube » (autrefois même d'une véritable armoire), lui-même constitué d'une superposition de matrices bidimensionnelles carrées interconnectées les unes aux autres dans le plan vertical (par le biais notamment des très nombreux fils électriques sélectifs et senseurs qui servaient à la commande des multiples éléments du dispositif). Il va de soi que le volume global occupé par l'ensemble était pour l'essentiel fonction de la taille de ses constituants premiers. Compte tenu des progrès notables réalisés ici aussi en matière de miniaturisation, une unité mémoire à tores conçue au cours des années cinquante était évidemment plus encombrante, plus massive et nettement moins performante en termes de vitesse et de capacité qu'un dispositif de même classe qui aurait vu le jour en 1965 par exemple⁸⁸⁰. Au terme de la décennie 60, la surface des éléments planaires permettant de composer ces cubes mémoire par empilement excédait fréquemment une centaine de centimètres carrés, et cela pour une capacité de stockage

⁸⁸⁰ Il n'est qu'à comparer les caractéristiques physiques de la mémoire principale à tores du *Whirlwind*, avec celles de systèmes plus récents – par exemple les blocs mémoires à noyaux de ferrite qui équipaient les ordinateurs de la série 6000 introduite par *Control Data Corporation* à partir de 1965 - pour s'en convaincre aisément.

unitaire de 4096 bits (la possibilité d'assembler plusieurs de ces plans signifiait bien entendu que celle-ci était extensible jusqu'à un certain point). On constate par conséquent que si leur coût très avantageux jouait bel et bien en faveur des mémoires à tores de ferrite, il n'en allait pas exactement de même avec ces deux autres facteurs absolument essentiels dès lors qu'il était question de composants informatiques en général, et de mémoire principale en particulier, à savoir l'encombrement et la densité. Afin de nous rendre parfaitement compte de cela, il nous sera utile de confronter maintenant les dimensions qui viennent tout juste d'être évoquées avec celles de la puce *Intel i1103*. La surface de la D.R.A.M. *i1103* dépassait très légèrement les 10 millimètres carrés (soit un peu plus d'un cm²). Si l'on s'en tient à la considération de cette seule grandeur, on constate donc que ce circuit intégré était une centaine de fois plus petit qu'un sous élément planaire de mémoire à tores (incomparablement plus léger, il était aussi beaucoup moins épais que ce dernier). Nonobstant cette différence de taille plus que considérable, la capacité d'enregistrement des unités individuelles de stockage qui composaient ces mémoires magnétiques – autrement dit leur densité - n'était pourtant que quatre fois supérieure à celle de la D.R.A.M. d'*Intel* (4096 bits contre 1024 bits). Dans ces conditions un dispositif d'enregistrement qui aurait été constitué de quatre puces *i1103* et qui aurait occupé un tout petit peu plus de 4 cm² se serait révélé suffisant pour sauvegarder autant d'informations codées en binaire qu'une matrice bidimensionnelle en ferrite 25 fois plus grande que lui. Mais un encombrement réduit, une masse presque insignifiante et un haut niveau d'intégration n'étaient pas les seules particularités techniques qui permettaient à la R.A.M. dynamique d'*Intel* de se distinguer radicalement des solutions de stockage avec lesquelles elle se trouvait *de facto* en situation de concurrence⁸⁸¹. La rapidité avec laquelle s'effectuait ici l'accès aux données représentait également un argument décisif en sa faveur. Certes sur ce plan, la puce mémoire d'*Intel* ne pouvait prétendre venir rivaliser avec les R.A.M. statiques. L'exigence de procéder ici à la réactivation électronique des 1024 bits d'information enregistrés à la fréquence d'une fois toutes les 2 millisecondes, associée au fait que les transistors à effet de champ commutaient moins vite que les transistors bipolaires, faisait qu'il ne pouvait en être autrement. Cependant en 1970-71, les S.R.A.M. étaient encore des dispositifs relativement peu répandus. Leur cherté et leur capacité de stockage peu importante, mais aussi leur vitesse d'opération très élevée, représentaient de surcroît autant de

⁸⁸¹ N'omettons pas de remarquer qu'à coût inférieur et superficie à peine plus importante – 10mm² pour la première contre 9,42 mm² pour la seconde - la D.R.A.M. *i1103* disposait d'une capacité de stockage quatre fois plus élevée que la S.R.A.M. *Fairchild 4100*, un circuit mémoire capable d'enregistrer 256 bits d'information que *Fairchild Semiconductor* dévoila l'année même où *Intel* introduisit la puce *i1103*. Parce qu'il s'agissait d'une R.A.M. statique, et donc d'un circuit composé de transistors bipolaires, la puce de *Fairchild* était bien sûr plus rapide que celle d'*Intel*.

critères techniques qui contribuaient à ce qu'on les emploie essentiellement pour remplir la fonction – il est vrai primordiale - de mémoires tampon⁸⁸². A notre connaissance, peu nombreuses furent les machines informatiques qui reçurent une mémoire principale constituée de circuits intégrés appartenant à cette catégorie. Il nous sera toutefois possible d'en mentionner deux. L'*ILLinois Automatic Computer IV*, restée assez célèbre puisqu'il s'agissait d'une tentative ambitieuse et coûteuse – mais finalement malheureuse - de rupture avec la traditionnelle architecture séquentielle héritée de John Von Neumann et le *SuperNova SC*, une évolution du *Nova*⁸⁸³, mini-ordinateur que son fabricant *Data General* n'hésita pas à présenter au moment de sa sortie (1969) comme le « meilleur petit ordinateur du monde ». L'Illiac IV rompait avec le design archétypique de l'E.D.V.A.C., affirmions-nous, car c'était un superordinateur scientifique à architecture massivement parallèle comportant 64 processeurs « esclaves », auxquels étaient individuellement associés deux kilo-octets (2048 bits) de mémoire principale. Fruit d'un contrat impliquant l'U.S. *Air Force* et la D.A.R.P.A., il fut conçu par l'Université de l'Illinois et construit par la *Burroughs Corporation* pour le compte du N.A.S.A. *Ames Research Center* entre 1965 et 1972. A l'origine, puisque c'est ce qui nous intéresse ici en tout premier lieu, sa mémoire principale était constituée de modules S.R.A.M. 4100 *Fairchild* de 256 bits de capacité. Concernant maintenant la mémoire interne du *Supernova SC*, et malgré le peu d'informations techniques qui à ce jour sont encore disponibles à propos de cet ordinateur⁸⁸⁴, on sait de façon certaine que *Data General* offrit à ses clients la possibilité d'en ajuster la capacité. Des cartes mémoire enfichables équipées d'une, de deux ou de quatre puces *Fairchild* 4100 (ce qui équivalait respectivement à 256, 512 ou 1024 bits de capacité), étaient proposées en vue de répondre adéquatement aux besoins immédiats et futurs des utilisateurs. Si des exemples tels que ceux que nous venons de mentionner existent bel et bien, ils demeurent cependant fort rares et c'est pourquoi on ne

⁸⁸² Rappelons qu'une mémoire tampon – également appelée mémoire cache – est une zone de stockage temporaire située entre l'unité arithmétique et logique de l'ordinateur et sa mémoire principale. De petite capacité mais offrant des temps d'accès extrêmement bas, elle est utilisée pour pré-charger un nombre limité d'instructions et de données dans l'attente de leur traitement imminent. Ainsi se trouve-t-on en mesure de gagner un peu de temps dans le cadre de l'exécution des programmes informatiques.

⁸⁸³ Le mini-ordinateur, ou plutôt la famille de mini-ordinateurs *Nova* fut conçu par *Data General*, une société cofondée en 1968 par Edson DeCastro, Henry Burkkardt III et Herbert Richman. Si ce dernier venait de *Fairchild Semiconductor*, les deux premiers avaient précédemment occupé des postes à responsabilité chez *Digital Equipment Corporation*. Pour avoir travaillé sur le très fameux PDP-8, machine aujourd'hui volontiers considérée comme le premier mini-ordinateur de l'histoire, E. DeCastro pensait qu'il était possible de mettre au point un ordinateur encore plus petit et moins cher que le système informatique vedette de D.E.C. Le *Nova*, machine très innovatrice à bien des égards – nous y reviendrons – devait représenter la concrétisation de cette ambition. Si cet ordinateur fut proposé dans un premier temps avec une mémoire centrale à tores de 4 Ko de capacité (extensible à 32 Ko), une version baptisée *SuperNova SC* et pourvue d'une mémoire S.R.A.M fut ensuite commercialisée dans le courant de l'année 1971.

⁸⁸⁴ Remercier Bruce et citer www.SimuLogics.com.

saurait véritablement affirmer des mémoires intégrées statiques qu'elles étaient en concurrence avec les D.R.A.M. de façon aussi directe et « intensive » que pouvaient l'être les matrices à tores de ferrite. En lieu et place de les considérer comme des dispositifs technologiquement proches mais commercialement rivaux – ce qu'ils furent effectivement pendant une brève période de temps avant que les D.R.A.M. ne prennent définitivement l'ascendant sur les S.R.A.M. – il faut appréhender les puces statiques et dynamique sur le mode de la complémentarité fonctionnelle (les premières servant normalement de support aux mémoires cache des ordinateurs alors que les secondes sont employées pour constituer leur mémoire interne principale). S'agissant toujours de rapidité de fonctionnement, le circuit intégré i1103 était quoiqu'il en soit nettement plus compétitif que ces dernières. Ainsi le temps d'accès aux données – c'est-à-dire la durée nécessaire pour effectuer la lecture d'une information – autorisé par les cinq versions différentes que connut cette puce se situait dans une fourchette comprise entre 300 et 145 nanosecondes. Si l'on compare maintenant cette plage de valeurs à celle qui caractérisait les mémoires à noyaux de ferrite les plus perfectionnées de l'époque, on se rend très vite compte que la différence de performances constatable entre les deux catégories de dispositifs était énorme. Avec les meilleures d'entre elles en effet l'opération élémentaire consistant à lire une information réclamait typiquement de 1,5 à 2 millisecondes. Sur ce point déterminant entre tous, on voit donc encore une fois combien les R.A.M. dynamiques pouvaient se révéler supérieures aux systèmes d'enregistrement à tores magnétiques.

Une fois surmontées leurs réticences premières, lesquelles avaient été pour l'essentiel motivées par l'introduction d'une technologie non éprouvée et le recours simultané à un mode opératoire inusité, les constructeurs d'ordinateurs abandonnèrent graduellement les matrices à tores pour se tourner de plus en plus vers les mémoires dynamiques en silicium. C'est en très grande partie grâce à cette nouvelle famille de mémoires, et bien entendu au microprocesseur qui surgit quasiment en même temps qu'elle du même creuset technologique, que des ordinateurs aux caractéristiques absolument inédites – et par là nous entendons faire référence aussi bien aux dimensions de ces machines, qu'à leurs performances, leur coût, leur fiabilité ou bien encore leur accessibilité – purent commencer à être proposés aux entreprises et, chose nouvelle, au *public* à partir de 1973-74. Ces nouveaux systèmes qui reçurent le nom de « micro-ordinateurs » - une appellation générique permettant de clairement indiquer la place qui leur revenait à l'extrémité de la lignée informatique inaugurée après-guerre par les *mainframes* et poursuivie ensuite par les *mini-computers* – devaient tout naturellement constituer les conditions de possibilité infrastructurelles de l'apparition et du développement

de ce que Philippe Breton a appelé la troisième informatique. Ne manquons pas de remarquer, pour finir, que les mémoires dont sont équipés nos ordinateurs à l'heure actuelle sont les descendantes directes de celles qui, avec le microprocesseur bien entendu, ont permis l'advenue de cette informatique personnelle et distribuée qui sous-tend, voire envahit aujourd'hui nos existences.

Nous avons déjà eu l'occasion de dire et de démontrer que l'effort ininterrompu qui a présidé soixante années durant au développement et au perfectionnement des mémoires auxiliaires et principales des ordinateurs s'est trouvé dès l'origine contraint par la nécessité d'atteindre un certain nombre d'objectifs technologiquement, économiquement et très souvent militairement capitaux. Pour résumer une dernière fois ceci, il s'agissait de parvenir à mettre au point des systèmes d'enregistrement internes et externes cumulant de façon optimale trois propriétés absolument déterminantes en informatique à savoir la rapidité, l'intégration et un coût de production sinon peu élevé, du moins financièrement supportable. Des lignes de délai acoustiques au mercure employées après-guerre sur l'E.D.S.A.C. du Laboratoire de Mathématiques de l'Université de Cambridge aux tubes *Selectrons* de l'ordinateur du *Princeton Institute for Advanced Study*, des matrices à anneaux de ferrite aux circuits intégrés M.S.I. ou V.L.S.I., en passant bien sûr par les mémoires électromécaniques ou encore la *Solid Logic Technology* qu'I.B.M. créa pour équiper les différentes machines composant son *System/360*, ce triple impératif n'a en réalité jamais cessé de s'imposer avec force aux très nombreux acteurs – ingénieurs, chercheurs, programmeurs, entrepreneurs mais aussi utilisateurs – qui chacun ont apporté leur pierre à cet édifice monumental et composite qu'est l'informatique. La mise au point du transistor, puis le surgissement de nouveaux enjeux militaires et aérospatiaux liés de façon directe au contexte de la Guerre Froide redéfinirent de façon radicale les contours de cette recherche tout en en démultipliant spectaculairement les moyens humains, institutionnels et financiers. L'exigence impérieuse et pour tout dire vitale dans laquelle se trouvèrent les Etats-Unis et leurs principaux alliés de disposer au plus vite de matériels de haute technologie intégrés et fiables quelques années seulement après la fin de la deuxième guerre mondiale précipita, en les entretenant plus encore qu'ils ne l'étaient déjà, les développements respectifs de l'électronique et de l'informatique. Les nouveaux besoins défensifs, offensifs et contre offensifs engendrés par la menace permanente de frappes thermonucléaires tactiques ou stratégiques soviétiques se traduisirent ainsi par la mise au point et la fabrication d'instruments de contrôle, de surveillance et d'anéantissement aux pouvoirs de plus en plus étendus. Le *Defense Calculator* (I.B.M. 701), le *Livermore Advanced*

Research Computer (Sperry Rand), l'*Atlas Guidance Computer (Burroughs AN/GSQ-33)*, le réseau de veille militaire informatisé *Semi Automatic Ground Environment* (avec les ordinateurs AN/FSQ 7 M.I.T./I.B.M.), les missiles à têtes nucléaires *Minuteman* et les avions espions U-2 ou SR-71, pour ne prendre que ces quelques exemples, peuvent très certainement être portés au nombre des réalisations les plus emblématiques de cette époque de bouillonnement technologique et d'intenses tensions internationales. Mais cette impressionnante montée en puissance de l'informatique et de l'électronique connut encore une autre phase d'accélération extraordinaire lorsque l'affrontement tour à tour ouvert et larvé auquel se livraient les deux grands blocs nucléaires de la planète se transposa pour partie dans l'espace. Bien sûr pour chacune des deux superpuissances antagonistes, il s'agissait de donner au monde entier une preuve éclatante et pacifique de l'excellence de sa science et de son industrie tout de même que de sa capacité à s'investir dans des entreprises aussi ambitieuses qu'aventureuses. Mais à l'ère des missiles balistiques intercontinentaux à têtes nucléaires multiples et de l'espionnage ultrasophistiqué, le bras de fer militaro idéologique qui se jouait derrière le paravent des desseins officiels et louables ne pouvait connaître ni répit, ni frontières véritables. Parvenir à aller le premier dans l'espace et à s'y « installer », outre le fait évident que cela équivalait à porter publiquement un coup fort rude au moral de l'adversaire, c'était donc aussi et surtout faire clairement état de sa détermination, de ses prétentions et de ses moyens réels vis-à-vis d'une course à la suprématie spatiale militaire et civile qui ne faisait après tout que débiter. Le perfectionnement continu des vecteurs de destruction massive et des contre-mesures destinées à assurer soit leur dissimulation, soit leur détection, soit encore leur neutralisation s'effectuait en outre à un tel rythme de part et d'autre qu'assurer sa présence sur l'orbite terrestre s'imposait de plus en plus comme une option militaire stratégiquement indispensable, au même titre que pouvait l'être par exemple la possession d'un arsenal d'I.C.B.M. ou celle d'une flottille d'intercepteurs à long rayon d'action.

Comme on le sait ce sont les soviétiques qui parvinrent les premiers à envoyer un satellite artificiel dans l'espace, le 4 octobre 1957. Amplifiée par plusieurs échecs américains, la crise politique et publique terrible que cet évènement provoqua aux Etats-Unis eut pour notables conséquences la restructuration de certains organismes gouvernementaux, la création de nouvelles agences (telles l'*Advanced Research Projects Agency*), et la définition d'objectifs scientifiques à la mesure de l'humiliation et de la menace que la mise en orbite réussie du *Sputnik* avait représentée pour le principal adversaire de l'U.R.S.S. Succédant au *National Advisory Committee for Aeronautics* et dotée d'un budget annuel initial de 100

millions de dollars, la N.A.S.A. fut ainsi créée le 1^{er} octobre 1958 afin de présider à la destinée des projets spatiaux américains. Deux ans et demi plus tard, face à une Union Soviétique qui décidément ne cessait d'accumuler les succès dans ce domaine, le Président John F. Kennedy annonça officiellement qu'avant la fin de la décennie, un astronaute américain poserait le pied sur notre satellite naturel et qu'il en reviendrait sain et sauf. Le 25 mai 1961 – soit 43 jours après le vol historique de Youri Gagarine - le programme *Apollo* devint par le fait même la priorité absolue de la *National Aeronautics and Space Administration*. La réponse en forme de défi démesuré ambitieux qu'adressa ici John F. Kennedy à Nikita Khrouchev entraîna pour l'industrie informatique des répercussions tout à fait considérables. Ayons le soin de rappeler qu'au moment où cette annonce fut publiquement formulée, le développement de l'informatique civile sur le marché américain n'en était en définitive qu'à ses prémises. Certes I.B.M et quelques-uns de ses principaux concurrents de l'époque (notamment E.R.A., *Librascope/General Precision*, *Sperry Rand*, *Bendix*, *Honeywell*, *Raytheon* et RCA), régnaient alors sur un parc locatif de quelques milliers de *business computers*⁸⁸⁵. Mais ces « petits » ordinateurs, parce qu'ils étaient pour l'essentiel destinés à remplacer les machines mécanographiques employées jusqu'alors sur le lucratif marché civil du traitement de l'information, n'étaient guère perfectionnés⁸⁸⁶. Un coût trop élevé, une utilisation trop complexe ou une rupture radicale avec les anciennes pratiques professionnelles propres à ce milieu d'utilisateurs généralement conservateurs et soucieux de rentabilité auraient en effet condamné cet effort de reconquête commerciale sinon à un échec presque certain, du moins à un ralentissement peu souhaitable. A l'inverse il existait une deuxième catégorie d'ordinateurs, extrêmement sophistiqués ceux-là, qui constituait l'apanage des puissantes agences gouvernementales, du *Department of Defense*, ou encore des différents corps de l'armée américaine. Issues d'une collaboration qui, avant qu'elle ne commence à intéresser les grands constructeurs d'ordinateurs, devait tout d'abord étroitement impliquer le gouvernement américain et les centres de recherche des universités les plus prestigieuses du pays, ces machines hors de prix, aux performances aussi exceptionnelles que pouvaient l'être leur fiabilité et leurs dimensions, représentaient pour ainsi dire des instantanés matériels de tout ce qui participait de la technologie la plus aboutie et la plus onéreuse du moment. Il faut dire aussi que les applications pour lesquelles elles avaient été

⁸⁸⁵ Selon les estimations les plus courantes – on pourra par exemple se rapporter à [Spencer, 1999], p. 53 - le nombre total d'ordinateurs installés à cette époque sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis était supérieur à 14000.

⁸⁸⁶ Ainsi le support de la mémoire principale de ces premiers ordinateurs commerciaux était-il le plus souvent un tambour magnétique. Ce type de dispositif était lent, certes, mais il possédait le double avantage d'être économique et fiable.

spécifiquement conçues relevaient dans leur très grande majorité des sphères mêlées du militaire et du scientifique et qu'en conséquence, leur nature complexe et supérieurement stratégique requérait une puissance et une rapidité de calcul sans commune mesure avec celles normalement exigées pour la réalisation de tâches plus triviales, telles celles liées à la gestion ou à l'administration. Bien sûr, ici, la course aux armements et l'impérieuse nécessité de protéger le territoire contre un hypothétique assaut ennemi justifiaient les dépenses exorbitantes conditionnant l'accès à une telle excellence technologique. Qu'ils aient été utilisés comme instruments de calcul ou qu'ils aient fait partie intégrante de systèmes de surveillance électronique géographiquement distribués ces dispositifs rarissimes, ces *mainframes* comme on les appelait, étaient donc par nature des machines réservées au seul usage de quelques états particulièrement riches.

A la fin des années cinquante pourtant, les premiers ordinateurs commerciaux équipés de circuits logiques à transistors discrets ainsi que de mémoires internes en anneaux de ferrite commencèrent à faire une timide apparition sur le marché américain. Remarquons que si ces deux technologies révolutionnaires ne virent pas à proprement parler le jour dans des laboratoires militaires⁸⁸⁷, c'est bien l'armée qui, en tant que principal client et donneur d'ordres à leurs fabricants, prit en charge directement et indirectement une très grande part du financement nécessaire à leur développement et à leur production. Comme l'a très justement indiqué Philippe Breton cette diffusion progressive, dans l'espace civil, de nouveautés informatiques initialement réalisées à des fins militaires s'accomplissait toujours en respectant un certain nombre de « règles » globales et récurrentes:

« D'une façon générale, remarque ainsi l'auteur d'Une histoire de l'informatique, le courant des innovations obéissait à un cycle qui commençait par une demande militaire suggérée au préalable par des experts scientifiques, et se poursuivait par la réalisation d'ordinateurs très coûteux et très perfectionnés immédiatement utilisés pour les besoins de la défense nationale⁸⁸⁸. ».

Ceci devait évidemment se vérifier pour les technologies que nous mentionnions un peu plus haut, à savoir le transistor et les matrices à tores, mais aussi, et peut-être plus encore,

⁸⁸⁷ Rappelons que le transistor fut mis au point aux *Bell Labs*. Quant aux mémoires à tores de ferrite le crédit de leur invention doit, comme nous l'avons vu plus haut, être porté au compte de plusieurs civils qui travaillaient à l'élaboration d'ordinateurs devant être livrés aux armées. Ainsi de l'E.D.V.A.C. de Presper J. Eckert, dont l'organisme commanditaire était le *Ballistic Research Laboratories* ou encore du *Whirlwind-AN/FSQ 7*, de Jay Forrester, qui constitua finalement une pièce maîtresse du réseau S.A.G.E.

⁸⁸⁸ In [Breton, 1990], p. 126.

pour les circuits logiques et les mémoires à haut niveau d'intégration qui furent mises au point ultérieurement. La poursuite des programmes spatiaux *Mercury* et *Apollo*, conjuguée bien sûr avec la nécessité de concevoir des systèmes d'armes et de surveillance toujours plus élaborés, provoqua au début des années soixante la mise en branle d'une machinerie d'ampleur nationale où les efforts du gouvernement, de l'armée, des institutions scientifiques et de divers groupes industriels américains vinrent converger afin, d'une part, de renforcer les moyens défensifs et offensifs du pays et, d'autre part, de faire de l'extraordinaire objectif proposé en 1961 par le Président Kennedy une réalité concrète. Cette vaste entreprise qui relevait tout autant de la sphère technoscientifique que des domaines du politique, du militaire et de l'aérospatiale mobilisa comme nous l'avons vu de colossales ressources financières, humaines et techniques. Parmi ces dernières, bien sûr, l'informatique figurait en excellente place. Concevoir des fusées, des missiles ou des satellites, calculer la courbe de leurs trajectoires, contrôler leur évolution à distance – entre autres choses possiblement énumérables ici – impliquait ainsi que l'on dispose en nombre d'ordinateurs dont la puissance de calcul et la fiabilité étaient adaptées à l'accomplissement de ces actions par nature redoutablement longues et exigeantes. Mais il ne faut pas oublier non plus que l'économie interne de ces engins reposait aussi en grande partie sur l'emploi de dispositifs informatiques (quand bien même aurait-on eu affaire à des véhicules habités). Or ces systèmes électroniques, parce qu'ils avaient vocation à être embarqués, c'est-à-dire à être installés à bord des appareils dont ils devaient assurer à la fois le bon fonctionnement et la liaison opérationnelle avec le sol, étaient par le fait même voués à opérer dans des milieux et des conditions extrêmes. Un certain nombre de contraintes spécifiquement liées au caractère singulier de leur lieu de déploiement – on pourra par exemple évoquer l'exiguïté bien connue des capsules spatiales, la capacité d'emport très limitée des lanceurs civils et militaires ou encore les conditions électromagnétiques extrêmement perturbantes qui règnent souvent dans la haute atmosphère et dans l'espace – devaient donc venir se surajouter ici à celles, déjà draconiennes, qui pesaient ordinairement sur le processus de fabrication des ordinateurs « conventionnels ». Produire des systèmes informatiques et des instruments électroniques spéciaux dans la perspective d'applications où ni l'approximation, ni l'erreur n'étaient tolérables réclamait en conséquence que l'on mette au point des composants électroniques pourvus de propriétés et de qualités hors normes. Compte tenu du caractère crucial et prioritaire de ce qui se trouvait ici placé en balance, les coûts d'élaboration et de fabrication de ces dispositifs furent toujours considérés comme un facteur d'ordre secondaire. Affranchis de la sorte de cette contrainte que l'on sait être ô combien pesante et déterminante dans des conditions d'activité industrielle

normales, *Westinghouse Electric*, R.C.A., *Texas Instruments*, *Fairchild Semiconductor* et les *Bell Labs*. – pour ne citer que quelques-unes des grandes sociétés du secteur de l'électronique et/ou de l'informatique qui collaborèrent à cette époque avec le gouvernement américain – purent donc pleinement concentrer leurs efforts sur le développement, la fiabilisation et l'intégration des nouveaux composants monolithiques (ou micro-modulaires selon la désignation adoptées par certains fabricants). En parallèle de ces travaux avancés qui devaient, au moins jusqu'au milieu des années soixante, ne profiter directement qu'aux seuls circuits arithmétiques et logiques des ordinateurs et des calculateurs, les fabricants de matrices à tores, technologie mémoire dont le règne hégémonique sur les informatiques étatique et commerciale avait débuté au milieu des années cinquante, firent eux aussi évoluer leurs matériels. Toutefois parce que leur mode opératoire reposait fondamentalement sur l'exploitation des propriétés d'un matériau magnétique, les performances offertes pas ces supports de stockage se situèrent toujours en retrait, voire en net retrait, par rapport à celles des circuits en semi-conducteur. Leur agencement en matrice tridimensionnelle et le fait que les dimensions de leurs éléments de stockage toriques ne puissent être réduites comme pouvaient l'être celles des transistors constituaient de surcroît des facteurs qui bridaient – et pour tout dire qui limitaient définitivement – les possibilités techniques que l'on avait de les miniaturiser. En raison de ces impossibilités structurelles et physiques leurs performances, même si elles pouvaient être grandement améliorées – et elles le furent - ne purent jamais équivaloir à celles des composants électroniques en silicium.

Les premiers modèles d'ordinateurs commerciaux à unité centrale de traitement transistorisée et à mémoires à tores, tels les populaires R.C.A. 501 et I.B.M. 1401, apparurent en 1959-60, c'est-à-dire au moment précis où, d'une part, le transistor à effet de champ M.O.S. était pour la première fois réalisé par des scientifiques des *Bell Laboratories* et où, d'autre part, le circuit intégré voyait le jour de manière indépendante chez *Texas Instruments* et *Fairchild Semiconductor*. Comme il a été signalé plus haut, l'armée et la N.A.S.A devaient être au départ les uniques bénéficiaires de cette dernière technologie. En effet si le circuit intégré représentait une solution très innovante sur le plan technique, la grande délicatesse de sa fabrication et son extrême rareté devaient aussi contribuer à faire de lui un produit quasiment inabordable sur le plan financier, de sorte qu'au tout début des années soixante, seules des organisations militaires ou civiles dotées de lignes budgétaires solides pouvaient sérieusement envisager d'en faire usage à une échelle autre qu'expérimentale. On sait alors le rôle déterminant que jouèrent l'U.S. *Air Force* et l'agence spatiale américaine dans le vaste processus de recherche et de développement qui, en l'espace d'une demi décennie à peine,

provoqua non seulement une spectaculaire réduction des coûts de production de ces dispositifs révolutionnaires mais fut également à l'origine de leur diffusion grandissante au sein de l'industrie informatique. Dans la perspective de la mise au point de nouveaux ordinateurs aux performances calculatoires et aux caractéristiques matérielles absolument inédites – en particulier il s'agissait pour l'*Air Force* de l'ordinateur de guidage D37B destiné à l'I.C.B.M. *Minuteman II* et pour la N.A.S.A. de l'*Apollo Guidance Computer* devant équiper les capsules Apollo – ces deux puissantes entités initièrent dans le courant de l'année 1962 des partenariats technico-économiques très étroits avec un certain nombre d'acteurs du domaine des semi-conducteurs. Le volume des commandes enregistrées et les sommes considérables investies ici par le gouvernement dans le but d'aider les fabricants de ce secteur à mettre en place les lignes de production des circuits intégrés furent tels qu'en seulement trois années, leur prix de vente subit une chute vertigineuse. Ceci permit à des fabricants d'ordinateurs renommés (R.C.A.), et des constructeurs informatiques de moindre importance (*Scientific Data Systems* ou *Sylvania Electric Products* par exemple), de commencer à proposer des ordinateurs commerciaux à unité arithmétique et logique en circuits intégrés à partir de 1965. Cependant toutes ces machines, qu'elles aient été par ailleurs destinées à un usage civil ordinaire ou à une application militaire de pointe, étaient encore équipées de mémoires centrales construites au moyen de matrices à tores de ferrite.

Il fallut encore les percées théoriques capitales réalisées indépendamment par Robert Dennard (cellule mémoire à transistor unique, théorie de la réduction du champ électrique constant), et Federico Faggin (*Silicon Gate Technology*), ainsi que la résolution des problèmes techniques relatifs à la fabrication des transistors à effet de champ M.O.S., pour voir des mémoires intégrées en semi-conducteur faire effectivement leur apparition sur le marché américain en 1968-70.

A partir de ce moment précis, et pour la première fois en un quart de siècle ou presque qu'ils existaient, la mémoire centrale des ordinateurs put donc enfin être formée du même substrat et des mêmes composants élémentaires que leur unité de traitement arithmétique et logique. Reposant sur la mobilisation d'un matériau doté de propriétés physiques exceptionnelles – le silicium - ainsi que sur celle d'une multitude d'éléments ultra miniaturisés capables de commuter à très haute vitesse entre deux états de base – les transistors bipolaires ou M.O.S.F.E.T. – les mémoires conçues à la fin des années soixante par *Intel*, *Fairchild* ou *Texas Instruments* représentaient une solution réellement satisfaisante à l'un des problèmes essentiels qui, 25 années durant, avait traversé en la focalisant la quasi-totalité des recherches effectuées en matière de stockage interne des données informatiques. Il

s'agissait en l'espèce de parvenir à réduire de façon significative le différentiel existant entre la vitesse à laquelle l'unité arithmétique et logique des ordinateurs était capable de traiter l'information binaire, et la vitesse à laquelle les éléments de programme ou de données contenus dans leur mémoire principale pouvaient être accédés en lecture ou en écriture par cette même A.L.U.

Entre le moment où les premiers ordinateurs apparurent et celui qui vit effectivement la mise au point des S.R.A.M. et des D.R.A.M., de multiples combinaisons processeur/mémoire furent bien entendu expérimentées et/ou produites en fonction des technologies disponibles et des besoins à satisfaire. Comme nous avons eu l'occasion de le montrer dans le détail, on associa tout d'abord des lignes délai acoustiques, des tambours magnétiques ou des écrans cathodiques aux composants logiques alors dominants, c'est-à-dire les tubes à vide. Puis, au milieu des années cinquante, on commença à combiner processeurs à transistors « enfichables » et matrices à tores de ferrite (rappelons que le transistor fut inventé en 1947-48, c'est-à-dire très peu de temps avant que l'on ne commence à fabriquer les premières mémoires à tores). Au gré des très importantes avancées qui furent par la suite réalisées en matière de miniaturisation, d'intégration et d'augmentation des performances des éléments électroniques fondamentaux, ces unités arithmétiques à composants discrets se virent peu à peu remplacées par des modules multi transistors de plus en plus petits et rapides. A partir des années 1965-66, ceux-ci finirent à leur tour par être supplantés par des systèmes microélectroniques encore plus compétitifs à tous les niveaux : les circuits intégrés. Il va de soi que tout au long de cette période, les matrices à tores firent elles aussi l'objet de perfectionnements non négligeables. Ainsi leurs fabricants parvinrent-ils peu à peu à réduire leur encombrement dans de très appréciables proportions tandis que dans le même temps, ils réussirent à augmenter leur capacité de stockage de façon tout à fait remarquable. Mais ici cette dynamique « du moins et du plus », ce processus tendant à la diminution du volume physique occupé par le dispositif mémoire et à l'accroissement synchrone de l'espace offert par celui-ci pour l'inscription temporaire de l'information au cœur de l'ordinateur, ne put être conduit au même rythme et aussi loin que celui qui se trouvait à l'œuvre au même moment dans l'univers des semi-conducteurs. Parce qu'il était techniquement impossible de procéder à la réduction de la taille des tores comme on le faisait effectivement avec celle des microcomposants électroniques, mais aussi parce qu'en l'espace d'une seconde – par exemple – ces derniers étaient capables de changer d'état un nombre de fois incomparablement plus élevé que ne pouvaient le faire les anneaux de ferrite, les unités arithmétiques et logiques intégrées des ordinateurs opéraient donc toujours beaucoup plus vite que leurs mémoires

principales magnétiques. La mise au point et le démarrage de la production en série, dans les années 1968-71, de buffers et de mémoires centrales en matériau semi-conducteur ne mirent certes pas un terme définitif à cette situation – à ce jour les A.L.U. sont notons-le toujours plus rapides que les D.R.A.M. et les S.R.A.M. – mais ils représentèrent cependant des moments technologiques et industriels primordiaux car marquant véritablement le exorde début d'une toute nouvelle ère informatique. Ainsi, non seulement l'uniformisation de leurs substrats matériels provoqua un relatif équilibrage des performances des processeurs et des mémoires centrales, mais le recours réciproque à des composants identiques – quant bien même s'agissait-il de transistors appartenant à des types différents - permit enfin que soient atteints de part et d'autre des niveaux d'intégration ouvrant à plein sur la possibilité d'ordinateurs de série de petite taille.

Pour terminer, on évoquera une fois encore l'article « A Storage System for Use with Binary-Digital Computing Machines⁸⁸⁹ » que Sir Frederic Calland Williams et Tom Kilburn publièrent en 1948. Dans ce travail, les pères de la *Manchester Baby Machine* avaient inventorié les différentes qualités que les mémoires d'ordinateurs devraient selon eux posséder impérativement pour pouvoir être considérées comme « parfaites ». Une capacité de stockage importante, une consommation énergétique basse, un coût peu élevé ainsi que la possibilité d'être produites en série constituaient si l'on veut un premier groupe de traits fondamentaux. Quant au second ensemble de propriétés, il regroupait des caractéristiques plus techniques comme le stockage persistant des données (sauf à considérer bien sûr l'effectuation d'enregistrements successifs), la grande brièveté des temps d'accès en lecture et écriture et l'exactitude non moins grande de ces processus et, pour finir, la possibilité d'effacer tout ou partie du contenu de la mémoire et de le remplacer immédiatement par d'autres informations. Souvenons-nous qu'au moment où les deux scientifiques rédigèrent ce papier – c'est-à-dire à la fin du premier trimestre de l'année 1949 - la très grande majorité des machines qui devaient former l'avant-garde de ce que l'on a généralement coutume d'appeler la « première génération d'ordinateurs » était en cours d'assemblage. Quant aux quelques prototypes à tubes et à lignes délai qui, à cette même époque, étaient déjà opérationnels ou en passe de le devenir aux U.S.A. ou en Grande-Bretagne, il n'est peut-être pas inutile de rappeler que les doigts d'une main suffisaient à les dénombrer.

Compte tenu de ces circonstances peu favorables, force est faite de reconnaître que les deux britanniques firent montre d'un discernement singulièrement pénétrant dans leur

⁸⁸⁹ F. C. Williams, T. Kilburn, « A Storage System for Use with Binary-Digital Computing Machines », *Proceedings of I.E.E.E.*, Vol. 96, Mars 1949, pp. 81-100.

traitement somme toute fort précoce du problème de la caractérisation des mémoires d'ordinateurs. Une vingtaine d'années de recherches intensives effectuées dans un contexte géopolitique dangereusement instable, un couplage institutionnel et opérationnel associant très étroitement organismes gouvernementaux, entités scientifiques, et appareil militaire américains, ainsi que des centaines de millions de dollars investis dans les sphères de plus en plus interdépendantes de l'informatique, de l'électronique, de l'aérospatiale et de l'armement se révélèrent comme nous nous sommes attachés à le montrer nécessaires pour qu'hommes de science et industriels parviennent enfin à concevoir des dispositifs de stockage internes rassemblant l'ensemble des qualités spécifiées début 1949 par Williams et Kilburn.

Partie 3.

Les trois informatiques : machines et concepts.

1. La première informatique ou l'ère des prototypes et des *mainframes* : quelques systèmes typiques, contexte(s) de mise en œuvre, problématiques, caractéristiques et enjeux.

1.1. La scène britannique.

1.1.1. Des machines cryptanalytiques *Heath Robinson* et *Colossus* au Manchester *Mark I*.

L'ordinateur *Manchester Mark I* est connu sous différentes dénominations. Aussi n'est-il pas rare que les historiens de l'informatique le désignent en usant de l'une ou l'autre des appellations suivantes : *Manchester Machine*, *Manchester University Computer* (M.U.C.), *Mark I Computer* ou, plus simplement encore, *Mark I*. Quelle que soit au final la qualification retenue, il s'agit de toute façon d'un seul et même système informatique – bien qu'il ait grandement évolué au fil des ans - à savoir celui dont la construction débuta en 1947-48 au *Royal Society Computing Machine Laboratory*, un laboratoire de calcul dont les locaux étaient alors hébergés au sein de l'Université britannique de Manchester.

Pour la plupart les mathématiciens, physiciens, ingénieurs et techniciens qui prirent part à la conception et à la fabrication de cet ordinateur nous sont déjà très bien connus. Il s'agissait, en commençant par les patronymes les plus fameux, de Sir Frederic C. Williams, de son assistant, Tom Kilburn, de Maxwell H. A. Newman, d'Irvin J. Good, de Geoff Tootill et d'Alan M. Turing. Ce dernier, cela est à noter, ne rejoignit en fait le Département de Mathématiques de l'Université de Manchester qu'au mois de septembre 1948⁸⁹⁰.

⁸⁹⁰ On sait toutefois qu'A. M. Turing prit contact avec les responsables du développement de la *Manchester Baby Machine* quelques temps avant de venir prendre ses fonctions à l'Université de Manchester. Il souhaitait obtenir le code d'instructions de la machine. Peu après avoir obtenu satisfaction, il fit parvenir à l'équipe de développement de la S.S.E.M. une routine autorisant l'exécution de divisions longues. Après avoir été corrigé par G. Tootill, cet algorithme fut testé avec succès.

Relativement peu nombreux au moment où le projet démarra, les effectifs de l'équipe chargée de la construction de la *Manchester Baby Machine* se virent renforcés en octobre 1948 grâce à l'arrivée de deux physiciens récemment diplômés, Dai B.G. Edwards et Gordon E. Thomas (l'un et l'autre étaient spécialisés dans le domaine de l'électronique), et à celle d'Alec A. Robinson, un jeune étudiant qui, en plus de préparer son doctorat à l'Université de Manchester, travaillait en même temps à l'*English Electric Limited* en tant qu'ingénieur de développement. A y regarder d'un peu plus près on en vient assez rapidement à se rendre compte que ce groupe de scientifiques possédait un profil assez singulier. Un examen sommaire du passé professionnel civil et militaire de certains de ses membres - spécialement celui des plus illustres - nous permettra de définir le contexte précis dans lequel le projet de fabriquer un ordinateur naquit et fut conduit dans l'immédiat après-guerre à l'Université de Manchester.

C'est en 1939 que Frederic C. Williams rejoignit le centre de recherches sur le radar que le *British Air Ministry* avait établi trois ans auparavant à Bawdsey (dans le Suffolk), en même temps d'ailleurs que le *Royal Air Force Fighter Command* (celui-ci avait pour mission d'assurer la défense aérienne de l'Angleterre pendant la guerre). Entre la date de sa création, soit 1936, et 1942, la *Bawdsey Research Station* (B.R.S.) fut déplacée à trois reprises et changea d'appellations un nombre équivalent de fois (sans d'ailleurs qu'il y ait nécessairement corrélation entre ces deux types d'évènements). Au mois de septembre 1939, la B.R.S. partit ainsi pour Dundee, sur la côte Est de l'Ecosse, et y devint l'*Air Ministry Research Establishment* (A.M.R.E.). Quelques temps après, l'A.M.R.E. fut rebaptisé *Ministry of Aircraft Production Research Establishment* (M.A.P.R.E.), avant d'être renommée, en novembre 1940, *Telecommunications Research Establishment* (T.R.E.). S'ensuivirent encore deux déplacements géographiques qui virent le T.R.E. s'installer successivement à Worth Matravers, dans le Dorset, puis à Malvern, dans les West Midlands. En tout état de cause, et depuis sa création qui datait des premiers mois de l'année 1936, cet organisme avait en charge la réalisation de l'ensemble des travaux expérimentaux relatifs aux nouveaux systèmes radar. Il oeuvrait ici à la fois pour le bénéfice de l'armée de l'air et celui de l'armée de terre britanniques. Au début de 1939 donc, F.C. Williams fut recruté par la défense aérienne et il intégra la *Bawdsey Research Station*. Pendant toute la durée du second conflit mondial, c'est au sein de cet institut que le physicien travailla. Il y mit notamment au point différents appareils électroniques destinés au perfectionnement des dispositifs d'alerte radar – on pensera par exemple à l'*Identification Friend or Foe Device* (I.F.F.D. ou plus simplement

I.F.F.)⁸⁹¹ - ainsi que différents systèmes d'assistance à la visée pour les chasseurs (*Airborne Interception*), les bombardiers ou encore les pièces de D.C.A. C'est également dans le cadre de ces travaux exécutés en temps de guerre qu'une relation professionnelle privilégiée et durable s'instaura entre lui et la firme *Ferranti Ltd*. Cette dernière, qui devait mettre sur le marché une version commerciale de la *Manchester Machine* dès le mois de février 1951, fut en effet chargée de produire les premiers circuits I.F.F. que conçut F. C. Williams. C'est également au T.R.E. que le physicien et celui qui allait devenir son assistant, Tom Kilburn, se rencontrèrent pour la première fois. Un peu plus jeune que F. C. Williams, T. Kilburn avait suivi un cursus de mathématiques à l'Université avant d'être mobilisé, en 1942. Diplômé de Cambridge, il fut rapidement envoyé à Londres par les autorités militaires britanniques afin d'y suivre un cours accéléré couvrant deux disciplines fondamentales devenues tout particulièrement importantes en raison des nouveaux développements techniques liés à la conduite de la guerre moderne, l'électricité et l'électronique. Une fois cette formation achevée – mais de ses propres aveux toujours encore un peu novice en la matière - Kilburn se retrouva versé aux effectifs du T.R.E. où, sous l'autorité directe de F.C. Williams, il œuvra entre autres choses à l'élaboration de radars centimétriques embarqués. A compter de ce moment et jusqu'au mois de décembre 1946, le jeune homme demeura au *Telecommunications Research Establishment*. Ce ne fut que lorsque Williams retourna à l'Université de Manchester afin d'y prendre un poste de professeur en électrotechnique que Kilburn, en sa qualité de second, fut détaché du T.R.E. pour pouvoir suivre ce dernier dans le département d'ingénierie électrique où la *Manchester Machine* devait bientôt voir le jour.

Deux autres très grandes figures du monde universitaire britannique doivent encore être évoquées ici avant que nous ne passions à l'étude proprement dite de la genèse de l'ordinateur de Manchester ainsi qu'à celle de ses caractéristiques techniques. Il s'agit des mathématiciens et logiciens Maxwell H. A. Newman et Alan M. Turing.

Professeur à Cambridge – Turing, Kilburn et Tootill furent au nombre de ses élèves - , membre distingué de la *Royal Society* (notamment pour les travaux en topologie combinatoire et en logique mathématique qu'il réalisa avant-guerre), Maxwell H. A. Newman intégra la *Government Code and Cypher School* vers la fin de l'année 1942. A Bletchley Park (Buckinghamshire), centre aussi confidentiel que névralgique du dispositif cryptanalytique britannique, il prit la tête du groupe chargé du décryptage du chiffre allemand *Lorenz* (ou *Tunny* ainsi que les anglais le baptisèrent bientôt). Alors que les unités en campagne, et tout

⁸⁹¹ Les systèmes I.F.F. ou *Identification Friend or Foe* (soit Identification Ami ou Ennemi), permettaient aux opérateurs radars de différencier visuellement entre les avions alliés, et les appareils nazis.

particulièrement les *U-Boats*, recourraient en général à l'une ou l'autre des variantes de la machine *Enigma* pour sécuriser les messages qu'elles échangeaient avec les pôles de décision militaires, les états majors nazis, eux, utilisaient pour communiquer une méthode d'encryption plus complexe puisque reposant sur l'emploi de télétypes chiffreurs électromécaniques bien plus élaborés⁸⁹² que ne l'étaient les systèmes de campagne. Ces machines relativement volumineuses – donc peu aisément déplaçables – étaient confectionnées en Allemagne par *Lorenz Electric* (*Lorenz Schlüsselzusatz* SZ-40 et SZ-42), et *Siemens & Halske* (*Geheimferschreiber* T-52, code *Sturgeon*). Si les « bombes cryptologiques » (*bomba kryptologiczna* en polonais), conçues durant les années 30 par le mathématicien Marian Rejewski et ses collègues du *Biuro Szyfrow*⁸⁹³, ou bien encore celles mises au point par A. M. Turing et le mathématicien Gordon Welchman à la « Station X⁸⁹⁴ » à partir de mars 1940, permirent effectivement aux alliés de venir à bout des différents versions du code et de la machine *Enigma* tour à tour entrées en service dans l'armée allemande⁸⁹⁵ au cours de l'une ou l'autre de ces périodes, la complexification croissante des dispositifs d'encodage nazis – parmi lesquels les instruments produits par *Lorenz Electric* – exigea bientôt de la part de ces derniers qu'ils définissent des contre-mesures à la fois bien plus sophistiquées et rapides. Le rôle assumé ici par M. H. A. Newman fut déterminant. Comme ne manque pas de le rappeler Andrew Hodges, l'auteur du précieux *Alan Turing ou l'énigme de l'intelligence*, les outils mathématiques et statistiques imaginés par le père des machines logiques éponymes dans le cadre du déchiffrement des codes *Enigma* se révélèrent également d'une redoutable efficacité⁸⁹⁶ lorsque les spécialistes de Bletchley Park commencèrent à s'attaquer aux messages ennemis brouillés au moyen des télétypes *Lorenz*.

Partisan d'un accroissement général de la mécanisation des procédures de décryptage, Maxwell H. A. Newman était convaincu qu'en recourant à la technologie électronique, il

⁸⁹² De façon générale, tous les messages ennemis encryptés au moyen de pareils instruments furent baptisés du nom de code *Fish*.

⁸⁹³ *Biuro Szyfrow* est le nom du bureau du chiffre que les polonais créèrent au sortir de la première guerre mondiale dans le but de se trouver en mesure de surveiller les activités de leurs ennemis russes et allemands. Ce service prouva notamment son efficacité à l'occasion du conflit qui opposa la Russie à la Pologne en 1919-20.

⁸⁹⁴ « Station X » était le nom de code donné à Bletchley Park pendant la seconde guerre mondiale.

⁸⁹⁵ Un cas de figure extrêmement connu est bien entendu celui de l'*Enigma* navale que la *Kriegsmarine* commença à utiliser au tout début du mois de février 1942. Au lieu de comporter trois rotors de chiffrement mobiles, comme cela avait été le cas de toutes les *Enigma* employées jusqu'alors par l'armée allemande, cette nouvelle machine en possédait un quatrième, par chance inamovible (ce qui limitait considérablement le nombre de combinaisons cryptographiques pouvant être actualisées lors du processus de chiffrement). Exploitant judicieusement certaines imprudences et erreurs procédurales commises par les opérateurs nazis, mais jouant aussi de chance puisque qu'en octobre 1942, on captura un *U-Boat* avec l'ensemble de son équipement, Turing et ses collaborateurs, avec le concours du Dr C. E. Wynn-Williams (lequel devait adjoindre aux « bombes cryptologiques » une version *électronique* de ce fameux quatrième rotor), vinrent à bout du code de l'*Enigma* navale durant le premier semestre 1943.

⁸⁹⁶ In [Hodges, 1988], p. 230.

serait possible d'automatiser (au moins en partie), les méthodes existantes en vue d'accélérer le traitement des informations protégées par ce moyen de manière très spectaculaire. Nul besoin évidemment d'insister sur le fait que dans une situation de conflit globalisé comme celle à laquelle les forces alliées se trouvaient confrontées, tout gain de temps susceptible d'être réalisé dans le domaine du déchiffrement des messages ennemis était fortement souhaitable tant il était vrai – ça l'est toujours du reste - que la réduction du délai de latence entre l'obtention d'une information chiffrée et la production de sa version exploitable par les services de renseignement pouvait se révéler tactiquement, voire même stratégiquement vitale. Convaincu de cela, Newman prit contact avec C. E. Wynn-Williams, un ancien du *Cavendish Laboratory* qui travaillait maintenant pour le *Telecommunications Research Establishment* et possédait une grande expérience des instruments scientifiques impliquant l'usage d'éléments électroniques, afin de lui soumettre ses idées sur la question⁸⁹⁷. Le docteur Wynn-Williams fut d'accord pour concevoir une machine implémentant les fonctions cryptanalytiques proposées par Newman⁸⁹⁸. Le travail d'élaboration débuta immédiatement à la *Telephone Division* du *British General Post Office* (à Dollis Hill, au nord-ouest de Londres), et au mois d'avril 1943, la première « calculatrice électronique » de la série des *Robinson* fut installée à Bletchley Park. Andrew Hodges rapporte que ces systèmes – il convient bien sûr de ne pas perdre de vue le fait absolument central qu'il s'agissait là de dispositifs expérimentaux construits dans l'urgence de la guerre - étaient très loin de constituer des parangons de fiabilité :

« ... ces Robinsons, remarque ainsi le biographe de Turing, souffraient encore de nombreux défauts. Elles prenaient assez facilement feu ; les « rubans » de papier cassaient tout le temps et les comptes étaient peu fiables. Cela était dû au fait que les parties les plus lentes des calculs étaient effectuées sur de vieux relais, qui provoquaient un effet de perturbation électrique sur les composants électroniques. Mais le problème technique fondamental demeurait de synchroniser l'introduction des deux « rubans » de papier séparés qu'exigeait la méthode. Pour toutes ces raisons les Robinsons se révélèrent trop lentes et peu sûres pour être d'une réelle utilité dans les opérations de décryptage. On ne les employait donc qu'à des fins de recherches. Une autre difficulté fondamentale, plus logique que physique cette fois, accentuait encore la lenteur de la méthode : lorsqu'il s'en servait pour un

⁸⁹⁷ Notons qu'avant qu'il ne soit sollicité pour la construction d'*Heath Robinson*, le Dr. C. E. Wynn-Williams avait déjà pris part à la mise au point d'une « bombe » à haute vitesse destinée à casser le code de l'*Enigma* navale.

⁸⁹⁸ Il s'agissait tout particulièrement de la méthode du double delta que le mathématicien canadien William T. Tutte avait conçue quelques temps auparavant et qui permettait, en exploitant certaines faiblesses du chiffre Lorenz, de déterminer les positions de départ des deux jeux de roues codantes que comportait la machine.

décryptage, l'opérateur devait sans arrêt produire de nouveaux rubans, assisté en cela par une machine auxiliaire spécialement conçue pour fabriquer les « rubans » constituant l'une des deux entrées de la Heath Robinson⁸⁹⁹ ».

Le sens des commentaires formulés par Mr. Hodges tend largement à nous prouver qu'*Heath Robinson* était un instrument certes très sophistiqué pour l'époque, mais qu'il était aussi et surtout incroyablement peu efficace dans un contexte militaire critique où le rendement, la fiabilité et l'exactitude des résultats produits comptaient bien plus que toute autre chose. Outre le fait que cette machine cryptanalytique « prenait assez facilement feu » - une chose qui on l'accordera aisément représentait déjà en soi un inconvénient de taille - Hodges fait aussi état du fait que la juxtaposition de ses nombreux éléments électromécaniques (relais) et électroniques (tubes) se trouvait à l'origine de dérèglements capables de nuire sérieusement à sa bonne opération. Une autre difficulté technique essentielle signalée aussi par cet auteur était celle que posait la synchronisation des deux bandes de papier prévues pour alimenter la machine. Sur la première d'entre elles était perforée la totalité des configurations pertinentes de roues codantes que les experts de Bletchley Park étaient déjà parvenus à identifier tandis que sur la seconde figurait, sous forme perforée également, le message devant être décrypté. La machine procédait automatiquement à la comparaison et à l'éventuel déplacement des caractères présents sur les deux entrées (via la méthode du double delta imaginée par Tutte), et progressait ainsi de proche en proche, en effectuant les modifications nécessaires, jusqu'à décodage de tout ou partie des informations composant le message cible. Le problème majeur, ici, était que cette séquence d'opérations exigeait que le défilement des deux rubans de papier supportant les données demeure parfaitement et continuellement synchronisé pendant toute la durée du processus, le tout à une vitesse très élevée puisque celle-ci était tout de même de l'ordre d'un millier de marques lues par seconde. Comme on s'en doute, c'était loin de constituer une chose facile. En outre, les importantes contraintes mécaniques auxquelles étaient constamment soumises les bandes de papier du système entraînaient assez fréquemment leur rupture.

Compte tenu de son grand manque de fiabilité, de sa configuration matérielle très inhabituelle pour l'époque mais aussi des circonstances peu coutumières où il vit le jour, il est aisé de comprendre qu'*Heath Robinson* n'ait pu être considéré autrement qu'à la manière d'un prototype destiné à la seule expérimentation. En revanche le fait même qu'en si peu de temps

⁸⁹⁹ In [Hodges, 1988], p. 230.

les britanniques soient parvenus à assembler une telle machine et qu'ils aient ensuite réussi à la faire fonctionner à peu près convenablement – si bien sûr on accepte de considérer comme secondaires les problèmes techniques auxquels il vient d'être fait référence – suffit à démontrer on ne peut plus clairement que les idées que nourrissait Newman à propos de la possibilité de l'automatisation des procédures de décryptage étaient bel et bien valides. En conséquence, les gens de Bletchley Park prirent la décision de modifier *Heath Robinson* afin de la rendre sinon opérationnelle, du moins plus fiable qu'elle ne l'était.

C'est à l'électronicien Tommy Flowers du *British General Post Office* que revint la charge de procéder à ces transformations. Bien que cet ingénieur de talent n'ait participé ni à la conception ni à l'assemblage d'*Heath Robinson*, il se rendit très vite compte qu'une simple modification du design original de cette machine ne serait pas suffisante pour faire d'elle un instrument effectivement utilisable dans un contexte de conflit militaire généralisé. En lieu et place d'une transformation partielle de la machine existante, Flowers proposa donc que l'on mette au point un système complètement nouveau qui, cela va sans dire, serait débarrassé des diverses déficiences qui avaient nui au bon fonctionnement de son immédiat prédécesseur. La particularité première et à vrai dire essentielle du dispositif que l'ingénieur avait ici en tête résidait dans le fait que l'ensemble des séquences significatives (ou clefs) du code allemand auquel devait être comparé le message courant à décrypter serait désormais stocké *électroniquement* dans la machine, et non plus à l'extérieur, sur un médium certes flexible mais comme on l'a déjà dit par trop fragile. En procédant de cette manière, et puisque la nouvelle machine ne devait plus comprendre qu'une seule et unique bande de papier – c'est-à-dire finalement une seule entrée- le britannique se trouvait donc en mesure d'éliminer les problèmes techniques lourds que la synchronisation des deux bandes avait posés sur *Heath Robinson*. Sachant que le ruban dont les spécialistes de Bletchley Park se servaient pour supporter les clefs du chiffre nazi était en général d'une longueur conséquente, il était indispensable que la machine imaginée par Flowers comporte un nombre élevé de composants électroniques afin d'en pouvoir représenter tous les caractères individuels. Pour bien prendre la mesure de ce que cela signifie réellement, il nous faut sans doute rappeler que la construction de *Colossus* – puisque tel est le nom dont hérita cet instrument de cryptanalyse inédit – commença en mars 1943, c'est-à-dire 3 mois seulement avant que la fabrication de l'E.N.I.A.C. ne démarre à la *Moore School of Electrical Engineering*. Si on les considère du point de vue du défi technologique qu'ils représentaient à l'époque, ou encore si l'on se place sur le plan des objectifs militaro scientifiques qui de part et d'autre avaient conduit à leur conception, on s'aperçoit fort bien que ces deux projets étaient en fait assez éloignés l'un de

l'autre. Il n'en demeure pas moins vrai que tous deux avaient ceci en partage d'original et d'essentiel qu'à un moment où elle n'était pas du tout répandue – et ce tout spécialement dans le cadre d'applications de portée aussi stratégique que le déchiffrement de messages ennemis ou la mise au point d'armes de guerre - ils faisaient largement, voire très largement appel, à la technologie électronique. Comme nous l'avons déjà indiqué auparavant l'E.N.I.A.C. n'entra en service qu'une fois la seconde guerre mondiale terminée. Bien moins compliqué sur le plan technique que ne l'était le monumental calculateur de Presper J. Eckert et John W. Mauchly – la machine de l'Université de Pennsylvanie comportait près de 18000 tubes à vide alors que l'engin anglais n'en comptait « que » 1500 – *Colossus* fut quant à lui terminé en décembre 1943, soit neuf mois seulement après que sa construction ait débutée. Le système fut livré et commença à fonctionner à la *Government Code and Cypher School* à la fin de ce même mois de décembre 1943. Dès sa mise en service il donna pleine satisfaction à ses utilisateurs, parvenant immédiatement à déchiffrer des messages codés de l'adversaire en des temps record. Il n'est pas vraiment utile de procéder ici à la description exhaustive des caractéristiques techniques de *Colossus* ou bien encore de rentrer dans le détail de son mode de fonctionnement. On se contentera seulement d'indiquer qu'à la manière de l'E.N.I.A.C., il s'agissait d'un calculateur électronique et électromécanique capable d'effectuer parallèlement un certain nombre d'opérations booléennes – notamment des comparaisons croisées -, sur deux ensembles de signes fournis en entrée. Le premier de ces deux groupes de caractères était stocké sous forme digitale au moyen des composants électroniques de la machine tandis que le second, présenté au système en code international Baudot, devait être acquis au moyen d'un lecteur optique dérivé de celui de l'*Heath Robinson*. Toujours à l'instar de l'E.N.I.A.C., quoique de façon incomparablement plus simple puisque l'engin était ultra spécialisé et donc forcément limité en termes de portée fonctionnelle, *Colossus* pouvait être paramétré par le biais de différentes configurations de câblage et d'interrupteurs selon les exigences particulières du moment.

La machine qui avait été construite par Tommy Flowers au *British General Post Office* fonctionna de manière ininterrompue jusqu'au mois de juin 1944. A partir de ce moment, les premiers exemplaires d'une nouvelle version du système (le *Colossus Mark II*), commencèrent à arriver à Bletchley Park. Plus rapides que leur précurseur puisqu'ils étaient capables de traiter quelques 25000 caractères par seconde (alors que la capacité du *Mark I* était limitée à 5000 signes par seconde), ces nouveaux systèmes étaient aussi plus fiables que lui. Au total, et puisque les ingénieurs anglais firent par la suite subir au prototype de 1943 une importante mise à niveau technologique, ce ne sont pas moins de dix dispositifs de ce

genre qui furent successivement assemblés et utilisés par les britanniques durant la seconde moitié du deuxième conflit mondial.

Très longtemps placées sous le sceau du secret défense à la demande expresse de Winston Churchill, les informations concernant les *Colossus* ne commencent à filtrer que depuis le milieu des années quatre-vingt dix. Il faut ainsi savoir qu'au sortir de la guerre, le Premier Ministre britannique ordonna le démantèlement de huit des dix machines existantes, en précisant de surcroît que la taille des pièces résultant de cette opération ne devrait pas excéder celle d'un poing humain. On prétend par ailleurs que c'est Tommy Flowers en personne qui se chargea de jeter les plans des *Colossus* dans un four, à Dollis Hill, dans le courant des années soixante. Selon Anthony E. Sales, fondateur et conservateur du *Bletchley Park Museum* mais aussi rédacteur d'un article très intéressant intitulé *The Colossus of Bletchley Park – The German Cypher System*⁹⁰⁰, deux systèmes seulement échappèrent momentanément à la destruction décidée par le chef du gouvernement. D'après cet auteur, ils transitèrent par Eastcote avant d'être placés en service à Cheltenham, dans les bâtiments du *Government Code Headquarters* (G.C.H.Q.). D'après lui encore, les deux derniers *Colossus Mark II* restèrent au G.C.H.Q. jusqu'au début des années soixante, date à laquelle on les démonta aussi. Comme nous le laissons clairement entendre plus haut, toutes les mesures qui s'imposaient furent par ailleurs mises en œuvre par les autorités compétentes pour garantir que rien ne transpirerait de l'existence même de ces dix machines révolutionnaires. Il fallut en réalité attendre une cinquantaine d'années, et la promulgation, en 1995, du *Freedom Information Act* par les américains, pour voir la *National Security Agency* verser aux Archives Nationales quelques 5000 documents jusque là demeurés top secrets. Assez étrangement, c'est au sein de ces papiers conservés aux Etats-Unis – et non pas en Grande-Bretagne - que les chercheurs découvrirent des informations historiques et techniques de tout premier ordre concernant les systèmes *Colossus* et leur formidable épopée. On a pu ainsi apprendre que ce ne sont pas moins de 65 millions de caractères issus de messages ennemis de haut niveau qui ont été décryptés par ces systèmes hybrides lorsqu'ils étaient en activité. Grâce aux sources américaines, on mesure désormais beaucoup mieux l'ampleur et le caractère crucial de la contribution qui a été celle des *Colossus* dans les mois ayant précédé l'opération *Overlord*. *Colossus* et l'E.N.I.A.C., tout comme *Heath Robinson* avant eux, sont les premiers calculateurs digitaux électroniques à avoir vu le jour dans le monde. Bien que différant très nettement les uns des autres en termes de fonctionnalité, de puissance et de complexité, ces

⁹⁰⁰Reproduit dans [Rojas, Hashagen et al., 2000], pp. 351-364.

trois systèmes furent fabriqués dans une situation d'affrontement généralisé sans précédent dans le but de répondre adéquatement – et de façon extrêmement audacieuse car il s'agissait là d'une première technologique – à des besoins militaires très spécifiques puisque nécessitant une capacité et une rapidité de traitement de l'information complètement inédite alors.

Par le jeu de décisions militaro politiques prises au sortir du deuxième conflit mondial les *Colossus* sont restés dans l'ombre pendant environ un demi siècle tandis que l'E.N.I.A.C., qui rappelons-le a lui aussi fait l'objet d'une classification ultra confidentielle pendant les années de guerre, a presque immédiatement été dévoilé à l'opinion publique une fois le conflit terminé. Ceci et le fait que les individus qui l'ont conçu, non content d'avoir défini le principe de l'ordinateur, sont ensuite devenus les principaux pionniers de l'informatique scientifique et commerciale aux Etats-Unis, a bien sûr très largement contribué à rendre extrêmement populaire cette machine dont on considère en général qu'elle est le premier calculateur électronique au monde. Que cette reconnaissance historique soit ou non méritée⁹⁰¹, il n'en demeure pas moins que les informations récemment divulguées à propos des machines de type *Colossus* tendent à démontrer explicitement que les britanniques, dès les années 1943-44, avaient acquis une expérience absolument remarquable dans le domaine des automates mathématiques à composants électroniques. Ces derniers disposaient en effet de systèmes de cryptanalyse digitaux parfaitement opérationnels et fiables alors qu'à peu près au même moment, les américains commençaient seulement à travailler à la confection des accumulateurs de l'E.N.I.A.C. Cela n'est assurément pas un hasard si les principaux membres du groupe qui a imaginé et réalisé les *Heath Robinson* et les *Colossus* sont dans une large mesure ceux qui ont aussi conçu la *Manchester Machine*, laquelle, avec l'E.D.S.A.C. que Maurice V. Wilkes construisit entre 1946 et 1949 à l'Université de Cambridge, compte parmi les tout premiers ordinateurs opérants au monde. Nul doute, dans ce cas, que l'expérience extrêmement précieuse que les responsables et les personnels concernés de *Bletchley Park* et du *British General Post Office* – le mathématicien Maxwell H. A. Newman en tête - se sont trouvés en mesure d'acquérir au cours de la deuxième guerre mondiale avec les *Colossus* leur a ensuite été d'une aide considérable dans le cadre de ces deux entreprises ambitieuses, quand bien même disposaient-ils à côté de cela de l'appui théorique et technique des américains (sous la forme des conférences *Theory and Techniques for Design of Electronic Digital Computers* et, bien sûr, celle du *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.*).

⁹⁰¹ Elle l'est sans aucun doute si l'on considère l'ampleur de la réalisation de même que la puissance de calcul obtenue.

Avant de nous intéresser à la *Manchester Machine* proprement dit, nous souhaiterions apporter ici quelques brèves précisions concernant Alan M. Turing. Comme nous le précisons en introduction de cette section, le célèbre mathématicien anglais ne rejoignit en réalité l'équipe de l'Université de Manchester qu'au mois de septembre 1948. Entre la fin de l'année 1945 et cette date, A. M. Turing commença à travailler au *design* puis à la fabrication d'un ordinateur - l'*Automatic Computing Engine* ou A.C.E. - au *National Physical Laboratory* de Teddington, un institut scientifique majeur situé tout à côté de la ville de Londres. Nous procéderons à l'étude détaillée de ce système dont Turing, à la demande du Professeur Maurice V. Wilkes, fut le principal maître d'œuvre, un peu plus loin dans cette section consacrée aux premiers ordinateurs britanniques. Dans le présent développement, nous ne mentionnerons le mathématicien qu'à partir du moment où celui-ci intégra effectivement l'équipe de M. H. Newman, à Manchester. Nous reviendrons donc sur la place assurément prépondérante qui fut la sienne dans le développement de l'informatique en Grande-Bretagne lorsque nous examinerons l'A.C.E.

1.1.2. Le *Manchester Mark I* de l'Université de Manchester.

L'ordinateur *Manchester Mark I* a été conçu par le personnel du *Royal Society Computing Machine Laboratory*. Installé, ainsi que nous le précisons en introduction, dans les bâtiments de l'Université de Manchester, ce « laboratoire informatique » avait été établi en ce lieu au cours de la seconde moitié de l'année 1946, à l'initiative de Maxwell H. A. Newman. Membre influent de la prestigieuse société scientifique britannique, le mathématicien était parvenu à convaincre ses collègues de lui accorder une subvention pour mettre en place cette unité de recherches dans le but d'explorer la possibilité de fabriquer un ordinateur. Le tout premier projet mené par le *Computer Laboratory* consista en la fabrication d'un prototype d'ordinateur. Cette petite machine fut en fait réalisée afin de tester les mémoires électrostatiques sur lesquelles Frederic C. Williams avait commencé à travailler à partir du mois de juillet 1946, lorsqu'il œuvrait encore au *Telecommunications Research Establishment* (T.R.E.). Electrotechnicien de réputation internationale, cet ingénieur, après sept années passées au sein de cet institut de recherches en télécommunications – durant la guerre lui et l'équipe qu'il y dirigeait devaient tout particulièrement s'occuper des questions touchant le fonctionnement des radars et celui des systèmes électroniques embarqués dans les avions de combat - rejoignit Manchester. Au mois de décembre 1946, il accepta ainsi un poste de Professeur au département d'électrotechnique de cette université. Entretien par

ailleurs d'excellentes relations professionnelles avec les gens du M.I.T. *Radiation Laboratory*⁹⁰², il fut informé, à l'occasion de deux séjours effectués aux U.S.A. en 1945 et 1946, des tentatives alors effectuées dans ce pays pour stocker des bits d'information en recourant à des tubes cathodiques standards (*Cathode Ray Tubes* ou C.R.T.). On sait également qu'en juin 1946 – c'est-à-dire le mois même où la *Royal Society* accorda la subvention que M. H. Newman avait demandée pour l'établissement du *Computing Machine Laboratory* de Manchester - il visita la *Moore School of Electrical Engineering* et eut l'opportunité d'y voir l'E.N.I.A.C. en opération. De retour en Grande-Bretagne, F. C. Williams décida immédiatement de placer le problème représenté par le stockage des données numériques sur supports électrostatiques au cœur de sa recherche (il devait par ailleurs bénéficier du soutien du T.R.E., lequel était très intéressé par cette classe de travaux). Compte tenu de ce qu'il avait pu entendre ou constater de visu aux Etats-Unis, il était parfaitement conscient du fait que les possibles solutions qu'on se trouverait désormais à même d'apporter à cette question conditionneraient dans une très large mesure le développement des ordinateurs. Dès le mois de novembre 1946, il parvint à stocker un bit en recourant à des C.R.T. du type de ceux, conventionnels, qui étaient utilisés depuis un certain temps déjà dans le domaine de la détection radar. Secondé dans ses travaux par son collègue mathématicien Tom Kilburn (lequel avait obtenu un détachement temporaire du T.R.E. afin de pouvoir le suivre à Manchester), l'ingénieur britannique entreprit ensuite de concevoir une mémoire électrostatique capable de supporter l'enregistrement simultané de 2048 bits. Courant octobre 1947 celle-ci – en fait la base de ce dispositif était un C.R.T. standard de six pouces de diamètre - était opérationnelle.

Deux mois plus tard, autrement dit en décembre, F. C. Williams et T. Kilburn soumièrent au T.R.E. un compte-rendu de travaux intitulé *A Storage System For Use with Binary Digital Computing Machines*⁹⁰³. Dans ce rapport étaient d'abord exposées les

⁹⁰² Eut égard à sa renommée, F. C. Williams fut convié par le M.I.T. à collaborer aux *Radiation Laboratory Series*. Il prit part à la rédaction ainsi qu'à l'édition des volumes 19 (*Waveforms*, MIT Radiation Laboratory Series vol. 19, McGraw-Hill, New York, 1949), et 20 (*Electronic Time Measurements*, MIT Radiation Laboratory Series vol. 20, McGraw-Hill, New York, 1949), de cette collection fameuse.

⁹⁰³ A l'origine, ce rapport fut rédigé par les deux hommes dans la perspective d'obtenir de la part du T.R.E. une deuxième année de crédits pour financer leurs recherches. Daté du 1^{er} décembre 1947 et initialement produit à 20 exemplaires, il fut présenté comme un rapport interne du département d'électrotechnique de l'Université de Manchester. On sait que par la suite, et pour répondre à la demande, 30 copies supplémentaires en furent faites dont une, notamment, devait devenir la propriété de Douglas R. Hartree. Le titre *A Storage System For Use with Binary Digital Computing Machines* fut utilisé à nouveau deux fois au cours des deux années qui suivirent. Une première fois par Tom Kilburn, qui en fit le titre de sa thèse de doctorat, en 1948, et une autre fois pour intituler le premier article détaillant le système de stockage électrostatique mis au point à Manchester (Williams, F C and Kilburn, T, « A Storage System for Use with Binary Digital Computing Machines », Proc. IEEE, Vol. 96, part 2, n° 30, 1949).

recherches qui avaient été réalisées par les deux hommes au cours de l'année 1947. Ils y expliquaient également de manière détaillée la façon dont un iconoscope pouvait être employé en tant que mémoire d'ordinateur. Considéré individuellement, et opéré pour ainsi dire « manuellement », ce système donnait entière satisfaction à ses concepteurs. Cependant ni l'un ni l'autre ne savait encore comment il se comporterait lorsqu'il se verrait soumis aux vitesses phénoménales caractéristiques du fonctionnement des ordinateurs. Ils ignoraient tout, aussi, de la capacité de cette mémoire à retenir indéfiniment les informations qui pourraient lui être confiées entre deux procédures de paramétrage ou deux accès machine successifs. Recueillir ces éléments d'information cruciaux impliquait par conséquent que l'on procède à un test en conditions réelles d'utilisation, en d'autres termes, que l'on relie le C.R.T. mis au point par Williams et Kilburn à un ordinateur. Or comme fin 1947, début 1948, il n'en existait encore aucun en Grande-Bretagne (pas plus du reste qu'il n'y en avait aux Etats-Unis), les deux britanniques n'eurent finalement d'autre solution que celle consistant à en construire un – un *test bed computer* ainsi qu'ils le désignaient parfois – afin de pouvoir tester leur système. La fabrication de la *Small Scale Experimental Machine*, comme on choisit de la désigner⁹⁰⁴, débuta donc en janvier 1948 pour s'achever au début du mois de juin de la même année. L'essentiel du design et de l'assemblage de ce petit système expérimental furent confiés à Tom Kilburn⁹⁰⁵, qui reçut ici l'assistance de Geoff Tootill. Pendant la guerre ce jeune mathématicien diplômé de Cambridge avait tout d'abord commencé par occuper la fonction d'officier scientifique au *Fighter and Bomber Command* avant d'être transféré au T.R.E., afin de travailler sur les radars centimétriques des appareils de la R.A.F.

Nous allons à présent examiner quelques-unes des caractéristiques techniques de la *Small Scale Experimental Machine* puis voir ce qui conduisit l'équipe qui la mit au point à prendre assez rapidement la décision de fabriquer un véritable ordinateur – nous voulons dire un ordinateur « grandeur nature », l'expression prenant à l'époque tout son sens - le *Manchester Mark I*. Lorsque l'on désire s'intéresser à la S.S.E.M., il est essentiel de ne jamais

⁹⁰⁴ La *Small Scale Experimental Machine* (S.S.E.M.), fut rapidement surnommée *The Baby*. Il n'était par rare non plus qu'on la désigne sous les appellations de *Manchester Baby Machine* ou de *Manchester Mark I Prototype*.

⁹⁰⁵ Au début de l'année 1947, Tom Kilburn assista à une série de conférences données par Alan M. Turing au *National Physical Laboratory*. Le logicien y présentait à un public relativement restreint ses travaux sur le design de l'*Automatic Computing Engine*. A l'instar de ce qui avait été décidé pour la mémoire principale de l'E.D.S.A.C. l'autre grand projet d'ordinateur alors en cours en Grande-Bretagne, les concepteurs de l'A.C.E. choisirent d'employer des lignes retard au mercure pour assurer le stockage interne de ses programmes et de ses données. Il est assez difficile de voir dans quelle mesure les choix conceptuels et techniques retenus pour l'A.C.E. influencèrent Tom Kilburn dans son travail sur la S.S.E.M. Dans tous les cas, c'est bien entendu une évidence, il est absolument certain qu'ils n'eurent aucune espèce d'impact sur la mémoire de cette machine étant donné qu'elle fut conçue pour et autour du C.R.T. Williams Kilburn.

perdre de vue le fait que cette machine n'était en réalité qu'un « petit » dispositif, exclusivement destiné à tester en conditions réelles la mémoire électrostatique que Williams et Kilburn avaient élaborée. Si, sur les plans conceptuel et technique, il s'agissait bel et bien d'un système informatique à architecture von Neumann, ce n'était au fond rien d'autre qu'un ordinateur primitif, doté de capacités de traitement de l'information extrêmement limitées. La mémoire principale de la S.S.E.M., puisque c'est pour elle et autour d'elle que fut bâtie cette machine, était un iconoscope de type Williams Kilburn à accès aléatoire de 1024 bits de capacité (ceux-ci étaient organisés sous la forme d'une matrice de 32 x 32 bits). Deux autres C.R.T. étaient également utilisés en guise de mémoires secondaires rapides (*buffers*). Le premier d'entre eux, conventionnellement désigné au moyen de la lettre *A*, était un accumulateur capable de stocker un mot de 32 bits. Le deuxième, de capacité identique, était dédié au stockage simultané de l'adresse de l'instruction en cours d'exécution (notée *CI* pour *Control Instruction*), ainsi qu'à celui de cette même instruction (notée *PI* pour *Present Instruction*). Enfin, un quatrième et dernier iconoscope était employé de façon plus classique, c'est-à-dire à la manière d'un périphérique de sortie graphique. Cet écran autorisait ainsi la visualisation d'une copie du contenu actuel, ou d'une partie du contenu actuel, de l'un ou l'autre des trois autres C.R.T. de la S.S.E.M. Quant au périphérique d'entrée de ce système, qui permettait de configurer manuellement n'importe quel bit ou agencement de bits dans la mémoire centrale, c'était un clavier rudimentaire pourvu de 32 touches et d'un petit nombre de manettes. A l'origine, la famille d'instructions utilisée pour programmer la S.S.E.M. était réduite à la portion congrue puisqu'elle ne comportait que 7 ordres élémentaires (dans ce qui suit *A* représente l'accumulateur, *S* le contenu du mot d'adresse S^{906} , et *CI* l'adresse de l'instruction en cours de traitement).

- $A = - S$
- $A = A - S$
- $S = A$
- Si $A < 0$, $CI = CI + 1$
- $CI = S$
- $CI = CI + S$
- Arrêt

⁹⁰⁶ Notons qu'il s'agit là d'un mode d'adressage relativement sophistiqué puisqu'il est indirect. En lieu et place de localiser une chaîne binaire en fournissant son adresse absolue en mémoire, comme on le fait effectivement dans le cas de l'adressage direct, on le localise à partir de données dont certaines sont variables.

Ajoutons encore que sur la S.S.E.M. le temps d'exécution unitaire d'une procédure mémoire triviale – comme le sont par exemple l'écriture, la lecture, et le rafraîchissement d'un bloc standard de données binaires – excédait légèrement 300 millisecondes (ici pour un mot informatique d'une longueur de 32 bits). La mémoire principale, autrement dit le tube cathodique spécialement modifié qui constituait la raison d'être tout de même que le cœur de ce prototype, voyait son contenu complètement régénéré toutes les 16 instructions. Sachant que l'exécution d'une instruction nécessitait, en moyenne, 1,2 milliseconde, l'ensemble du processus réclamait par conséquent entre 19 et 20 millisecondes.

Dans un article intitulé « Early Computers at Manchester University », F. C. Williams a relaté la première fois où la *Small Scale Experimental Machine* fut testée avec succès :

«Une fois la machine terminée, un programme fut laborieusement inséré et son bouton de mise en route fut pressé. Immédiatement, les points sur l'écran de contrôle entrèrent dans une danse folle. Durant les premiers essais, ce fut une danse mortelle ne conduisant à aucun résultat utilisable, et ce qui était encore pire, ne fournissant aucune espèce d'indice quant à ce qui n'allait pas. Mais un jour cela prit fin et là, brillant légèrement à la bonne place, il y avait la réponse attendue. Ce fut un moment mémorable. C'était au mois de juillet 1948, et désormais plus rien ne serait jamais comme avant. Nous savions que seuls du temps et des efforts étaient requis pour fabriquer une machine de taille signifiante. Nous doublâmes nos efforts immédiatement en engageant un second technicien⁹⁰⁷ ».

Prenons tout d'abord acte du fait que la date mentionnée ici par F.C. Williams est quelque peu inexacte. La procédure de test à laquelle il est fait référence dans ce texte eut en réalité lieu le 21 juin 1948, et durant le mois de juillet de cette même année. Le programme dont il est ici question était une petite routine de division basée sur la méthode de l'itération de la soustraction (la S.S.E.M. ne possédant pas de circuit diviseur, ses concepteurs n'eurent d'autre solution ici que celle consistant à recourir de façon répétée au circuit de la soustraction). Comprenant 17 instructions machine, celle-ci avait été encodée par Tom Kilburn, et permettait de déterminer le plus grand facteur premier d'un nombre donné. Rapidement les premiers essais se révélèrent concluants et bientôt la machine, toute limitée qu'elle était, put travailler sur des nombres aussi grands que 2^{18} . Le 21 juin 1948 fut donc,

⁹⁰⁷ F. C. Williams, « Early Computers at Manchester University », *The Radio and Electronic Engineer*, Vol. 7, n°45, Juillet 1975, pp. 237-331. La traduction est nôtre. Philippe Breton en propose également une in [Breton, 1990], pp. 101-102.

selon les mots mêmes de l'auteur, un « moment mémorable ». Les termes employés ici par F.C. Williams ne sont certainement pas exagérés dans la mesure où le succès rencontré par la S.S.E.M. devait représenter la preuve matérielle première et irrécusable, d'une part et en tout premier lieu, de la faisabilité et de la validité du concept de machine universelle numérique à programme interne, et, d'autre part, de celles de la mémoire R.A.M. à iconoscope inventée et fabriquée par F.C. Williams et T. Kilburn. L'obtention de ce double résultat historique⁹⁰⁸ puis celle d'autres issues probantes persuadèrent très rapidement les responsables du projet S.S.E.M. de la nécessité de passer à l'étape suivante, laquelle, comme on le devine, consistait à démarrer la fabrication d'un « véritable » ordinateur, autrement dit la production d'un système informatique réellement utilisable dans un cadre scientifique. En octobre 1948 – soit un mois après qu'Alan M. Turing ait officiellement pris ses fonctions de *Deputy Director of the Royal Society Computing Machine Laboratory* - la décision de construire cette machine fut définitivement arrêtée. Dans le même temps, son architecture de base se vit fixée et l'équipe chargée de sa conception renforcée⁹⁰⁹. Un contrat liant l'Université de Manchester, le gouvernement anglais et l'industriel britannique *Ferranti Limited* fut également conclu dans la perspective de produire le futur *Manchester Mark I*.

Concernant ce système, une chose se doit maintenant d'être éclaircie sous peine de risquer de prêter à confusion par la suite. Si l'on tient compte de la *Small Scale Experimental Machine* dans cette énumération – et il n'existe à notre sens aucune espèce de motif valable pour qu'on ne le fasse pas – on remarque qu'en fait l'ordinateur *Manchester Mark I* connut pas moins de trois versions différentes. Comme nous venons de le voir, la S.S.E.M. représenta en quelque sorte le prototype de ce système⁹¹⁰. Une deuxième machine, sorte de réalisation intermédiaire entre la S.S.E.M. et le *Manchester Mark I*, fut mise en chantier à partir d'avril 1949 puis subit de constantes améliorations jusqu'aux mois d'octobre/novembre de la même année. Il s'agissait là d'un « véritable » ordinateur équipé d'une mémoire principale à C.R.T.

⁹⁰⁸ Certains, en raison de ce qui vient d'être expliqué, considèrent que la S.S.E.M. fut le premier ordinateur opérationnel de l'histoire. D'autres, à cause des importantes limitations dont souffraient son processeur et sa mémoire, estiment au contraire qu'il ne s'agissait que de l'ébauche d'un système nécessairement appelé à posséder davantage de puissance (même si celle dont il disposait lui permit bel et bien de faire fonctionner de petits programmes). Quoi qu'il en soit et malgré sa simplicité, la S.S.E.M. était bel et bien une machine à architecture von Neumann et en tant que telle, c'était effectivement un ordinateur. A notre sens on peut donc fort légitimement soutenir la première thèse.

⁹⁰⁹ Au cours de cette période intégrèrent l'équipe de développement du *Manchester Mark I* de façon permanente : Dai B. Edwards (chargé de la mémoire à C.R.T. et du processeur du système), Alec A. Robinson (chargé des circuits multiplicateurs), et Gordon E. Thomas (chargé de la mémoire à tambour magnétique).

⁹¹⁰ Sachant qu'au départ elle n'avait pas été construite dans la perspective de fabriquer un véritable ordinateur mais pour tester un système mémoire.

de grande capacité⁹¹¹, de circuits arithmétiques et logiques complets, et d'éléments périphériques divers. La rupture technologique existant entre ce système et l'élémentaire S.S.E.M. était tout particulièrement nette. On n'avait plus affaire ici à un « ordinateur minimal », ou, si l'on préfère, à une esquisse concrète et tout juste opérante de machine de von Neumann – faute de puissance bien entendu - mais à un dispositif informatique presque totalement opérationnel⁹¹² capable de traiter en des délais raisonnables une gamme étendue de problèmes. C'est à partir des perfectionnements apportés successivement à ce dispositif informatique que naquit peu à peu, si l'on ose dire, le *Mark I*. Enfin, comme précisé plus haut, une troisième et ultime version de cet ordinateur – destinée dans un premier temps à l'Université de Manchester et ensuite à la commercialisation - fut construite puis enfin introduite sur le marché à partir du mois de février 1951 par la firme britannique *Ferranti Ltd*⁹¹³.

L'expérience acquise grâce à la *Small Scale Experimental Machine* permit à l'équipe du *Mark I* d'entamer la fabrication d'un ordinateur à échelle « normale » en sachant pertinemment qu'un espace mémoire de taille importante serait forcément requis pour permettre à cette machine de fonctionner dans de bonnes conditions. Quelques 4000 mots informatiques de capacité, pensait-on alors, semblaient constituer une limite basse acceptable pour pouvoir exécuter des applications de portée générale. Cependant comme la capacité individuelle de stockage d'un C.R.T. Williams Kilburn double densité n'était que de deux « pages » ou zones de 40x32 bits chacune (soit 2x1280 bits ou 2x32 mots de 40 bits au total), il aurait nécessairement fallu concevoir une mémoire centrale composée de plus d'une centaine d'iconoscopes pour atteindre cette spécification⁹¹⁴. Même si en droit c'était une chose parfaitement réalisable, on ne peut que très difficilement parvenir à concevoir le cauchemar d'ingénierie que l'assemblage, la synchronisation et la maintenance d'une pareille installation auraient représenté pour les hommes du *Computer Laboratory* de Manchester. De surcroît, son coût aurait forcément été très élevé. Pour ce faisceau de raisons, on décida finalement que la mémoire principale du *Mark I* incorporerait deux niveaux parfaitement

⁹¹¹ La longueur du mot informatique fut ainsi portée à 40 bits (au lieu de 32 bits précédemment), ce qui permettait de stocker un nombre de 40 bits ou deux instructions de 20 bits.

⁹¹² Seules ses unités périphériques ne l'étaient pas encore.

⁹¹³ On sait qu'une version révisée du *Ferranti Mark I* appelée *Ferranti Mark I** fut mise sur le marché peu de temps après que les deux premiers exemplaires de cette machine aient été respectivement livrés à l'Université de Manchester et à l'Université de Toronto. A proprement parler le *Mark I** ne constituait qu'une légère évolution de son prédécesseur. Aussi, lorsqu'il en est fait mention, préfère-t-on ne pas le considérer comme une quatrième version du *Manchester Mark I* (ou une deuxième du *Ferranti Mark I*).

⁹¹⁴ Ainsi que cela est clairement indiqué dans le paragraphe « A Magnetic Store » de *The University of Manchester Computing Machine*, la conférence conjointement rédigée par F. C. Williams et T. Kilburn qui fut prononcée au cours du mois de juillet 1951, à l'occasion de la cérémonie d'inauguration du *Manchester Mark I*.

distincts. Le premier - l'élément de stockage de masse si l'on veut - devait être constitué par un tambour magnétique rapide (ce dernier élément, dont la vitesse était de 2300 tours par minute est parfois désigné au moyen du terme *wheel* - roue en français - dans la littérature consacrée au *Mark I*). Solution de stockage économique par excellence, ce tambour, dont les éléments mécaniques des versions finalisées devaient être construites par *Ferranti Ltd*, comportait autant de têtes de lecture/écriture qu'il possédait de pistes magnétiques circulaires et parallèles, c'est-à-dire 64. Chacune d'entre elles était organisée en deux « pages » - deux demi cercles donc - de 1280 bits de capacité unitaire (une piste de deux pages pouvait par conséquent stocker 2560 bits). Ce dispositif magnétique était connecté à un couple de C.R.T. Williams Kilburn double densité. Formant la couche ultrarapide de la mémoire centrale composite du *Mark I*, ces deux iconoscopes pouvaient au total enregistrer 5120 bits, c'est-à-dire quatre pages mémoire de 1280 bits. Sachant que le tambour du *Mark I* était installé dans un local situé au dessus du reste de l'installation - et ce dans le but de prévenir le risque non négligeable que représentait le bruit électromagnétique engendré en permanence par sa rotation - un grand soin fut apporté à la circuiterie électronique assignée au contrôle du transfert bidirectionnel des données informatiques entre les deux sections de la mémoire. En synchronisant très précisément la rotation du tambour magnétique avec la phase de rafraîchissement des écrans C.R.T., les chercheurs et techniciens du *Computer Laboratory* parvinrent à réaliser le transfert des informations d'un point à un autre de la mémoire sans qu'il y ait de délai d'attente véritablement perceptible par les utilisateurs de l'ordinateur.

Incorporée à cette étonnante mémoire centrale à double niveau, une autre innovation technologique remarquable - en ceci qu'elle constituait une évolution par rapport à cette référence à la fois basique et essentielle qu'était le modèle von Neumann - fit pour la première fois son apparition ici: le registre d'index. Baptisée *B-Tube*⁹¹⁵, une troisième unité C.R.T. ayant précisément pour fonction d'assurer le support matériel de deux registres spéciaux - nommés *B-Line 0* et *B-Line 1* ceux-ci devaient en fait être employés à la manière de nos actuels registres d'index - se vit ainsi rattachée au couple d'éléments cathodiques qui constituait déjà le cœur de la section électronique de la mémoire principale de la machine. En usant astucieusement des valeurs numériques qui pouvaient être stockées dans ces deux petites mémoires temporaires - lesquelles offraient chacune quelques 20 bits de capacité - les programmeurs du *Mark I* se rendirent compte qu'ils avaient la possibilité, entre autres artifices programmatiques diversement concevables, de modifier le contenu du champ adresse

⁹¹⁵ Les deux *Cathode Ray Tubes* formant la partie électronique de la mémoire centrale du *Manchester Mark I* avaient précédemment reçu l'appellation d'unité A (pour *Accumulator*), et d'unité C (pour *Control*).

des instructions de l'ordinateur, autrement dit d'intervenir de façon indirecte, et en fonction des exigences du moment bien entendu, sur le déroulement de son programme dans le temps même où celui-ci se voyait exécuté.

Du mois d'avril 1949, date qui marqua les débuts véritables de la construction du *Mark I*, aux mois d'octobre/novembre 1949, moment où ses concepteurs commencèrent effectivement à le considérer comme achevé, un certain nombre d'améliorations furent comme nous l'indiquions plus haut graduellement apportées à ce système informatique. Entre autres choses notables, on peut faire mention ici du perfectionnement du système automatique chargé de la gestion des échanges bidirectionnels d'information entre les deux niveaux de la mémoire de l'ordinateur. Dans le courant de l'année 1949, on parvint à faire en sorte que ce système puisse être appelé, et donc contrôlé, directement à partir des instructions chargées dans la mémoire centrale de la machine. Ainsi, au gré des besoins et grâce à la programmation, les opérateurs du (futur) *Mark I* se trouvaient-ils en mesure de transférer automatiquement n'importe quelle séquence de données binaires présente sur son cylindre magnétique vers l'une ou l'autre de ses différentes unités d'enregistrement électrostatiques. L'opération contraire pouvait bien évidemment être réalisée en recourant à un schéma opératoire similaire. Les périphériques d'entrée/sortie employés afin d'introduire les informations dans la machine puis de recueillir celles-ci une fois traitées firent eux aussi l'objet d'un important travail de mise à niveau ou de développement. Jusqu'ici en effet c'était un clavier binaire très simple qui avait servi à entrer instructions et données dans la mémoire principale de l'ordinateur tandis que la lecture des résultats, elle, s'était effectuée en procédant directement à l'inspection visuelle d'un des tubes cathodiques du système. On sait fort bien que, concernant le projet *Manchester Mark I*, l'essentiel des contributions d'Alan M. Turing porta avant toute autre chose sur la résolution de questions d'ordre logico-programmatique. Ainsi c'est A. M. Turing qui fut à l'origine de l'adoption du système numérique en base 32 pour cet ordinateur. Le choix de cette solution – laquelle se traduisait pour les utilisateurs de la machine par l'obligation incontournable et bien peu confortable d'écrire leurs programmes au moyen d'un jeu de caractères de téléimprimeur codés sur 5 bits - trouve sans nul doute sa source dans le fait que le mathématicien s'était longuement familiarisé avec ce type de format quant il travaillait au décryptage des chiffres militaires allemands à Bletchley Park⁹¹⁶. A. M. Turing définit aussi la méthode d'organisation des programmes de *Mark I* (celle-ci fut baptisée « Scheme A »), son jeu d'instructions élémentaires et il développa par ailleurs l'essentiel de ses

⁹¹⁶ Précisions que l'utilisation de ce format fut maintenue jusqu'en mars 1954, date à laquelle on introduisit le langage de programmation créé par R. A. Brooker, le *Mark I Autocode*.

routines élémentaires. En outre la rédaction du manuel de programmation du *Ferranti Mark I* doit également être portée à son crédit.

Du fait des importantes responsabilités militaro scientifiques qui, pendant la deuxième guerre mondiale, avaient été les siennes à la *Government Code & Cypher School*, le mathématicien était également resté en contact plus ou moins étroit avec les gens du *Foreign Office Department of Communications* de Bletchley Park. Sans rencontrer de grandes difficultés, il réussit donc à se procurer auprès de cet organisme d'état des équipements photoélectriques et électromécaniques de lecture et d'impression (il est d'ailleurs intéressant de noter qu'au nombre de ces divers instruments figurait notamment un clavier perforateur de bande papier à cinq trous confisqué aux forces armées allemandes). Avec l'assistance du physicien et électronicien Dai B.G. Edwards, A. M. Turing procéda à la modification de ces dispositifs en mettant au point pour eux des circuits électroniques⁹¹⁷ et des procédures logicielles destinés à assurer le contrôle et la transmission des flux d'information entrants et sortants. Le transfert de ces ensembles de données binaires entre les cinq dernières positions numériques de l'accumulateur de la machine (c'est-à-dire le C.R.T. A), les éléments électrostatiques et magnétiques de sa mémoire centrale et ses périphériques d'entrée/sortie constituaient donc une opération intégralement programmable, de sorte que la machine, une fois configurée, pouvait piloter ses systèmes externes de façon automatique.

Généralement qualifiée de version « finale » dans les travaux consacrés aux ordinateurs qui virent le jour durant les années d'immédiat après-guerre, la variante du *Mark I* dont nous venons d'examiner quelques-unes des principales caractéristiques conceptuelles et techniques est celle qui servit effectivement de prototype à l'industriel britannique *Ferranti Ltd* pour la fabrication de la déclinaison commerciale de l'ordinateur de l'Université de Manchester. Les nouvelles propriétés du *Mark I* – nous écrivons « nouvelles » pour les distinguer des propriétés de la version « intermédiaire » de cette machine auxquelles elles purent être ajoutées ou bien encore substituées – sont résumables comme suit :

- Instructions de 20 bits de long comportant trois champs distincts (un pour les adresses des C.R.T., un pour la *B-Line*, et enfin un pour le code de l'instruction proprement dit).

⁹¹⁷ Turing conçut par ailleurs un circuit électronique générateur de nombres pseudo aléatoires pour le *Mark I*.

- Mémoire interne structurée en lignes adressables de mots de 40 bits de longueur. Chacune de ces lignes pouvant assurer le stockage de deux instructions longues de 20 bits ou bien d'un nombre long de 40 bits.
- Deux registres spéciaux (*B-Line 0* et *B-Line 1* sur le C.R.T. Williams *B-Tube*), autorisant *inter alia* la modification du champ « adresse » des instructions.
- Tambour(s) magnétique(s) *Ferranti Ltd* doté d'une capacité de 128 pages et d'un temps de révolution d'approximativement 30 millisecondes⁹¹⁸.
- Temps moyen d'exécution pour une instruction standard: 1,8 millisecondes (sachant par ailleurs que le temps d'exécution de la multiplication réclamait environ 0,9 milliseconde pour chaque bit présent dans l'unité multiplicatrice).
- Adjonction de périphériques d'entrée/sortie et d'instructions spécifiques permettant au système de piloter automatiquement la lecture et l'impression de données à partir de et sur des cartes perforées, tout de même que le transfert d'informations d'un secteur de la mémoire centrale à l'autre.

Dans les tout derniers mois de l'année 1949 l'ordinateur de l'Université de Manchester était devenu complètement opérationnel. Il est vrai que, déjà, les 16 et 17 juin 1949, la fiabilité tout de même que la précision de la version « intermédiaire » de cette machine avaient été fermement établies. Neuf heures durant en effet, celle-ci avait effectué des calculs sur les nombres premiers de Mersenne⁹¹⁹ sans que ses opérateurs n'aient à déplorer de dysfonctionnements notables⁹²⁰. De fait il n'est peut-être pas inutile de rappeler maintenant qu'à l'époque que nous considérons, un programme informatique qui était exécuté sur un intervalle de temps aussi remarquablement long sans que ne soient rencontrées de

⁹¹⁸ Un second tambour magnétique réalisé en très grande partie par *Ferranti Ltd* fut très vraisemblablement rattaché au *Mark I* dans le courant du mois de décembre 1949. Cela devait au final porter la capacité de stockage du système à 3000 mots de 40 bits.

⁹¹⁹ Dans *The University of Manchester Computing Machine*, conférence prononcée en juillet 1951 à l'occasion de la cérémonie officielle d'inauguration du *Mark I*, Frederic C. Williams et Tom Kilburn indiquèrent qu'ils n'entendaient nullement limiter le domaine d'utilisation de cet ordinateur au traitement d'une classe particulière de questions mathématiques. Tout au contraire envisageaient-ils de faire travailler la nouvelle machine sur une gamme étendue de problèmes, choisis pour leur diversité. A la fin de cette intervention, les deux hommes dressaient d'ailleurs la liste des problèmes qui, selon leurs termes propres, étaient appelés à être traités dans un « futur immédiat ». Ainsi était-il question de résolution d'équations différentielles partielles (celles-ci étant issues du champ de la biologie), d'algèbre matricielle et d'équations différentielles linéaires (avec leurs applications à la distribution de l'électricité et aux industries du coton et de l'aéronautique), de tabulation des fonctions de Laguerre (ici en relation avec le contrôle d'armes guidées), de conception de systèmes optiques, de synthèse de Fourier dans le domaine de la cristallographie par rayons X, et de problèmes d'Echecs.

⁹²⁰ Rappelons si besoin est que cette version du *Mark I* ne disposait pas de périphériques d'entrée/sortie, pas plus du reste que de moyens permettant de transférer automatiquement les « pages » de données binaires entre les parties magnétiques et électrostatiques de sa mémoire interne. Toutes ces opérations étaient donc prises en charge par des opérateurs humains.

difficultés véritables dans le déroulement même du processus représentait déjà une chose singulièrement rare. Compte tenu des résultats plus qu'encourageants que l'équipe de conception du *Manchester Mark I* enregistra au début de l'été 1949, ses efforts se concentrèrent désormais non seulement sur le perfectionnement du système en vue de sa finalisation bien entendu, mais aussi, graduellement, sur l'adaptation de son design, ou de son architecture élémentaire, à la fabrication d'un modèle destiné à la commercialisation. Comme nous l'avons signalé plus haut, la collaboration entre les gens de l'Université de Manchester et l'industriel *Ferranti Ltd* démarra assez précocement dans l'histoire de la genèse de cette machine. Au cours du dernier trimestre de l'année 1948, l'attention du Conseiller Scientifique en Chef du gouvernement britannique, Sir Ben Lockspeiser, fut attirée sur le projet passablement inouï dont le développement venait de commencer au sein des installations du *Manchester Royal Society Computing Machine Laboratory*. C'est Patrick M. S. Blackett, Professeur à l'Université de Manchester et prix Nobel de physique en 1948, qui estima absolument indispensable le fait de faire découvrir cet instrument d'un genre nouveau à l'influent conseiller scientifique du gouvernement de sa Majesté. Alors qu'au mois d'octobre 1948 Sir Lockspeiser rendait une visite informelle à son collègue P. M. S. Blackett, il fut convié par son hôte à assister à une démonstration du fonctionnement du *Mark I*. Accomplie par Geoff C. Tootill celle-ci se révéla tellement impressionnante, et par conséquent si convaincante, que quelques jours seulement après avoir vu le prototype de l'ordinateur en opération, Sir Lockspeiser rédigea un courrier officiel à l'intention d'Eric Grundy, le directeur du département instruments de la firme *Ferranti Ltd.*, afin d'autoriser cette entreprise « à procéder selon les lignes ayant été discutées, à savoir, construire une machine à calculer électronique en se conformant aux instructions [ou spécifications] du Professeur F. C. Williams⁹²¹ ». D'une manière étonnamment rapide, c'est-à-dire dans les quelques jours qui suivirent la rédaction de cette correspondance, un contrat engageant le gouvernement britannique, l'Université de Manchester et la firme *Ferranti Ltd.* fut signé. Prenant effet dans les premiers jours du mois de novembre 1948 et courant sur une période d'une demi-décennie, cet arrangement prévoyait le versement annuel d'une somme de 35000 livres sterling. Bien entendu, et parce qu'il fut stable, durable et fécond, le lien de coopération que cet accord officiel permit d'initier entre les trois entités signataires se révéla au moins aussi décisif pour le développement futur de l'informatique en Grande-Bretagne que le colossal investissement financier dont il s'accompagnait par ailleurs. Cette convergence, remarquons-le bien ici,

⁹²¹ Lettre de Sir Ben Lockspeiser à E. Grundy, *Ferranti Ltd.*, en date du 26 octobre 1948.

répondait exactement au schéma triptyque université/gouvernement/entreprise déjà en place - ou en passe de l'être - aux Etats-Unis. La recherche et le développement afférents aux monstrueux prototypes électroniques caractéristiques de la première informatique, tout comme du reste leur construction, exigeaient ainsi que nous l'avons déjà vu que les institutions engagées dans ces processus solidaires procèdent avec régularité à des dépenses lourdes, et ce sur des intervalles de temps relativement longs. Or pareille mobilisation de ressources ne pouvait se voir effectivement et efficacement réalisée que dans le cadre d'une association multipartite, autrement dit d'une synergie mêlant protagonistes des domaines scientifique, technologique, politique et logistique. Même si de part et d'autre de l'océan Atlantique les moyens engagés étaient radicalement différents, en définitive, on s'en aperçoit, la façon dont les choses étaient fondamentalement organisées ne variait guère.

Le tout premier ordinateur fabriqué par *Ferranti Ltd* fut installé dans les locaux de l'Université de Manchester au mois de février 1951. Fondamentalement, c'est-à-dire sur le plan architectural élémentaire, cette machine quelquefois appelée *Manchester University Electronic Digital Computer* (M.U.E.D.C.), *Manchester Automatic Digital Machine* (M.A.D.M.), *Manchester Electronic Computer Mark II* mais bien plus souvent encore *Ferranti Mark I* était quasiment identique à la version du *Mark I* qui avait fonctionné à l'Université au mois d'octobre 1949. Par rapport à son prédécesseur immédiat l'ordinateur assemblé par *Ferranti Ltd* était tout de même porteur d'un certain nombre d'améliorations plus ou moins substantielles. Lorsqu'elles ne résultaient pas d'un commun effort, quelques-unes étaient l'œuvre du personnel de l'industriel de Manchester tandis que d'autres revenaient aux gens du *Computer Laboratory*. Les perfectionnements les plus remarquables apportés ici par l'une et/ou l'autre partie étaient sans conteste possible ceux qui suivent:

- Accroissement des capacités de stockage électrostatique et magnétique de l'ordinateur (augmentation du nombre de *Cathode Ray Tubes* et de tambours pour des capacités respectivement portées à 256 et 16384 mots de 40 bits),
- Ajout de *B-lines* (à présent au nombre de 8).
- Adjonction d'un circuit multiplicateur à architecture parallèle offrant un temps de réponse stable de 2,16 millisecondes pour l'exécution d'une multiplication.
- Répertoire d'instructions élargi (50 codes prédéfinis sur 64 disponibles au total).

Pour donner une idée générale de ce à quoi ressemblait le premier ordinateur séquentiel jamais commercialisé dans le monde, nous pouvons sans doute faire mention des quelques éléments d'information suivants. Comme on peut facilement s'y attendre, les dimensions de ce système étaient pour le moins respectables. Outre une console de contrôle destinée à son opérateur, le *Ferranti Mark I* était composé de deux modules – encore désignés sous l'appellation de « baies » - mesurant chacun 4,88 mètres de long, 2,44 mètres de haut et 1,20 mètre de profondeur. Le volume et la surface occupés par l'ensemble étaient de 1220 m³ et 183 m². Sa masse de 4,54 tonnes. Consommant 24 KW, et donc refroidi en permanence par un système de ventilation pourvu d'un échangeur thermique (couplé lui-même à une unité de refroidissement située à l'extérieur), ce colosse électronique renfermait quelques 3300 tubes à vide, 1000 diodes cristal, 1500 double diodes, 1500 pentodes, 220 double triodes, 15000 résistances en plus d'une dizaine de kilomètres de câbles divers. Le dispositif électromécanique de lecture de bandes servant de périphérique d'entrée au système était capable de traiter 200 caractères à la seconde. En sortie, un téléimprimeur et un perforateur de cartes autorisaient quant à eux le recueil des données traitées aux vitesses respectives de 7 et 15 caractères à la seconde. Ajoutons que quelques temps après la mise sur le marché effective du *Ferranti Mark I*, une imprimante parallèle fut proposée par le constructeur anglais qui permettait d'imprimer 150 lignes par minutes (chaque ligne consistant ici en 64 caractères alphanumériques). Ainsi qu'il a déjà été dit, la machine de Manchester était capable de performances plutôt remarquables en matière de stockage et de temps requis pour l'exécution des opérations arithmétiques de base puisque la capacité de ses C.R.T. et celle de son tambour magnétique s'élevaient respectivement à 10000 et 650000 chiffres binaires pendant que les temps nécessaires pour effectuer une multiplication et une addition, toujours respectivement, étaient de 2,16 et 1,2 millisecondes. Pour la réalisation d'opérations un peu plus complexes, telles l'extraction de racines carrées ou bien encore le calcul de cosinus d'angles, les temps de calcul se situaient dans une fourchette allant de 80 à 120 millisecondes. Aussi insignifiantes que ces performances techniques puissent nous paraître - c'est tout spécialement le cas si volontairement ou non nous nous laissons aller à les comparer à celles des ordinateurs disponibles à l'ors actuel - il n'en demeure pas moins qu'elles correspondaient à ce qui se faisait de mieux en matière d'informatique au commencement des années cinquante.

Pour preuve les capacités de traitement informatique offertes par ce nouvel instrument scientifique excédaient de loin les besoins qui, alors, étaient ceux de l'Université l'abritant. Etant donné que du temps machine était disponible et que ce dernier paraissait pouvoir être commercialisé, décision fut prise d'ouvrir l'usage du *Mark I* – après tout l'ordinateur devait

bel et bien être vendu par *Ferranti Ltd* - à des utilisateurs extérieurs bien sûr dûment sélectionnés. Au nombre des institutions qui eurent quelquefois recours à cette machine on compta des universités, mais aussi des industries. On sait également que le Dr Alec Glennie, chercheur à l'*Atomic Weapons Research Establishment* et par ailleurs concepteur de ce que beaucoup considèrent comme le premier compilateur au monde, vint à plusieurs reprises à Manchester afin d'y réaliser une intensive campagne de calculs. Placée sous le sceau du plus grand secret puisqu'elle était directement liée à la mise au point d'armes atomiques, celle-ci fit par conséquent de l'armée britannique un des tout premiers utilisateurs des ordinateurs fabriqués sur son territoire.

Le système de base coûtait à l'époque entre 300000 et 350000 dollars. Le 30 avril 1952, c'est-à-dire quelques mois après que l'Université de Manchester ait réceptionné son ordinateur - en vérité le premier à être sorti des lignes de production de *Ferranti Ltd* - celle de Toronto⁹²², au Canada, pris possession du sien. Aussitôt rebaptisée FERUT, pour *FERranti University of Toronto*, cette machine servit essentiellement à la réalisation de calculs d'ordre général. On sait par exemple qu'il fut grandement sollicité dans le cadre de la conception du canal du Saint Laurent ou encore dans celui de travaux d'analyse sismographique. Après que cette double livraison ait été effectuée, l'entreprise *Ferranti Ltd*, avec le soutien financier du *National Research Development Corporation*, se mit à travailler à la mise au point d'une version légèrement améliorée du *Mark I*. Disposant d'un répertoire d'instruction allégé, d'un code machine sur 5 bits simplifié et d'une capacité de stockage un peu plus importante que celle qui avait caractérisée les deux machines antérieurement introduites sur le marché⁹²³, cet ordinateur - le *Mark I** ou *Mark I Star* - commença à être livré à ses commanditaires à partir de 1953.

La machine à architecture von Neumann conçue à l'Université de Manchester et produite par la firme britannique *Ferranti Ltd* entre les années 1947-48 et 1951 est surtout connue pour avoir été le premier ordinateur disponible commercialement. Comme de bien entendu, ceci constitue un élément d'information « visible » et important et tant que tel, il ne saurait être négligé. Cependant il convient aussi de ne pas s'arrêter à ce seul point. Ainsi que nous l'avons vu, la conception puis la construction du *Manchester Mark I* fut l'occasion, pour les institutions scientifiques, gouvernementales, militaires et industrielles britanniques de

⁹²² Il est à noter qu'en août 1948, l'Université de Toronto avait elle-même démarré un projet visant à concevoir et fabriquer un ordinateur scientifique à opération parallèle. Dénommé U.T.E.C. (pour *University of Toronto Electronic Computer*), son développement fut abandonné au profit de l'acquisition d'un *Ferranti Mark I*, alors qu'un prototype certes opérationnel, mais peu fiable, venait d'être mis au point (la construction du système « définitif », elle, n'avait cependant pas été entamée).

⁹²³ Les C.R.T. pouvaient stocker un total de 416 mots de 40 bits et les tambours, 16384 mots de 40 bits.

tisser des liens de partenariat solides, et de toute façon absolument nécessaires, au développement des premiers ordinateurs. A la même période, il n'en allait pas autrement aux Etats-Unis. On a aussi vu que des mathématiciens prestigieux - tels Maxwell H. A. Newman ou Alan M. Turing – prirent une part extrêmement active à ce projet. Il en fut de même pour des « anciens » peut-être un peu moins connus de la *Government Code and Cypher School* ou du *Telecommunications Research Establishment*⁹²⁴. Le fait est que la plupart des hommes du *Royal Society Computing Machine Laboratory* de l'Université de Manchester, scientifiques ou ingénieurs, avaient joué un rôle décisif, quoique parfois tragiquement méconnu puisque très souvent tenu secret, dans l'effort de guerre mené par les alliés. Qu'ils aient jadis œuvré à la fabrication d'instruments électromécaniques pour l'analyse des chiffres ennemis ou bien à celle de dispositifs de repérage radar, le *Manchester Mark I* fut de toute façon le bénéficiaire ultra privilégié de l'incalculable expérience qu'ils avaient été en mesure d'acquérir au cours de la deuxième guerre mondiale. L'usage qui fut fait des tubes cathodiques pour constituer une partie de la mémoire principale de cet ordinateur constitue à notre sens un des témoignages les plus évidents de cela. Porteuse d'un certain nombre d'innovations technologiques, par exemple la mémoire à double niveau contrôlée automatiquement et les *B-lines* (registres d'index), cette machine inaugura une assez longue lignée d'ordinateurs⁹²⁵ en même temps qu'elle contribua incontestablement à faire de *Ferranti Ltd* un acteur reconnu du marché informatique naissant.

Alors même que les personnels du *Royal Society Computing Machine Laboratory* et de *Ferranti Ltd.* imaginaient et fabriquaient le *Mark I*, d'autres équipes de scientifiques et de techniciens, dans d'autres centres de recherche universitaires britanniques, travaillaient elles aussi à la conception d'ordinateurs. Parmi ces dernières machines figurait notamment l'E.D.S.A.C. de l'Université de Cambridge.

1.1.3. L'E.D.S.A.C. de l'Université de Cambridge.

Les phases de conception et de réalisation de l'E.D.S.A.C. (l'acronyme signifie *Electronic Delay Storage Automatic Computer*), se sont déroulées entre le mois d'octobre 1946 et le mois de mai 1949. Comptant effectivement au nombre des tout premiers ordinateurs construits de par le monde, il n'est pas exceptionnel que l'E.D.S.A.C. soit

⁹²⁴ Nous pensons ici en particulier à Frederic C. Williams et à Tom Kilburn.

⁹²⁵ Aux *Mark I* et *Mark I** du début des années cinquante succédèrent ainsi les séries *Mark II* (ou M.E.G. pour *Megacycle Engine*), *Pegasus* (1956), *Mercury* (1957), *Perseus* (1959), *Sirius*, *Apollo* (1961), *Atlas* et *Poseidon* (1962).

présenté comme la machine qui ravit à l'E.D.V.A.C. de la *Moore School of Electrical Engineering* la distinction par ailleurs informelle de « premier ordinateur opérationnel de l'histoire ». En vérité, et si l'on nous autorise ici l'ouverture d'une très brève parenthèse, c'est toujours oublier un peu vite ici l'antériorité de la *Small Scale Experimental Machine*, le prototype qui servit à la fois de modèle et de creuset technologique aux différentes versions du *Manchester Mark I*. Compte tenu de la capacité limitée de sa mémoire principale et du peu de puissance de traitement dont était pourvue son unité arithmétique et logique, il est certain que ce système ne pouvait rivaliser avec les machines informatiques qu'il annonçait et qui, très bientôt, allaient lui succéder. Pour nombreuses et handicapantes qu'aient pu être ses insuffisances techniques, la S.S.E.M. n'en demeurait cependant pas moins une machine à architecture von Neumann, machine au moyen de laquelle un certain nombre de programmes – certes de petite taille – purent être exécutés avec réussite. Si l'on s'en tient par conséquent à ces données techniques et historiques, et nous fermerons là la parenthèse ouverte un peu plus haut, alors il paraît évident que la S.S.E.M. « mérite » sans doute plus que toute autre machine la reconnaissance parfois accordée un peu vite à l'E.D.S.A.C. Il est vrai maintenant que l'ordinateur britannique auquel nous allons à présent accorder toute notre attention fut indéniablement le premier instrument informatique capable d'opérer de façon véritablement satisfaisante, c'est-à-dire d'une manière qui soit à la fois productive et inscrite dans la durée.

L'E.D.S.A.C. – la proximité structurelle des deux acronymes constitue d'ailleurs un indice patent de cet état de fait – est une machine directement dérivée du *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.* de John von Neumann. Comprendre pourquoi et dans quelles circonstances cet ordinateur fut construit en Angleterre d'après ce modèle technologique exige que nous nous resituions à présent dans le contexte de l'immédiat après-guerre.

L'*Electronic Delay Storage Automatic Computer* a été conçu et fabriqué au sein du Laboratoire de Mathématiques de l'Université de Cambridge. Fondé en octobre 1937 par le Professeur titulaire de la Chaire Plummer de Physique Théorique, John Lennard-Jones, dans le double but d'exploiter l'analyseur différentiel⁹²⁶ que possédait la prestigieuse institution et d'effectuer des recherches sur de nouvelles techniques de calcul, l'*University Mathematical Laboratory* (U.M.L.) était, au moins à l'origine, une structure modeste pensée comme un centre de ressources computationnelles placé à la disposition des chercheurs de Cambridge. Avec J. Lennard-Jones, qui devait occuper la fonction de Directeur de l'U.M.L., Maurice

⁹²⁶ Indiquons que l'U.M.L. était aussi équipé d'une machine de Mallock - un dispositif analogique électrique conçu en 1933 qui permettait de résoudre des équations linéaires simultanées – et de divers instruments électromécaniques de bureau.

Vincent Wilkes, alors jeune diplômé en physique récemment promu au poste d'*University Demonstrator* (soit Professeur Assistant), était le seul membre permanent de ce laboratoire nouvellement créé. Les missions principales de M. V. Wilkes consistaient d'une part à superviser la construction d'un nouvel analyseur différentiel pour l'U.M.L. et, d'autre part, à effectuer des visites régulières au Département de Physique de l'Université de Manchester où un instrument identique conçu par la firme anglaise *Metropolitan-Vickers Electrical Company* se trouvait en service depuis l'année 1935. L'objectif ouvertement poursuivi ici consistait évidemment à apprendre un maximum de choses profitables auprès d'un groupe de collègues déjà expérimentés. A l'instar de la très grande majorité des membres des communautés scientifiques des nations belligérantes, M. V. Wilkes dut cependant abandonner ses fonctions universitaires en 1939 afin de participer à l'effort de guerre. Pendant les six années que dura le deuxième conflit mondial, le chercheur de Cambridge – on ne saurait guère en être surpris – travailla à la mise au point de systèmes radars et effectua des travaux dans le secteur de la recherche opérationnelle.

Au mois de septembre 1945 il réintégra enfin l'U.M.L. – ou plutôt le *Computer Laboratory* ainsi que l'ancien *Mathematical Laboratory* avait été renommé – en qualité de directeur. Bien que la guerre n'ait pas laissé beaucoup de temps aux membres de l'U.M.L. pour développer quoi que ce soit de véritablement concluant en matière de calcul mécanisé, les contacts professionnels établis avant le funeste mois de septembre 1939 par M. V. Wilkes avec certains chercheurs britanniques revêtirent par la suite une importance capitale pour l'essor de l'informatique pionnière en Grande-Bretagne. Ainsi était-ce le cas du mathématicien et physicien Douglas R. Hartree. Secondé dans sa tâche par son confrère Arthur Porter c'est ce dernier qui, usant de pièces provenant essentiellement d'un jeu de construction Meccano, avait construit le premier analyseur différentiel de l'Université de Manchester, en 1934⁹²⁷. Scientifique de réputation internationale, D. R. Hartree avait eu l'immense privilège de découvrir avec force détails le fonctionnement du tout premier analyseur différentiel aux côtés de son célèbre concepteur, l'américain Vannevar Bush, à l'occasion d'une visite effectuée au M.I.T. au tout début des années 30. Dès lors qu'il fut rentré en Angleterre le titulaire de la Chaire Beyer de Mathématiques Appliquées s'attela à la construction d'un analyseur différentiel, en s'inspirant directement de l'architecture de l'imposant instrument de calcul analogique qu'il avait vu opérer au M.I.T. peu de temps

⁹²⁷ D. R. Hartree fut professeur de Mathématiques Appliquées à l'Université de Manchester de 1929 à 1937. A cette date, il prit possession de la Chaire de Physique Théorique, toujours à Manchester. En octobre 1946, il partit pour Cambridge, où il devint titulaire de la Chaire Plummer de Physique Théorique.

auparavant. Au début de la guerre, D. R. Hartree abandonna ses fonctions civiles pour intégrer le *Telecommunications Research Establishment* de Malvern et travailler également pour le compte du Ministère de l'Équipement britannique. Placées sous le sceau du secret défense, ses nouvelles responsabilités lui permirent de se tenir parfaitement au courant de l'avancement des travaux réalisés aux États-Unis en matière de calcul automatique. Ainsi a-t-on connaissance du fait que le physicien se rendit à l'Université d'Harvard, en 1945, dans l'optique d'y voir fonctionner l'*Automatic Controlled Sequence Calculator*⁹²⁸ d'Howard Aiken. La même année, peu de temps avant que ne soit célébrée la fête nationale américaine, D. R. Hartree, cette fois mandaté par le *British Commonwealth Scientific Office*, effectua une visite à la *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie. Comme le rappelle tout à fait clairement Hermann H. Goldstine dans *The Computer from Pascal to Von Neumann*, « [Hartree] se montra immédiatement et profondément intéressé par l'E.N.I.A.C. et les plans de l'E.D.V.A.C. »⁹²⁹. Et l'ancien partenaire de travail et ami de John von Neumann d'ajouter la chose suivante afin de souligner plus encore l'importance du rôle que joua D. R. Hartree dans l'essor de l'informatique de l'Angleterre d'après-guerre : « *En fait, aussitôt revenu dans son pays, il usa de toute son influence [auprès du gouvernement et des communautés universitaires] dans le but d'engager la Grande-Bretagne dans le champ du calcul électronique.* »⁹³⁰. Le temps était semble-t-il venu pour cela car, avant même que la guerre ne s'achève, il s'était dessiné au sein d'une partie de la communauté scientifique britannique une tendance très favorable à l'établissement d'un laboratoire national de mathématiques, future organisation dont on envisageait qu'une des missions devrait précisément consister en la coordination des dispositifs et des savoir-faire relatifs aux tâches de calcul mécaniquement assistées⁹³¹. Au cours de l'année 1945 ce projet prit corps, grâce à

⁹²⁸ Rappelons que ce calculateur électromécanique géant est encore connu sous les noms d' I.B.M. A.S.C.C. ou d'Harvard *Mark I*.

⁹²⁹ In [Goldstine, 1972], p. 219. A cette occasion D. R. Hartree eut la possibilité d'effectuer un certain nombre de travaux de physique avec l'E.N.I.A.C.

⁹³⁰ *Ibid.*

⁹³¹ Ainsi que cela est tout à fait clairement précisé dans les points 1 et 2 – ce dernier en comportant six - du sommaire du « Report of Interdepartmental Technical Committee on a Proposed Central Mathematics Station ». Emanant du Département de la Recherche Scientifique et Industrielle britannique, ce document daté du 3 avril 1944 qui porte la mention « confidentiel » peut être consulté sous la forme d'un fac-similé sur le site www.AlanTuring.net (http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/1/169/L69-023.html). On trouve également trace des deux objectifs majeurs précités (items 6502 et 6503-3) dans « Research Program for the Maths Division for the Year 1945-1946 », un autre document classifié du N.P.L. daté cette fois du mois d'octobre 1944 (http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/1/169/L69-035.html).

l'établissement d'une division dédiée aux mathématiques au *National Physical Laboratory*⁹³².

En raison même de leur statut de pionniers du calcul mécanisé en Angleterre et des liens privilégiés qu'ils entretenaient avec leurs équivalents américains Douglas R. Hartree, mais aussi l'astronome et physicien John L. Comrie, virent évidemment leurs noms associés de très étroite façon à la création de ce nouveau département. A la demande de H. H. Goldstine, le physicien de Manchester fut à nouveau convié à se rendre en Pennsylvanie, mais cette fois pour une période sensiblement plus longue que la précédente. Avec l'aval du gouvernement anglais et l'autorisation des autorités américaines concernées, le scientifique demeura ainsi sur le territoire américain du mois de mai au mois de juillet 1945. Du 20 avril au 20 juillet 1946, il séjourna à la *Moore School*. En ce lieu D. R. Hartree eut non seulement la possibilité d'approfondir sa compréhension et sa pratique du premier et unique grand calculateur électronique de la planète, l'E.N.I.A.C.⁹³³, mais il put également parfaire ses connaissances relatives au *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.*, le fameux « brouillon » de von Neumann qui allait devenir sous peu le document fondateur que l'on sait. Élément révélateur de l'excellente connaissance qu'il possédait alors des toutes premières (et dernières) avancées réalisées outre-atlantique dans le domaine du calcul artificiel, le scientifique britannique, dans la conférence inaugurale qu'il prononça en octobre 1946 à l'occasion de sa nomination en tant que Professeur de Physique Théorique à l'Université de Cambridge, ne manqua pas de souligner le rôle déterminant que, selon lui, les nouvelles machines digitales allaient très certainement jouer au cœur de notre monde moderne. Conscient des réalités passées et présentes ainsi que des puissants enjeux politico-militaires et sociétaux qui bientôt allaient se faire jour ici, D. R. Hartree déclara ainsi : « ...qu'il était possible que l'ordinateur digital à haute vitesse soit appelé à exercer sur notre civilisation une influence au moins aussi importante que celle de la puissance nucléaire⁹³⁴ ».

⁹³² Notons que John Ronald Womerlsey, le superintendant de la Division Mathématiques du N.P.L. contacta Alan M. Turing dès le mois de juin 1945 afin de lui proposer de rejoindre les rangs des chercheurs de la jeune institution. Officiellement Turing intégra le N.P.L. le 1 octobre 1945 en qualité de *Temporary Scientific Senior Officer*. Il reçut la mission d'y concevoir et de développer un ordinateur. Ce fut l'*Automatic Computing Engine*.

⁹³³ Prolongement, en quelque sorte, de ces séjours aux États-Unis, deux documents, l'un examinant les différentes sortes d'instruments de calcul étant utilisés ou étant en cours de conception aux U.S.A. et l'autre spécifiquement consacré à l'E.N.I.A.C., furent rédigés par Douglas R. Hartree en 1945 et en 1946. La première de ces études, « U.S. Development in Calculating Machines », est proposée dans son intégralité, sous forme de fac-similé, à l'adresse suivante : http://www.alanturing.net/turing_archive/archive/1/138/L38-001.html. On remarquera qu'il est frappé de la mention « confidentiel ». Quant au second article, intitulé « The ENIAC, an Electronic Calculating Machine », il fit l'objet d'une publication dans la revue scientifique anglaise *Nature*, fin 1946 (*in Nature*, Vol. 158, no. 4015, Octobre 12, 1946, pp. 500- 506).

⁹³⁴ Extrait de « Calculating Machines: Recent and Prospective Developments and Their Impacts on Mathematical Physics », conférence inaugurale de D. R. Hartree à Cambridge, cité dans la biographie de Douglas R. Hartree

L'arrivée de Douglas R. Hartree à Cambridge en octobre 1946 renforça évidemment les liens qui déjà existaient entre le nouveau Professeur de Physique Théorique et le futur concepteur de l'E.D.S.A.C., Maurice V. Wilkes. Il existe en effet des éléments de correspondance attestant du fait qu'au cours du mois de janvier 1946, le directeur du *Computer Laboratory* avait sollicité par écrit les conseils de D. G. Hartree sur la question des machines digitales électroniques en cours de développement aux Etats-Unis⁹³⁵. En vérité ceci ne saurait surprendre puisqu'au sortir du deuxième conflit mondial, la réputation du savant était déjà fermement établie des deux côtés de l'Atlantique. Le physicien représentait de facto un des liens les plus essentiels qui soient entre ces grands centres universitaires américains et britanniques où les ordinateurs et l'informatique étaient appelés à voir le jour. Un autre savant de renom, d'origine néo-zélandaise celui-ci, exerça pareillement une influence déterminante sur la personne de M. V. Wilkes dans les années qui suivirent immédiatement la fin de la guerre. Docteur en astronomie, superintendant du *Nautical Almanac Office of the Royal Naval College* de 1930 à 1936 puis fondateur, en 1938, de la compagnie privée de service de calcul *Scientific Computing Service Ltd*⁹³⁶, John Leslie Comrie est entre autres choses reconnu par la communauté savante pour avoir été l'un des principaux pionniers du calcul scientifique numérique et mécanisé au cours de la première moitié du 20^{ème} siècle. Le fait d'avoir été le premier « anglais » à visiter la *Moore School of Electrical Engineering*, au début de l'année 1946, doit également être porté à son crédit. Partisan, à l'inverse de son confrère américain Wallace Eckert qui soutenait l'option consistant à employer des systèmes ad hoc⁹³⁷, de l'utilisation de machines de série – un point de vue qu'il défendit d'ailleurs dans un article publié en 1946⁹³⁸ - c'est Comrie qui, le temps d'une nuit de mai 1946, confia au jeune mathématicien de 32 ans l'exemplaire du *First Draft of a Report on the EDVAC* qu'il

proposée en ligne sur le site web de la *School of Mathematics and Statistics* de l'Université Ecossoise de St Andrews (<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Mathematicians/Hartree.html>). Le texte intégral de cette conférence a été inséré dans la seconde édition américaine de *Calculating Instruments and Machines (Charles Babbage Institute Reprint Series for the History of Computing, Volume VI, MIT Press and Tomash Publishing, 1984)*.

⁹³⁵ Lettre de Douglas R. Hartree à Herman H. Goldstine, 19 janvier 1946, citée in [Goldstine, 1972], p.247.

⁹³⁶ Mettant à profit son expérience dans le calcul scientifique effectué au moyen de machines mécaniques et électromécaniques digitales, J. L. Comrie fonda cette société dont les premiers clients furent le Gouvernement et l'Amirauté britanniques.

⁹³⁷ L'astronome Wallace Eckert dirigea l'*US Naval Observatory Nautical Almanac Office* de 1940 à 1945. En 1945, il fonda le *Watson Scientific Computing Laboratory (W.S.C.L.)* à l'Université de Columbia. Il en assumait la fonction de directeur jusqu'en 1966. A l'instar de J. L. Comrie, Wallace Eckert compte parmi les premiers savants à avoir eu recours à des machines à cartes perforées afin de résoudre des problèmes scientifiques complexes. Convaincu de la supériorité des « *one kind computers* », on sait qu'il était dans ses habitudes de demander aux ingénieurs et techniciens d'I.B.M. de modifier en profondeur les matériels de série destinés au W.S.C.L. lorsqu'il était à la tête de ce laboratoire.

⁹³⁸ Comrie L.J., « The Application of Commercial Calculating Machines to Scientific Computation », in *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, vol.2, n°16, pp.149-159, 1946.

avait ramené de son dernier voyage aux Etats-Unis. M. V. Wilkes se montra d'emblée enthousiasmé par les idées contenues dans le « brouillon ». Au reste comment aurait-il pu en être autrement lorsque l'on se souvient que le scientifique n'était pas particulièrement enclin à employer des systèmes spécifiquement conçus pour traiter tel ou tel sorte de tâches, et uniquement cela ? La perspective de la réalisation d'une machine de traitement de l'information universelle, c'est-à-dire d'une machine capable, tour à tour, de devenir toutes les machines concevables sans pour autant avoir à subir à chaque fois des transformations matérielles légères ou substantielles ne pouvait donc qu'emporter sa franche adhésion. Fort de son intérêt extrêmement marqué pour ce nouveau genre d'instruments, mais aussi de sa position de directeur du *Computer Laboratory* à l'Université de Cambridge, Maurice V. Wilkes eut le privilège, avec David Rees - un membre du groupe de Max H. A. Newman à Manchester – de figurer au nombre de la petite poignée de citoyens britanniques invités par les américains à assister aux fameuses *Theory and Techniques for Design of Electronic Digital Computers Lectures* données à la *Moore School of Electrical Engineering* du 8 juillet au 31 août 1946. L'astronome Douglas R. Hartree était également présent à la *Moore School* durant ces mois de l'été 1946, mais en qualité de conférencier⁹³⁹. Si, en raison des difficultés inhérentes aux voyages transatlantiques de la période d'après-guerre, Maurice V. Wilkes ne parvint pas à temps en Pennsylvanie⁹⁴⁰ pour se trouver en mesure de prendre part à l'ensemble des interventions prévues au programme du séminaire – soit 48 - il put cependant assister, c'est un fait avéré, à un certain nombre d'entre elles, notamment celles spécifiquement dédiées à la description de l'E.N.I.A.C et de son fonctionnement et à l'examen des principes logiques fondamentaux de l'E.D.V.A.C. (les questions liées à la future implémentation matérielle du projet ne furent pas traitées ici puisque rien de concret n'avait encore été défini à cette date). En outre le fait que son séjour à l'université de Pennsylvanie se soit infortunément vu réduit à deux semaines n'empêcha pas le savant anglais de profiter de cette série de conférences pour nouer des relations professionnelles avec quelques-uns des chercheurs les plus renommés du champ du calcul artificiel aux U.S.A. Ainsi, Douglas R. Hartree l'introduisit-il auprès d'Howard Aiken (le père de l'Harvard Mark I A.S.C.C.), de Samuel H. Caldwell (l'assistant de Vannevar Bush au M.I.T.), et d'Hermann H. Goldstine, l'un des principaux collaborateurs de John von Neumann à la *Moore School* (puis à l'I.A.S.).

⁹³⁹ Il prononça à cette occasion une conférence intitulée « Some General Considerations in the Solutions of Problems in Applied Mathematics ».

⁹⁴⁰ Selon ce qu'affirment Martin Campbell-Kelly et William Aspray, dans *Computer: A History of the Information Machine* (Basic Books, New York, 1996, p. 101), Maurice Wilkes ne commença à participer aux Moore School Lectures qu'à partir du lundi 18 août 1946.

Mais ce fut ici aussi pour M. V. Wilkes l'occasion de rencontrer et d'établir des contacts avec A.W. Burks (*Moore School* puis I.A.S.), C. Bradford Sheppard (*Moore School*), Jan Rajchman (R.C.A.), ainsi que John P. Eckert et John W. Mauchly (*Moore School*). Avec ces hommes, il pu s'entretenir à loisir de l'avenir des nouvelles machines de calcul.

Les quelques jours dont il disposait encore avant de réembarquer en direction de son pays natal, M. V. Wilkes les employa à rendre visite à quelques-unes des personnes rencontrées à la Moore School. A Harvard, où il eut non seulement le loisir d'examiner l'I.B.M. *Automatic Sequence Controlled Calculator* en opération mais aussi celui de voir le chantier du *Mark II*, il fut accueilli par Howard Aiken (le 31 août 1946). Au *Massachusetts Institute of Technology*, où on le reçut également, on lui présenta le nouvel analyseur différentiel en partie électronique conçu par Vannevar Bush et Samuel H. Caldwell. La vue des systèmes digitaux de Harvard et du calculateur analogique du M.I.T., à dire vrai tous trois de véritables monstres à relais électromécaniques et tubes à vide finalement assez peu puissants et de toute façon par trop spécialisés, suffirent à finir de le convaincre que le concept de machine à mémoire interne proposé par John von Neumann représentait la voie de développement devant impérativement être suivie dans les années à venir. Après être parvenu à cette dernière conclusion et tandis qu'il se trouvait sur le chemin du retour vers l'Angleterre, Maurice V. Wilkes commença à coucher sur le papier les grandes lignes d'une machine de dimensions relativement modestes, pensée selon les principes fondamentaux exposés dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*. Dès le début du projet et alors même que tout restait à faire en matière de choix matériels pour la construction des ordinateurs, le scientifique prit la décision de ne pas chercher à innover technologiquement. En lieu et place de ceci il choisit plutôt d'assembler un ordinateur le plus simplement possible – si tant est que l'on puisse effectivement s'exprimer en de pareils termes ici – d'une part en respectant scrupuleusement les canons architecturaux fixés dans l'acte de naissance théorique de cette machine et d'autre part en préférant les composants les plus sûrs, autrement dit les mieux éprouvés, afin d'élaborer les circuits logiques et mémoriels de son système. Pour ce motif, mais aussi en raison d'un budget relativement limité, l'engagement du *Computer Laboratory* dans des programmes de recherches nécessairement coûteux et incertains quant aux résultats et aux délais pour les obtenir ne pouvait figurer à l'ordre du jour. L'objectif poursuivi initialement par Maurice V. Wilkes ne consistait donc pas à tenter de faire progresser la « science » forcément embryonnaire de la fabrication des ordinateurs en essayant, par exemple, de mettre au point une nouvelle sorte de mémoire. Plus modestement, mais aussi d'une façon qui témoigne du fait que son approche du problème avait d'emblée été orientée par un certain

pragmatisme et une perception étonnamment claire des choses à venir, il désirait faire en sorte que les membres du *Computer Laboratory* de l'Université de Cambridge et lui-même disposent dans les délais les plus brefs possibles d'un de ces nouveaux dispositifs électroniques de traitement de l'information afin d'en devenir rapidement des experts. Si l'on souhaite formuler cela d'une autre manière encore, on peut dire que ce que M. V. Wilkes voulait en priorité, au-delà du fait en soi déjà exceptionnel de disposer d'un ordinateur pour son équipe et pour lui-même, c'était la capacité d'acquérir rapidement une maîtrise dans l'art de la programmation et de l'emploi de ces instruments en situation réelle⁹⁴¹. Pour cette raison majeure et à l'inverse de ce qui pouvait être envisagé ou réalisé ailleurs, le directeur du *Computer Laboratory* ne considérait pas le fait d'exceller dans l'exercice tout à la fois nouveau et difficile de leur fabrication⁹⁴² comme une chose devant être placée en tête de liste des objectifs à atteindre.

C'est cette façon très pratique et relativement « conservatrice » d'envisager la construction de la machine de Cambridge qui amena notamment son principal architecte à préférer l'emploi de lignes délai acoustiques au mercure – issues comme nous l'avons déjà indiqué de l'univers de la détection aérienne militaire et donc déjà disponibles en 1946 – à celui de tubes cathodiques – dispositifs certes intéressants en termes de performances mais restant entièrement à concevoir au moment dont nous parlons ici - pour la conception de sa mémoire interne. Une chose témoigne assez parfaitement du caractère à la fois crucial et, si l'on nous accorde l'expression, « revendiqué », de ce choix. Ainsi, hormis le fait que la désignation adoptée par M. V. Wilkes afin de nommer son système informatique faisait clairement écho à la machine dont celui-ci devait presque complètement procéder sur le plan architectural – l'acronyme E.D.S.A.C.⁹⁴³ est en effet très proche de l'acronyme E.D.V.A.C.⁹⁴⁴ – cette dernière faisait tout aussi directement référence aux lignes délai acoustiques – le D et le S dans E.D.S.A.C. signifiant *Delay Storage* - dont il avait décidé de le pourvoir pour assurer le stockage interne de ses programmes et de ses données. Une fois la solution des lignes acoustiques retenue pour résoudre le problème assurément critique du support matériel de la mémoire principale du futur ordinateur, tout le reste s'enchaîna naturellement. Le mode opératoire de ces instruments étant d'essence sérielle, c'est en effet lui qui devait

⁹⁴¹ Dans ses mémoires, parues en 1985, Maurice V. Wilkes devait éclairer cette position en déclarant : « I had... other objects in view beside solving problems in electronic engineering. I wanted to have an electronic computer and to experiment with the writing of programs to solve real problems », in *Memoirs of a Computer Pioneer*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1985, p. 129.

⁹⁴² Ceci étant tout particulièrement vrai lorsque ledit exercice se voulait innovant en matière de design et/ou d'emploi de composants plus ou moins complexes ou inédits

⁹⁴³ *Electronic Delay Storage Automatic Calculator*.

⁹⁴⁴ *Electronic Discrete Variable Automatic Computer*.

fondamentalement déterminer la façon dont on concevrait les circuits arithmétiques et logiques du système. Dès lors il devint possible de forger une appellation astucieuse pour désigner ce dernier – la chose est certes anecdotique mais ne saurait pour autant se voir négligée – mais on put aussi et surtout commencer sa construction.

Les hommes du *Computer Laboratory* entamèrent évidemment leur entreprise en s'efforçant de mettre au point ce qui paraissait à bien des égards constituer le centre névralgique de l'ensemble, à savoir une mémoire à lignes délai. A la fin de l'année 1946, il n'existait évidemment aucun dispositif de ce genre dans le monde. Cependant, en raison de l'utilisation intensive qui en avait été faite dans le domaine de la détection d'aéroplanes par ondes électromagnétiques pendant la deuxième guerre mondiale, les lignes délais acoustiques au mercure étaient bien connues et il en existait de nombreux spécialistes en Angleterre. C'est à un ancien de l'*Admiralty Signal Establishment*, Thomas Gold⁹⁴⁵, que Maurice V. Wilkes – rappelons-le lui-même un familier des techniques radars et par voie de conséquence des composants électroniques – fit appel pour le conseiller et le seconder dans la réalisation de cette tâche particulièrement difficile et déterminante. Les travaux avancèrent pourtant à un rythme remarquablement rapide puisqu'au mois de février 1947, l'équipe du *Computer Laboratory* était déjà parvenue à fabriquer une unité d'enregistrement acoustique capable de stocker de façon durable un pattern d'impulsions représentant un petit ensemble de bits. Sous peu de temps, ils disposèrent d'une mémoire composée de 16 tubes d'acier – ou *tanks* comme on les appelait encore – longs de 152 centimètres et offrant chacun une capacité d'enregistrement individuelle de 32 mots de 17 bits⁹⁴⁶ (nombre auquel il convient de soustraire un bit codant pour le signe). Ce problème fondamental réglé ou en passe de l'être vraiment, d'autres difficultés, d'ordre managérial cette fois, se firent jour. Peu habitué à conduire des projets de recherche sur une aussi vaste échelle, M. V. Wilkes avait amorcé celui-ci avec des fonds autorisant son démarrage, certes, mais qui ne permettaient certainement pas de poursuivre au-delà de cette phase de lancement. La destinée de l'E.D.S.A.C. aurait pu être toute autre, voire simplement tourner court, si Thomas R. Thompson⁹⁴⁷ et Oliver Standingford, deux cadres supérieurs travaillant pour le compte du géant de la restauration britannique *J. Lyons & Company Limited* ne s'étaient vus présentés les ordinateurs dans les lieux même où on les avait imaginés.

⁹⁴⁵ Désormais chercheur en physique à l'Université de Cambridge, Thomas Gold avait travaillé durant le conflit sur la conception des systèmes radars à l'A.S.E. (sous la direction de l'astrophysicien Fred Hoyle).

⁹⁴⁶ Soit 512 bits par ligne délai, plus les bits de signe.

⁹⁴⁷ Alors jeune mathématicien diplômé de Cambridge, Thomas R. Thompson fut recruté par la *Lyons & Co Ltd* dans le courant des années vingt.

A la suite d'un voyage d'étude aux Etats-Unis⁹⁴⁸ au cours duquel ils visitèrent les Universités de Pennsylvanie et de Princeton et purent apprendre de la bouche même d'Hermann H. Goldstine ce qu'était ces « cerveaux électroniques géants » dont se faisait désormais régulièrement écho la presse britannique, ces deux spécialistes de l'optimisation des procédures administratives remirent un rapport à la direction de leur entreprise dans lequel ils affirmèrent qu'un pareil système de traitement de l'information pourrait très vraisemblablement être construit moyennant un apport financier d'environ 100000 livres sterling⁹⁴⁹. En retour assuraient-ils, celui-ci permettrait à coup sûr de réaliser des économies annuelles extrêmement élevées (ils les chiffraient à quelques 50000 livres sterling). Réputée pour sa capacité à innover en matière de gestion et de technologie⁹⁵⁰ et toujours désireuse de réduire ses dépenses, devinant aussi la possibilité d'un marché à terme extrêmement lucratif, la firme londonienne ne tarda pas à prendre contact avec Maurice V. Wilkes – lors de l'entretien qu'il avait accordé à T. R. Thompson et O. Standingford, Hermann H. Goldstine avait en effet mentionné les travaux du scientifique britannique – dans la perspective de lui proposer une forme de partenariat. Il convient de souligner ici comme il se doit la très grande originalité de la démarche initiée à ce moment par le géant de la restauration. En effet et alors même que, premièrement, les ordinateurs ne possédaient d'existence autre que théorique et que, deuxièmement, les applications auxquelles les rares institutions qui les fabriquaient les destinaient étaient encore de nature exclusivement scientifique, les instances dirigeantes de la *J. Lyons and Co. Ltd*, un groupe n'entretenant pourtant aucun rapport direct avec le secteur de la recherche fondamentale ou avec celui de l'armement, se montrèrent étonnamment promptes à saisir tout l'intérêt qu'il y aurait à se servir de ces instruments pour automatiser et par conséquent rationaliser l'accomplissement de certaines tâches bureaucratiques. Bien entendu on songera tout de suite ici à effectuer un rapprochement entre ceci et l'accord tripartite qui, pour la fabrication du prototype puis la production commerciale du *Mark I*, unit l'Université de Manchester, le gouvernement britannique et l'industriel *Ferranti Ltd*. Cependant, quant bien même il se révélerait possible de découvrir quelque élément de similarité entre la synergie interinstitutionnelle qui permit à l'ordinateur de Manchester de voir le jour et celle qui autorisa finalement la fabrication de la machine de Cambridge – une chose dont nous ne doutons pas - le moment et la manière dont ces dernières se mirent en place diffèrent assez

⁹⁴⁸ A l'origine il s'agissait pour les deux hommes d'étudier les effets des développements apparus en temps de guerre sur l'organisation et la gestion des services de bureau (management).

⁹⁵⁰ Fondée en 1887 et forte d'un personnel comptant environ 30000 employés à l'orée des années cinquante, la *J. Lyons & Co.* se distingua en devenant notamment l'une des premières firmes anglaises à utiliser des calculateurs électromécaniques. Elle fut aussi la première entreprise à recourir à des microfilms.

notablement. La première, pour considérer d'abord les choses d'un point de vue uniquement chronologique, ne devint effective qu'au mois de novembre 1949 tandis que la seconde débuta un an plus tôt exactement (soit en novembre 1948). Ensuite, et c'est ce qui est singulièrement frappant ici, la compagnie privée *J. Lyons & Co. Ltd* approcha Maurice V. Wilkes à Cambridge car ses dirigeants, sur les recommandations d'experts on ne peut mieux renseignés, avaient compris bien avant l'heure que l'ordinateur représentait une opportunité inouïe pour le milieu des affaires et qu'il était de leur plus grand intérêt, à court, moyen et long terme, de prendre immédiatement et directement part au processus de leur développement. Or, et c'est également ce qui est inhabituel dans ce cas précis, les termes « immédiatement et directement » signifiaient pour eux non seulement participer au financement de la conception d'une machine – en l'occurrence et au grand soulagement de M. V. Wilkes il devait s'agir ici de l'E.D.S.A.C. – mais aussi prendre une part active à son élaboration en détachant temporairement du personnel qualifié auprès de l'équipe universitaire en charge de sa réalisation effective. Dans le courant du mois de novembre 1948, les membres du directoire de la *J. Lyons & Co. Ltd*. prirent ainsi la décision de consacrer une somme de 3000 livres sterling à la réalisation du projet E.D.S.A.C.⁹⁵¹. Ils dépêchèrent également un de leurs collaborateurs à Cambridge pour une période initialement fixée à un semestre (laquelle ne tarda toutefois pas à se transformer en une année entière).

C'est Ernest H. Lenaerts, ancien de la *Royal Air Force* ayant acquis une certaine expérience en matière d'ingénierie électronique au cours de la deuxième guerre mondiale, que l'entreprise désigna pour aller renforcer les rangs de la petite équipe de M. V. Wilkes. Un des principaux bénéficiaires attendus par la *J. Lyons & Co. Ltd*. en échange de cette contribution à la fois budgétaire et, si l'on veut, « matérielle », était en effet l'acquisition, par son représentant E. H. Lenaerts, des savoir-faire techniques – il est vrai plus ou moins inédits si l'on songe par exemple à l'usage déjà existant des lignes délai acoustiques - attachés à la conception et à la fabrication de ces nouvelles machines. Avec le consentement de M. V. Wilkes – mais aussi à son grand étonnement - elle entendait à terme réutiliser ces connaissances afin de superviser la construction d'un ordinateur (ou bien encore de le fabriquer elle-même). Ce partenariat initié entre la *J. Lyons & Co. Ltd*. et le *Computer Laboratory* de l'Université de Cambridge avait par conséquent pour enjeu primordial, outre bien entendu la construction proprement dite de l'E.D.S.A.C., la réalisation d'un transfert de compétences technologiques destiné à

⁹⁵¹ En ce qui concerne le montant exact de la contribution financière de la firme *J. Lyons and Co. Ltd*. à la construction de l'E.D.S.A.C., il pèse sur les chiffres une légère incertitude. On ne sait, en réalité, si la somme effectivement versée par l'industriel au *Computer Laboratory* s'élevait à 2500 ou bien à 3000 livres sterling.

conférer au géant de la restauration britannique la capacité d'occuper précocement une place centrale sur l'échiquier de ce qui était appelé à devenir sous peu l'industrie informatique commerciale. Pour l'industriel le résultat concret de cette audacieuse collaboration, ainsi que nous le verrons plus loin, fut l'achèvement, à la fin de l'année 1951, du premier exemplaire opérationnel de la série d'ordinateurs commerciaux LEO (pour *Lyons Electronic Office*).

Le travail sur l'E.D.S.A.C., du fait même de l'orientation simple et pragmatique initialement adoptée par Maurice V. Wilkes pour conduire ce projet, avança de manière fort rapide. Comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, les hommes du *Computer Laboratory* réussirent à concevoir pour cette machine une mémoire principale acoustique donnant d'assez bons résultats dans le courant du premier trimestre de l'année 1947. La mise au point dans des délais remarquablement courts d'une solution adaptée et fiable à ce problème fondamental - tant il se singularisait à la fois par sa nature incontournable, sa grande difficulté technique et son caractère éminemment directeur⁹⁵² - permit par conséquent au petit groupe de l'Université de Cambridge de progresser nettement plus vite que les autres équipes engagées elles aussi dans la fabrication d'un ordinateur, que ce soit du reste sur le territoire britannique (à l'Université de Manchester ou au *National Physical Laboratory*), ou bien américain (à la *Moore School* ou à l'Université de Princeton pour ne mentionner que ces deux exemples...).

Dans l'ensemble les personnels qui participèrent d'une façon ou d'une autre à l'élaboration de l'E.D.S.A.C. - c'est-à-dire pour les plus importants les universitaires M. V. Wilkes, W. Renwick, B. Noble, D. W. Willis, et E. N. Mutch, les assistants P. J. Farmer, G. J. Stevens, S. A. Barton, R. S. Piggott, L. J. Foreman, P. Chamberlain et E. H. Lenaerts (le représentant de la *J. Lyons Co. Ltd.*) et les étudiants J. M. Bennett and D. J. Wheeler. - se heurtèrent peu ou prou aux mêmes difficultés que celles rencontrées par les membres des autres équipes oeuvrant de par le monde. Toutefois, contrairement aux autres groupes qui s'efforçaient le plus fréquemment d'innover en tentant de valider des solutions technologiques inusitées (ce qui revient à dire coûteuses, généralement complexes à mettre en oeuvre et, en dépit de performances quelquefois intéressantes, souvent bien peu fiables), notamment pour tout ce qui pouvait toucher au support matériel de la mémoire principale de l'ordinateur, M. V. Wilkes et ses collaborateurs prirent le parti de définir dès le départ un ensemble de spécifications techniques et de performances relativement modestes. Les raisons de cela étaient 1°) le manque de moyens humains et financiers (tout du moins au début) ; 2°) le

⁹⁵² Etant donné que tout se trouvait littéralement organisé et bâti autour de la façon dont on était capable de le résoudre.

manque de temps et, 3°) la volonté de parvenir le plus rapidement possible à des résultats convaincants.

De toute évidence si l'on décide de collationner le corpus de caractéristiques arrêté alors pour l'E.D.S.A.C. par son concepteur à ce qui put être imaginé et réalisé sensiblement au même moment par d'autres personnes en d'autres lieux, on ne pourra objectivement que se laisser aller à formuler une seule et unique constatation. Ainsi, en comparaison des systèmes informatiques pionniers qui virent le jour entre la fin de la décennie quarante et la première moitié des années cinquante, l'E.D.S.A.C. ne faisait pas figure de machine techniquement exceptionnelle (si l'on excepte évidemment le fait en soi déjà extraordinaire qu'il s'agissait d'un ordinateur). Conséquence et contrepartie de son design « élémentaire » – comme nous allons le voir maintenant celui-ci s'éloignait fort peu des spécifications architecturales de base originellement stipulées par J. von Neumann dans le *First Draft of the EDVAC* - et du type de composants et de sous-systèmes « traditionnels » sélectionnés et employés pour effectuer son assemblage, M. V. Wilkes et ses collègues purent disposer d'un dispositif de traitement de l'information électronique opérationnel et fiable avant que ce ne soit le cas des autres équipes engagées dans la réalisation d'un projet équivalent (pour rappel, l'équipe responsable de la construction de l'E.D.V.A.C. à la *Moore School of Electrical Engineering* dut attendre la fin du mois de janvier 1952 pour enfin voir sa machine complétée et effectuer un véritable programme). Entre le mois d'octobre de l'année 1946 et le 6 mai 1949, date à laquelle il exécuta son tout premier programme, l'*Electronic Delay Storage Automatic Calculator* prit graduellement forme. Une fois sa construction achevée, l'ordinateur du *Computer Laboratory* offrait à voir les caractéristiques générales suivantes. Pour commencer, et à l'image de son modèle américain qui lui se trouvait toujours en phase d'assemblage, il s'agissait d'une machine opérant en mode sériel et manipulant des quantités numériques exprimées en binaire. Sa mémoire principale était constituée de 32 lignes ultrasoniques au mercure. Celles-ci étaient en pratique séparées en deux batteries de 16 unités disposées au cœur de deux caissons spéciaux ayant pour fonction de garantir en permanence la stabilité thermique nécessaire à leur bon fonctionnement. Ces « boîtes isolantes » devaient aussi préserver les tubes mémoires ultrasoniques du bruit électromagnétique occasionné par la présence environnante de nombreux autres appareils électrique (comme on le sait elles étaient extrêmement sensibles à ce phénomène et leur opération pouvait s'en trouver grandement affectée). Chacune de ces lignes offrant une capacité individuelle de stockage de 544 bits - soit 32 mots de 17 bits⁹⁵³, bit

⁹⁵³ L'E.D.S.A.C. utilisait normalement un format d'instruction simple adresse basé sur un mot de 18 bits dont 17 seulement étaient effectivement employés.

indicateur de signe compris - l'espace mémoire total offert par cet instrument s'élevait à 1024 mots.

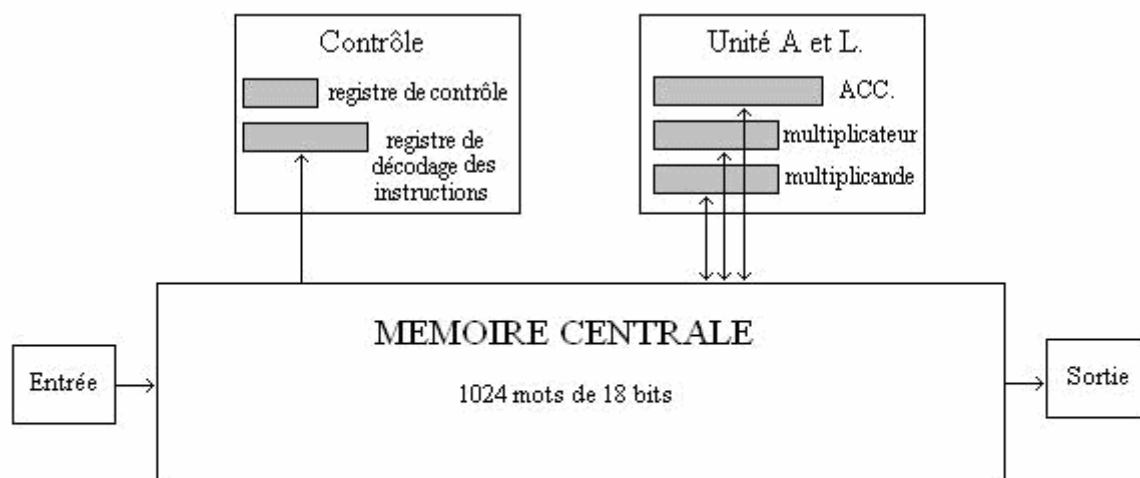


Fig. 1: diagramme schématisé simplifié représentant l'architecture de l'*Electronic Delay Storage Automatic Calculator* (d'après Martin Campbell-Kelly, *EDSAPC, A Tutorial Guide to the EDSAC Simulator*, Département des Sciences Informatiques de l'Université de Warwick, juillet 2001, p.13).

Ajoutons qu'en fonction des exigences spécifiquement rencontrées, la possibilité était offerte ici aux programmeurs du système de composer des mots « longs » (de 2 fois 17 bits plus un bit de signe, soit au final 35 bits), en procédant à l'association de deux emplacements mémoire (deux mots) physiquement contigus. La plupart des instructions⁹⁵⁴ de l'E.D.S.A.C. furent par conséquent conçues de manière à pouvoir opérer avec des mots informatiques courts ou longs (respectivement de 17 et 35 bits). Précisons encore qu'en différents emplacements de la machine – notamment au sein de son unité arithmétique et logique – des lignes délai de très petite capacité furent installées. Remplissant le rôle de registres (au sein de l'accumulateur, du circuit multiplicateur et des systèmes de contrôle de l'ordinateur), elles n'étaient certes capables d'enregistrer qu'un seul mot à la fois mais elles se singularisaient par leur extrême rapidité. Les temps moyens mesurés pour l'exécution d'une addition et d'une multiplication s'élevaient respectivement à 1,4 et 5,4 millisecondes. L'opération de division, elle, était commandée par programme. La routine chargée de sa réalisation exigeait un délai d'attente d'environ 200 millisecondes avant de produire son résultat. Concernant à présent le logiciel de l'ordinateur de Cambridge un certain nombre de choses fort intéressantes méritent d'être remarquées.

⁹⁵⁴ Longues de 17 bits, les instructions de l'E.D.S.A.C. étaient composées de trois champs: un champ de 5 bits était réservé à la spécification du code d'opération (Opcode) et un champ de 10 bits à l'adresse de l'opérande. Le dernier champ, long d'un bit permettait d'indiquer la longueur de l'opérande (soit 17 ou 35 bits).

Au moment de sa création l'E.D.S.A.C. se vit doté de trois dizaines d'instructions fondamentales, les *initial orders*. Si, en respectant bien entendu les précautions qui d'elles-mêmes s'imposent en de pareilles circonstances, on tente d'établir un parallèle avec l'informatique actuelle afin de préciser quelle était exactement leur fonction, on pourrait dire que ce groupe d'ordres initiaux formait en quelque sorte le système de compilation et d'exploitation (forcément très rudimentaire), de cette machine. C'est un jeune et brillant étudiant en mathématiques, David John Wheeler, qui conçut ces instructions de base pour le système informatique du *Computer Laboratory* au cours des tout premiers mois de l'année 1949⁹⁵⁵. Pour une part essentielle, l'intérêt des 31 *initial orders* résidait dans le fait qu'ils autorisaient les programmeurs de l'E.D.S.A.C. à rédiger leurs applications dans un langage associant des fonctions représentées par des mnémoniques – des combinaisons simples de lettres et de chiffres donc - et des adresses numériques codées en décimal. Exprimé d'une façon encore différente, cela revient à dire qu'au moment où il commença à opérer, l'E.D.S.A.C. disposait déjà d'un *langage symbolique* élémentaire⁹⁵⁶ qu'il était en mesure de traduire automatiquement. Cette disposition extrêmement innovante épargnait ainsi aux usagers de l'ordinateur la tâche laborieuse et assommante d'avoir à le programmer directement en langage numérique ou en langage machine (c'est-à-dire en octal ou en binaire).

La deuxième chose qu'il nous semble important de noter ici quant aux *initial orders* concerne la façon dont on décida de les introduire *dans* la machine afin de résoudre le problème de son amorçage (*bootstrap problem*). A l'instar de la totalité des systèmes informatiques construits après ou en même temps que lui, l'E.D.S.A.C. avait impérativement besoin d'un logiciel fondamental – nommons le programme d'amorçage – pour lui indiquer comment lire et interpréter les autres programmes chargés à partir de son périphérique d'entrée principal. A défaut de cela il n'aurait été rien d'autre qu'une dispendieuse coquille vide. Dans le cas précis de ce logiciel cependant, un problème de taille se posait. Il était en effet inenvisageable d'enregistrer le programme d'amorçage sur un médium physique et de le charger ensuite en machine au moyen du dispositif d'entrée. Saisir pourquoi il en était ainsi n'est guère compliqué. En effet puisqu'il s'agissait d'un logiciel d'amorçage permettant de

⁹⁵⁵ Il convient à notre sens de saluer comme il se doit le tour de force réalisé ici par D. J. Wheeler lequel, en faisant preuve d'autant d'ingéniosité que d'élégance, parvint à programmer en quelques lignes de code à peine un assembleur et un système d'exploitation - certes très sommaires l'un et l'autre, mais néanmoins parfaitement fonctionnels – pour le premier ordinateur effectivement mis en service dans le monde.

⁹⁵⁶ Ce langage rudimentaire comprenait 18 ordres de base (parmi lesquels An, Sn, Hn, Vn, Tn, Z,...). L'instruction An permettait par exemple d'ajouter le nombre stocké à l'adresse *n* de la mémoire de la machine à la quantité présente dans son accumulateur. L'ordre Sn permettait de soustraire ce même nombre à celui contenu dans l'accumulateur. L'ordre Z arrêtait quant à lui l'ordinateur en faisant simultanément retentir une cloche d'avertissement pour signifier cette interruption.

spécifier à l'ordinateur de quelle manière exploiter les informations en provenance du « monde extérieur », il aurait été nécessaire, pour que l'E.D.S.A.C. soit en mesure de le lire et de l'interpréter, qu'on lui fournisse au préalable un autre programme d'amorçage – évidemment plus fondamental - afin qu'il puisse le « comprendre ». Un nouveau code d'amorçage – le troisième à ce point du raisonnement - aurait alors dû être inséré dans l'ordinateur pour qu'il soit capable de « déchiffrer » ce deuxième code, et ainsi de suite... On constate donc que le fait de fournir à l'E.D.S.A.C. les éléments programmatiques minimaux nécessaires à son initialisation et à son fonctionnement par le canal d'entrée conventionnel des données ne constituait absolument pas une opération triviale. En vérité cela revenait plutôt à tenter de résoudre un problème de type *regressio ad infinitum*. Pour le dépasser et lui apporter une solution, il fallait par conséquent parvenir à sortir de la boucle.

C'est très précisément ce que M. V. Wilkes et D. J. Wheeler firent lorsqu'ils prirent la décision de matérialiser littéralement les *initial orders* de l'E.D.S.A.C. pour les installer à l'intérieur de ce dernier. Pour ce faire ils construisirent une sorte de mémoire morte électromécanique – celle-ci consistait en un unisélecteur comprenant une multiplicité de petites bascules téléphoniques – à l'intérieur de laquelle ils câblèrent directement les circuits correspondants aux 31 fonctions essentielles de la machine. Le fait d'intégrer ainsi à l'E.D.S.A.C. une R.O.M. contenant ce que nous avons choisi de nommer un peu plus haut son « système d'exploitation » résolut le problème de son amorçage et permit de le faire opérer normalement. Pourvu de fonctions fondamentales réalisées en « dur » - donc d'ordres instantanément accessibles dès la mise sous tension - l'ordinateur de Cambridge était capable de lire les programmes à partir de son périphérique d'entrée, de convertir automatiquement les expressions symboliques et numériques au moyen desquelles ces derniers avaient été rédigés en langage machine⁹⁵⁷, et, enfin, de charger ces données interprétées dans l'une ou l'autre des 32 lignes délai ultrasoniques de sa mémoire centrale. Cette opération de chargement obéissait comme on s'en doute à un schéma de distribution rigoureux. Ici, logique informatique oblige, les ordres initiaux occupaient systématiquement les 31 premiers emplacements disponibles de l'espace de stockage central (0-30) et les programmes proprement dits les nombreuses zones individuelles d'enregistrement situées au-delà de ce nombre.

Dans les derniers jours du mois d'octobre 1949, la première mouture des *initial orders* fut corrigée. Elle fit place à un jeu d'instructions partiellement augmenté et remanié auquel on conféra une forme matérielle en usant de la même méthode que précédemment. Toujours

⁹⁵⁷On appelle « assemblage » l'opération qui consiste à transcrire automatiquement les expressions d'un langage de programmation symbolique en formules du code machine (binaire).

imaginés et réalisés avec virtuosité par David J. Wheeler, ces *initial orders 2* – ainsi qu'on les trouve ordinairement nommés dans la littérature consacrée à l'histoire des machines informatiques - comprenaient dix instructions de plus que la version précédente. La totalité des fonctions déjà assurées par celle-ci fut bien entendu conservée ici par Wheeler. En prime toutefois, ce deuxième jeu d'ordres informatiques hérita d'une capacité de contrôle améliorée pour gérer, lors des phases de chargement des applications en mémoire centrale, l'attribution des zones de stockage non réservées aux différents modules composant ces dernières (à savoir le programme principal, les matrices de données et les routines standards). Cette fonctionnalité évitait notamment que plusieurs instances d'une même sous-routine maintes fois requise au cours de l'exécution d'un programme maître ne soient simultanément chargées en différents emplacements de la mémoire. Cela permettait donc aux programmeurs de gagner du temps et d'épargner de l'espace mémoire. A l'instar de tous les « cerveaux électroniques » dont la construction démarra au cours de la période de l'immédiat après-guerre, l'E.D.S.A.C. se caractérisait par des dimensions impressionnantes et une consommation énergétique non moins confondante. A elles seules l'unité de contrôle et l'unité arithmétique et logique du système occupaient déjà trois grandes structures métalliques hautes d'environ six pieds chacune (ce qui équivaut à un peu plus de 1,80 m). Ajoutons que ces 3 « armoires », comme du reste les 9 autres dont les spécialistes anglais s'étaient servis dans le but d'abriter la quasi-totalité des éléments principaux du système, étaient en permanence maintenues ouvertes de façon à maximiser les échanges thermiques. Les 3000 tubes à vide de ce système informatique dont les modules constitutifs occupaient une surface au sol supérieure à 20 m² consommaient en effet 12 kW/h de puissance électrique. Ici comme ailleurs, la question de la dissipation thermique revêtait par conséquent une importance absolument cruciale et exigeait de la part de ceux qui veillaient sur l'intégrité de machine une attention de tous les instants.

L'E.D.S.A.C. était cadencé par une horloge interne dont la fréquence s'élevait à 500000 hertz. Si on le place en regard de la fréquence d'horloge des autres ordinateurs conçus à peu près à la même époque – laquelle, quant elle ne le dépassait pas, était toujours au moins équivalente au million de hertz⁹⁵⁸ - ce nombre paraîtra plutôt faible. Il est important de bien comprendre ici que ce trait technique singulier de l'E.D.S.A.C. ne résultait ni d'un défaut de conception – ce qui aurait impliqué de la part de M. V. Wilkes une sous-estimation fâcheuse des extraordinaires vitesses de fonctionnement permises par l'usage massif de composants électroniques – ni d'un manque réel de moyens techniques. Cette limitation de la vitesse

⁹⁵⁸ Ainsi en était-il par exemple de l'E.D.V.A.C., de l'A.C.E. *Pilot Model*, et du *Ferranti Mark I*.

d'opération de l'élément cadenceur de l'E.D.S.A.C., et donc, par voie de conséquence, de celle de la machine dans son ensemble, s'inscrivait en vérité dans la logique à la fois « conservatrice » et pragmatique que nous avons antérieurement décrite. Celle-là même qui devait présider à l'intégralité du processus de conception de cet ordinateur. Etant donné que l'objectif premier des hommes du groupe de Cambridge consistait à posséder une machine fonctionnelle dans les délais les plus brefs qui puissent être atteints, se contenter d'aller au plus simple, conceptuellement et techniquement parlant, représentait pour eux la ligne de force directrice dont il convenait ici par-dessus tout de s'éloigner le moins possible. Or le fait de mettre au point une horloge interne avec une fréquence égale ou supérieure à 1 Mhz (comme cela se pratiquait effectivement partout ailleurs), aurait représenté de ce point de vue un écart technologique non négligeable lequel, par effet de cascade, aurait exigé de la part des concepteurs de l'E.D.S.A.C. qu'ils reconsidèrent en profondeur le design d'une grande partie de ses circuits électroniques. La complexité de la structure matérielle de l'ordinateur⁹⁵⁹ s'en serait alors forcément trouvée augmentée, ce qui aurait rendu plus difficiles, plus longues et certainement plus coûteuses aussi sa construction puis sa programmation. Loin, donc, de résulter d'une quelconque erreur de conception, le bridage des performances de l'E.D.S.A.C. représenta l'un des effets les plus directement perceptibles de la volonté de voir ce dernier entrer rapidement en service pour pouvoir apprendre à le programmer.

Dans un premier temps des lecteurs et des perforateurs électromécaniques cédés par le *British General Post Office* et capables de lire ou d'écrire des séquences de cinq trous⁹⁶⁰ sur des bandes de papier télégraphique furent employés en guise de périphériques d'entrée et de sortie. L'occasion nous a déjà été donnée de souligner les difficultés certaines que soulevait presque toujours le couplage de cette catégorie d'équipements avec des ordinateurs (et plus généralement avec des systèmes comportant une majorité de composants électroniques). A cause de leur nature électromécanique ces télétypes étaient tout d'abord continuellement sujets à des dérèglements rapides. Ensuite, quand on parvenait à limiter la fréquence et l'intensité de ces phénomènes perturbateurs, la relative lenteur de ces appareils faisait inmanquablement chuter la vitesse moyenne du système informatique auquel ils se trouvaient raccordés en amont et en aval. A l'instar des autres ordinateurs fabriqués au même moment et équipé de dispositifs identiques, l'E.D.S.A.C. n'échappa pas à cela.

De mai à octobre 1946, un lecteur de bande pouvant acquérir 6 caractères alphanumériques par seconde fut utilisé comme périphérique d'entrée pour l'ordinateur du

⁹⁵⁹ Et non son architecture logique, cela va de soi.

⁹⁶⁰ Chacune de ces perforations représentant une unité fondamentale d'information.

Computer Laboratory. A compter du mois d'octobre 1949 un système de même catégorie mais offrant des performances sensiblement plus élevées- il pouvait en effet lire 16 caractères par seconde - lui fut substitué. Enfin au début de l'année 1950, moment précis où l'E.D.S.A.C. commença à être régulièrement utilisé à l'Université de Cambridge, on remplaça ce lecteur électromécanique par un instrument d'acquisition photoélectrique. De conception plus moderne, ce dernier affichait une vitesse de lecture bien supérieure à toutes celles atteintes précédemment puisqu'elle s'élevait à 50 caractères par seconde. Quant au périphérique de sortie de l'E.D.S.A.C., l'appareil perforateur auquel on avait recours afin de conserver une trace matérielle durable des résultats produits, il fut nécessaire d'attendre l'année 1951 pour assister à son renouvellement (un modèle plus rapide permettant d'écrire 16 caractères par seconde fut alors installé). S'accompagnant à chaque fois d'un gain plus ou moins remarquable en matière de fiabilité et de vitesse de fonctionnement, ces changements successifs des matériels périphériques attachés à l'E.D.S.A.C. entraînent peu à peu la réduction des temps de chargements des programmes et des données en machine et contribuèrent également à diminuer la faillibilité globale du système, c'est-à-dire de l'ensemble intégré constitué par l'ordinateur et ses différents matériels satellites⁹⁶¹.

Le 6 mai 1949 l'E.D.S.A.C. exécuta son premier programme, calculant sans rencontrer aucun problème les différentes valeurs de l'expression $(n \times n)$ sur l'intervalle d'entiers $[0, \dots, 99]$. Ce faisant, il permit de démontrer de façon incontestable que le design fondamental sur lequel ses concepteurs s'étaient basés pour le fabriquer constituait une solution architecturale élémentaire complètement valide. La première véritable⁹⁶² mise en œuvre opérationnelle et fidèle de l'idée de von Neumann suffit donc à établir clairement que celle-ci était robuste. Bien qu'elle n'ait été à proprement parler porteuse d'aucune espèce d'innovation logique ou technologique – en tout cas au regard du contenu du *First Draft of a Report on the EDVAC* et de celui de toutes les conférences et discussions qui s'étaient succédées depuis 1946 autour du thème de la conception et de la construction des ordinateurs – le seul fait d'exister et de fonctionner suffisait déjà à conférer à la machine de Cambridge un statut absolument exceptionnel.

⁹⁶¹ Au fur et à mesure que les vitesses de fonctionnement des dispositifs en charge de l'introduction de l'information à l'entrée de l'ordinateur ou de la récupération des résultats de son traitement à la sortie tendaient à se rapprocher de la vitesse de celui-ci, le système informatique ne pouvait qu'opérer plus rapidement.

⁹⁶² Véritable parce que, d'une part, M. V. Wilkes conçut l'E.D.S.A.C. en respectant fidèlement les plans de l'ordinateur spécifiés dans le *First Draft* et que, d'autre part, cette machine fut le premier ordinateur réellement opérationnel dans le monde (la *Manchester Baby Machine* n'étant rappelons-le qu'un prototype d'ordinateur aux capacités computationnelles très limitées).

L'achèvement de cet ordinateur marqua aussi l'ouverture d'un nouvel et vaste espace de recherches pour les pionniers de l'informatique de Cambridge : celui de la programmation. Ayant délibérément choisi de ne pas faire la part belle à l'innovation quant ils travaillaient à l'élaboration de leur machine, les hommes du *Computer Laboratory* virent leur conformisme technologique amplement récompensé. En effet cette approche qui trois années durant leur tint lieu à la fois de philosophie de travail et de ligne directrice les autorisa comme ils l'avaient escompté dès l'origine du projet à disposer très vite d'une machine qui, faute de se démarquer de son parangon américain, était néanmoins suffisamment puissante et robuste pour leur permettre de se consacrer pleinement à sa programmation. A partir de ce moment l'essentiel du travail qui fut entrepris, hormis bien entendu certains perfectionnements ou amendements apportés de temps à autre au hardware de la machine, devait concerner le développement de ses programmes. Evidemment ce n'est pas parce que l'E.D.S.A.C. avait été fabriqué en respectant scrupuleusement les plans de l'E.D.V.A.C. que cela devait faire de lui un ordinateur plus facile à programmer que les autres machines. Conscient de cela et également désireux de faire en sorte que son système informatique soit accessible à des utilisateurs scientifiques peu ou pas du tout expérimentés dans l'art nouveau, subtil et difficile de la programmation, Maurice V. Wilkes fit désormais du développement du logiciel un des principaux objectifs de travail du groupe de Cambridge.

C'est alors que le jeune mathématicien déjà à l'origine des *initial orders* eut l'idée en tous points remarquable de constituer une bibliothèque de sous-programmes pour l'E.D.S.A.C. En offrant aux usagers de cette machine la possibilité d'accéder ad libitum à un jeu étendu et extensible de fonctions mathématiques déjà codées, perforées, et réutilisables, David J. Wheeler ne fit rien d'autre que dispenser ces derniers d'une part importante du travail de programmation précédant nécessairement tout traitement effectif de l'information par le système. A posteriori on peut en effet se demander quel intérêt véritable ceux-ci auraient pu trouver à programmer et reprogrammer encore des segments de logiciel récurrents, fonctionnellement et structurellement similaires, quant ils n'étaient tout simplement pas identiques ? N'aurait-il pas non plus été déraisonnable et décourageant d'exiger de la part de ceux qui entendaient faire de l'ordinateur un outil d'investigation scientifique comme les autres – ou presque - qu'ils accèdent à une parfaite maîtrise de ses arcanes les plus obscurs *avant* de pouvoir commencer à l'utiliser à peu près normalement ? Avoir obligation, à chaque fois que le cas se présentait, de programmer une ou plusieurs fonctions données, surtout si celles-ci étaient communes et récurrentes, aurait inutilement alourdi la charge de travail des usagers de la machine et représenté pour eux une perte de temps totalement injustifiée. Or, ne

perdons pas ce fait essentiel de vue, la vocation originelle de l'ordinateur n'était pas de faire perdre du temps à ses utilisateurs mais tout au contraire de leur en faire gagner autant qu'il était possible. Gagner du temps en simplifiant l'emploi de l'ordinateur était par conséquent un but qu'il fallait s'efforcer d'atteindre et c'est précisément ce que D. J. Wheeler fit en concevant l'idée d'une librairie de séquences informatiques types codant pour les fonctions les plus fréquemment employées dans les applications.

La question de la mise en œuvre effective de ces sous-programmes ne tarda évidemment pas à se poser. A priori la façon la plus évidente de procéder lorsqu'une ou plusieurs de ces routines secondaires devaient être employées pour résoudre un problème quelconque consistait à confectionner une bande perforée les supportant toutes les unes à la suite des autres⁹⁶³. Cette configuration sérielle permettait alors de les exécuter successivement, en fonction des besoins courants du programme maître. Bien que parfaitement envisageable en théorie et tout à fait réalisable en fait, ce mode opératoire se caractérisait par sa relative inélégance pratique et le coût élevé, au moins en terme de temps, dont il s'accompagnait quasi systématiquement (en raison notamment de la nécessité de préparer à chaque fois les bandes dont il vient juste d'être fait mention). C'était pourtant de cette façon que l'on travaillait jusqu'à ce que D. J. Wheeler, une nouvelle fois, ne mette au point une technique de programmation révolutionnaire que l'on s'empressa de baptiser *Wheeler Jump*⁹⁶⁴. L'introduction de ce schème inédit permit d'optimiser davantage encore le travail de programmation de la machine en facilitant considérablement l'intégration et l'exécution des routines de sa bibliothèque au sein des applications. En quoi consistait-il alors exactement ?

Il est très certainement possible de commencer à donner une description du « saut de Wheeler » en signalant qu'il rompait radicalement avec la méthode commune évoquée ci-dessus, laquelle, on s'en souvient, réclamait que l'on ordonne puis que l'on exécute les sous-programmes requis pour l'effectuation d'une tâche selon un ordre linéaire. En effet, et comme ne manque pas de le rappeler clairement sa dénomination en anglais, le *Wheeler Jump* introduisait de la rupture, du fractionnement, de l'interruption, bref de la discontinuité et de la « transversalité », dans le processus jusqu'ici exclusivement sériel et « vertical » de l'exécution des procédures informatiques. L'idée centrale était ici la suivante : un programme principal étant donné, celui-ci avait la capacité de s'interrompre temporairement de façon à permettre à une sous-routine de s'exécuter lorsque c'était nécessaire. Pour le programme maître cela revenait à passer momentanément la main à une procédure standard de la

⁹⁶³ Cette bande papier constituant le support physique de l'information devant être *introduite* en machine.

⁹⁶⁴ On peut traduire cette expression par « saut de Wheeler ».

bibliothèque de sous-programmes du système, en conservant en mémoire l'adresse où cette opération de cession de contrôle s'était précisément déroulée. Une fois achevée l'exécution de ladite routine secondaire, il pouvait alors recouvrer le plein contrôle des opérations à l'endroit même où il l'avait abandonné en se référant aux données préalablement enregistrées.

L'habitude que nous avons d'employer maintenant depuis plusieurs décennies des langages informatiques de haut niveau presque intégralement orientés vers l'utilisateur et sa langue naturelle nous empêche assurément de prendre la réelle mesure de ce que pouvait représenter, pour les pionniers informaticiens du début de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, une méthode de programmation telle que le *Wheeler jump*. Pour essayer de saisir avec plus de précision la portée de cette idée⁹⁶⁵ on pourrait peut-être tenter d'imaginer à quoi aurait ressemblé l'écriture d'un programme un tant soit peu complexe au moyen d'un BASIC dépourvu de l'instruction GOSUB (et de son corollaire RETURN bien entendu). A n'en point douter la chose se serait révélée extrêmement laborieuse. Et pourtant le BASIC est loin d'être aussi ardu que l'assembleur, lequel est lui-même nettement plus évolué – c'est-à-dire en définitive plus facile - que le langage symbolique élémentaire grâce auquel on programmait jadis l'E.D.S.A.C.... Le *Wheeler Jump* peut sans nul doute être considéré comme le précurseur des instructions d'interruption avec retour (de type GOSUB), que l'on sait être d'une si grande importance en programmation.

A la différence de l'E.D.V.A.C. ou, pour ne donner ici que des exemples d'ordinateurs construits sur le sol britannique, du *Manchester Mark I* ou de l'A.C.E. *Pilot Model*, l'E.D.S.A.C. n'eut pas grande descendance. Quatre machines, dont trois appartenant à la même lignée, en furent seulement dérivées : l'E.D.S.A.C. II, successeur du premier système, toujours développé au *Computer Laboratory* à Cambridge, et les LEO I, II et III. La première version du *Lyons Electronic Office*, du nom de l'entreprise anglaise qui on s'en souvient s'investit dès l'origine dans la construction de l'E.D.S.A.C., est certainement la plus intéressante. Pendant qu'Ernest H. Lenaerts, leur ambassadeur à Cambridge, apprenait tout ce qu'il y avait à savoir sur le design et la construction des ordinateurs auprès de l'équipe de Maurice V. Wilkes, les dirigeants de la *J. Lyons & Co.* firent paraître une annonce dans la prestigieuse revue scientifique *Nature*. Il s'agissait en l'occurrence d'embaucher un ingénieur en électronique. Pour comprendre les motifs exacts de cette démarche, il est nécessaire de préciser qu'en 1948 l'industriel anglais se mit en quête d'un entrepreneur afin de lui confier la fabrication de son ordinateur. Ne trouvant personne pour s'acquitter de ce travail inédit et

⁹⁶⁵ Et encore on ne fera ici que l'effleurer car le langage que nous avons choisi ici a été conçu à l'origine pour des personnes débutant en programmation.

colossal, il dut toutefois se résoudre à l'effectuer lui-même. D'où le recrutement de personnels spécialisés par voie de presse. Parallèlement à cela on prit aussi la décision – emprunte de sagesse - d'attendre que Maurice V. Wilkes achève l'assemblage de l'E.D.S.A.C. afin de voir si cette machine, oui ou non, fonctionnerait.

Au rang des prétendants au poste d'ingénieur proposé par la *J. Lyons & Co.* figurait un jeune homme fraîchement diplômé de l'Université de Cambridge, John M.M. Pinkerton. C'est lui que G. W. Booth, le directeur du département administratif de cette compagnie, choisit durant le mois de décembre 1948 pour diriger la fabrication de ce qui n'allait pas tarder à devenir le premier ordinateur LEO. Dans un entretien accordé le 4 octobre 1987 à un représentant du *Digital Computer Museum*, J. M. Pinkerton a rapporté que l'annonce de *Nature* à laquelle il avait répondu en 1948 avait été rédigée sous le couvert de l'anonymat mais qu'en dépit de cette disposition, il avait malgré tout soupçonné qu'elle émanait du magnat anglais de la restauration. La raison en est relativement simple. Après la guerre J. M. Pinkerton rejoignit le *Cavendish Laboratory* à Cambridge, lequel était distant d'une centaine de mètres à peine du *Maths Laboratory* – le futur *Computer Laboratory* - où travaillait Maurice V Wilkes. Là, le jeune étudiant en physique travailla à la rédaction d'une thèse portant sur l'absorption des ondes ultrasoniques dans les milieux liquides en usant de la méthode des impulsions. Une excellente préparation s'il en est pour une personne qui devait par la suite travailler sur des ordinateurs utilisant des lignes délai comme support matériel de leur mémoire principale. J. M. Pinkerton rencontra plusieurs fois Maurice V. Wilkes à l'occasion de réunions organisées par l'*University Wireless Society*, l'association regroupant les radios amateurs de Cambridge. C'est lors d'une de ces réunions tenues pendant l'été 1948 que le père de l'E.D.S.A.C. l'informa du fait que la *J. Lyons & Co.* aspirait très fortement à construire un ordinateur. Pour J. M. Pinkerton la relation entre l'existence de ce projet et l'annonce publiée dans *Nature* ne fut guère difficile à établir. Recruté le 13 décembre 1948, il commença à travailler pour le compte de la *J. Lyons & Co.* le 17 janvier 1949, tout d'abord en qualité d'ingénieur électronicien puis, plus tard, en tant que chef architecte du *Lyons Electronic Office*.

La construction du LEO I débuta au cours de l'été 1949, c'est-à-dire peu de temps après que l'E.D.S.A.C. ait fait la preuve de sa fiabilité et de son efficacité. Bien que ses concepteurs se soient grandement appuyés sur les plans de l'ordinateur de Cambridge - et donc par extension sur ceux de l'E.D.V.A.C. - pour le réaliser, le LEO I ne constituait pas pour autant une copie conforme de ses deux illustres archétypes. En même temps force est faite de reconnaître qu'il ne s'éloignait guère d'eux. Un certain nombre de modifications sur

lesquelles nous allons revenir bientôt furent ainsi apportées au LEO I mais étant d'ordre secondaire⁹⁶⁶, elles n'étaient pas suffisantes pour le différencier vraiment des ordinateurs qui directement ou indirectement l'avaient inspiré. Le LEO I était composé de 5936 valves électroniques⁹⁶⁷. Ces milliers de tubes étaient distribués dans 228 modules électroniques, eux-mêmes installés sur 21 armoires métalliques séparées. Cadencé à la fréquence de 500 Hz, disposant du même jeu d'instructions fondamentales que l'E.D.S.A.C., le LEO I était équipé d'une mémoire principale constituée de 64 lignes délai – soit deux fois plus que l'ordinateur de Cambridge - ce qui lui conférait une capacité totale de stockage de 2048 mots de 17 bits chacun. Un astucieux dispositif d'enceinte thermique assurait la constance de la température à laquelle opéraient ces lignes⁹⁶⁸. L'une d'entre elles, la *master frequency control unit* ou « unité de contrôle principale de la fréquence », faisait par ailleurs office de système référent pour fixer la fréquence standard de transmission des impulsions au sein des éléments de stockage acoustiques. Un des avantages majeurs liés à la présence conjointe, dans le LEO I, d'un caisson de confinement thermique pour les lignes délai au mercure et d'un « métronome » électroacoustique pour normaliser la fréquence des impulsions s'y trouvant stockées résidait dans le fait que ses usagers n'étaient pas contraints, pour commencer à l'utiliser, d'attendre que la température des composants de sa mémoire principale se stabilise après qu'ait été effectuée la mise sous tension⁹⁶⁹. Dans le contexte spécifique où ses commanditaires entendaient déployer le *Lyons Electronic Office* – en l'occurrence et comme son nom le laisse voir sans ambages il s'agissait de l'univers des affaires commerciales – cette dernière caractéristique revêtait on le comprend une importance capitale. Dès le moment du démarrage en effet la machine était opérationnelle, ou presque. Un facteur déterminant quant on se trouve dans l'obligation de traiter au jour le jour une quantité importante de données économiques et administratives afin de rester compétitif dans un secteur très concurrentiel.

Au commencement les éléments périphériques de l'ordinateur de la *J. Lyons & Co.* ne se distinguaient en rien de ceux de l'E.D.S.A.C. Il s'agissait de lecteurs et de perforateurs de bandes de papier télégraphique à cinq « pistes ». La nature particulière des tâches que l'on entendait confier au LEO I commanda cependant que l'on apporte un certain nombre de modifications à cette configuration originale. L'E.D.S.A.C. était en effet une machine

⁹⁶⁶ Comme nous allons le voir, ces changements ne devaient concerner que les équipements périphériques du système et non son architecture fondamentale.

⁹⁶⁷ Il convient de rajouter à ce nombre les 300 ou 400 tubes employés pour la fabrication des matériels auxiliaires.

⁹⁶⁸ Chaque ligne délai acoustique mesurait 1,625 mètre de long et pesait près d'une demi-tonne.

⁹⁶⁹ Sur les autres systèmes informatiques équipés de la même sorte de dispositif mémoire, cette attente pouvait se révéler assez longue en fonction des conditions thermiques courantes.

spécifiquement conçue pour la réalisation d'applications scientifiques. Or les calculs de cette espèce étaient en général effectués sur un nombre réduit de données d'entrée, ils réclamaient ensuite l'exécution d'un très grand nombre d'opérations souvent complexes et répétitives et pour terminer, ils ne produisaient que peu d'informations en sortie. Il en allait tout autrement des travaux de type administratif ou commercial : en entrée comme en sortie, les données abondaient littéralement tandis que les calculs proprement dits, eux, étaient la plupart du temps d'une grande simplicité. Par définition bien sûr, un ordinateur est capable de calculer tout ce qui est calculable. Peu importe donc le domaine de réalité auquel appartiennent les calculs qu'on souhaite le voir effectuer. En vertu de cela, et attendu que le LEO I était une machine de von Neumann, son architecture fondamentale n'avait pas à être rectifiée. Comme on entendait toutefois en faire usage dans un cadre essentiellement commercial, le rattachement d'équipements périphériques adaptés et rapides, c'est-à-dire capables d'acquiescer ou d'imprimer en un temps limité une quantité très importante de données parfois diversifiées en genre, s'imposait ici comme quelque chose d'absolument indispensable. Faute de cela en effet, tout le temps de traitement qu'il aurait été possible d'économiser grâce à la fantastique vitesse d'opération de l'unité arithmétique et logique de l'ordinateur aurait été gaspillé. L'ordinateur de la *J. Lyons & Co.* fut en conséquence pourvu de façon à répondre parfaitement à cet impératif.

Le LEO I comportait trois canaux d'entrée, chacun alimenté par un lecteur de cartes ou de bandes perforées, et deux voies de sortie, l'une équipée d'une imprimante ligne à ligne et l'autre d'une perforatrice de cartes. Entre le cœur logique du système et ses périphériques, des mémoires tampon ultrarapides (des *buffers*), furent disposées de façon à pouvoir enregistrer momentanément des informations en attente de traitement ou encore des données venant tout juste d'être produites. Reposant sur une économie d'anticipation visant à affranchir le CPU de toute contrainte d'attente, le fonctionnement de cet ensemble faisait l'objet d'un processus de coordination automatique extrêmement précis. En fonction de leur provenance (lecteurs situés en amont du CPU ou CPU lui-même), les patterns de bits stockés dans les buffers du LEO I étaient tenus à l'immédiate disposition de son unité de calcul ou bien à celle de l'un de ses deux périphériques de sortie. Vidées de leur contenu informationnel dès que cela s'avérait possible, c'est-à-dire lorsque le CPU ou l'un des dispositifs d'écriture du système devenaient inoccupés, ces mémoires de petite capacité étaient immédiatement réapprovisionnées en données. De ce fait, pour pouvoir travailler sur elles, l'unité centrale de traitement de l'ordinateur n'était jamais dans l'obligation d'attendre que des informations lui arrivent en provenance directe des lecteurs externes (lesquels étaient comme on le sait

relativement lents par rapport à elle). Il en allait pareillement pour les résultats venant d'être produits et désormais en attente d'impression. Le CPU les stockait passagèrement dans un buffer puis ils étaient automatiquement expédiés vers le périphérique de sortie approprié lorsque celui-ci devenait disponible (c'est-à-dire quand il avait fini d'imprimer le flux de données précédent).

Etant donné que le LEO I disposait de plusieurs canaux d'entrée et de sortie reliés à différents types d'équipements périphériques, ses concepteurs décidèrent de le doter d'instructions et de circuits électroniques spéciaux pour autoriser mais aussi gérer les opérations de commutation entre ces unités hétérogènes. Cette dernière disposition devait se révéler particulièrement précieuse puisque les opérations de gestion, d'administration et de finances que l'on entendait confier à terme à cet ordinateur nécessitaient assez fréquemment que l'on procède à la fusion ou encore à la comparaison de flux de données en provenance de deux sources différentes. Il est intéressant de noter aussi que pendant un période de temps relativement courte, on rattachait au LEO I un lecteur/enregistreur de bandes magnétiques expérimental. Conçu et fabriqué par la *Standard Telephones and Cables Limited*, ce dispositif consistait en une longue boucle de bande magnétique passant devant un couple de têtes de lecture et d'écriture désolidarisées. Ce système d'enregistrement très en avance sur son temps – trop sans doute puisqu'en définitive les techniciens se virent contraints de le retirer en raison de son trop grand manque de fiabilité – fut installé à l'interface du LEO I et de ses périphériques d'entrée. A cet emplacement et toujours en accord avec la logique d'anticipation de chargement des données que nous avons mentionnée plus haut, il était pour l'essentiel utilisé à la manière d'un espace de stockage temporaire, une sorte de zone tampon si l'on préfère, dans le but d'augmenter la vitesse d'acheminement des informations entre les unités de lecture situées en amont de l'ordinateur et l'ordinateur lui-même. Au cours de cette opération un gain de temps appréciable était réalisé puisque le média magnétique sur lequel transitaient ces données permettait d'atteindre des vitesses de transfert bien supérieures au débit offert par les périphériques électromécaniques du système.

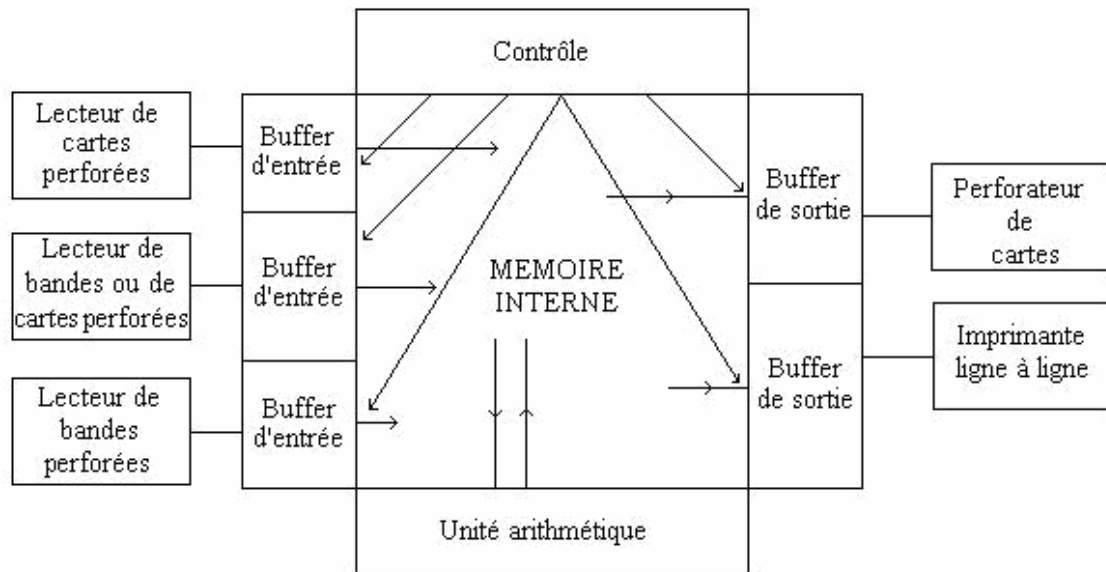


Fig 2: plan schématique représentant l'architecture fondamentale du *Lyons Electronic Office I* (d'après David T. Caminer, *Behind the Curtain at LEO, IEEE Annals of the History of Computing* Vol 25, Avril-Juin 2003, p. 7)

Le premier véritable test opérationnel du LEO I se déroula le 5 septembre 1951, avec une application dénommée *Bakeries Valuation*. L'opération se révéla un franc succès et peu à peu, le spectre des tâches confiées à l'ordinateur commença à se diversifier et à s'élargir. En même temps les ingénieurs et les techniciens de la *J. Lyons & Co.* ne cessèrent jamais d'apporter des perfectionnements à la machine, détectant et remédiant à ses défauts avec une minutie toute scientifique. Hormis la gestion automatique de stocks de produits ou encore le calcul de tables d'imposition, un des objectifs primordiaux que les dirigeants de cette firme employant plusieurs dizaines de milliers d'employés avaient en tête lorsqu'ils décidèrent de fabriquer un ordinateur pour leur propre compte était de confier à cette machine le traitement des salaires du personnel. Pour des motifs sur lesquels nous n'avons pas vraiment besoin de nous étendre ici, c'était là un travail qui devait impérativement être achevé en temps et en heure, et cela d'autant plus qu'en Angleterre, le versement du salaire s'effectuait selon des échéances hebdomadaires. Le 24 décembre 1953, enfin, le LEO I fut déclaré suffisamment fiable pour servir régulièrement au calcul de la paie des employés de la *J. Lyons & Co.* Les premières démonstrations réalisées en ce sens avec la *Payroll Application* suffirent à faire la preuve définitive de la supériorité de l'ordinateur dérivé de l'E.D.S.A.C. : là où, en moyenne, il fallait environ 8 minutes à un employé de bureau expérimenté pour calculer le montant de la paie d'une personne, le temps de travail du LEO I n'était que de 1,5 seconde... La nouvelle de l'existence et de l'efficacité extraordinaire du « cerveau électronique » conçu par la *J.*

Lyons & Company ne fut pas longue à se répandre dans le pays et très rapidement, des demandes de services scientifiques ou administratifs émanant de mathématiciens, de cristallographes, de météorologistes, de représentants d'assurances ou de compagnie aériennes, affluèrent dans les locaux de la firme. Entre autres travaux de calculs réalisés pour le compte d'organisations gouvernementales ou d'entreprises étroitement liées au secteur de la défense, on sait par exemple que la machine travailla pour le *Ministry of Supply* et la *De Havilland Propellers Limited*. Précisons que les calculs réalisés pour *De Havilland*, une société aéronautique britannique restée fameuse pour les chasseurs bombardiers Mosquito qu'elle produisit pendant la deuxième guerre mondiale, concernaient la mise au point d'un missile balistique de moyenne portée assez similaire au lanceur américain *Thor*, le *Blue Streak*. Il est intéressant de savoir qu'en Grande-Bretagne un ordinateur civil, en vérité le premier à avoir jamais été fabriqué par une entreprise privée dans ce pays, fut à un moment donné utilisé par l'armée afin de solutionner des problèmes liés à la mise au point d'un vecteur aérien de têtes nucléaires.

La demande croissante de services et d'applications informatiques formulée par des acteurs majeurs de l'économie nationale, mais aussi celle émanant de ses multiples départements, amena bientôt la *J. Lyons & Co.* à considérer très sérieusement la possibilité de valoriser l'avance technologique qu'elle avait acquise depuis 1948 en devenant un fabricant d'ordinateurs. Au mois de juillet 1954, l'industriel de la restauration décida de commencer à fabriquer le successeur de LEO I (logiquement baptisé LEO II) et le 4 novembre de la même année, il créa la *LEO Computers Limited*, sa branche informatique. Assez rapidement, une dizaine de commandes furent enregistrées par la nouvelle division. La livraison des premiers exemplaires du LEO II débuta en 1957. Parmi les acheteurs de ces machines figuraient bien sûr la *J. Lyons & Co.*, mais aussi la *Ford Motor Co.*, le *Ministry of Pensions*, la *W.D. & H.O. Wills Ltd.*, la *Standard Motor Co.* et encore la *British Oxygen Co.* Le successeur du LEO II, le LEO III, se vendit remarquablement bien dans sur le territoire britannique et à l'étranger. Entre 1962 et 1967 une centaine de machines furent ainsi livrées à leurs commanditaires. Certaines d'entre elles furent exportées vers l'Afrique du Sud, l'Australie et, chose assez surprenante, vers la République Démocratique Populaire de Tchécoslovaquie... Malheureusement pour elle, la *LEO Computers Limited* n'était pas en position de lutter durablement contre l'écrasante puissance des fabricants d'ordinateurs américains. Elle fusionna avec l'*English Electric Co.* en 1963 pour devenir l'*English Electric LEO* puis, plus tard, l'*English Electric Leo Marconi*. Cette entreprise fut à son tour absorbée par la firme anglaise d'informatique *International Computers Limited* (aujourd'hui *Fujitsu ICL*), en 1968.

Les deux derniers exemplaires de LEO III⁹⁷⁰ furent retirés du service à Cardiff et à Bristol dans le courant de l'année 1981.

Avec le *Royal Society Computing Machine Laboratory* de l'Université de Manchester et la *Mathematics Division* du *National Physical Laboratory* de Teddington, le *Computer Laboratory* de l'Université de Cambridge devait représenter un des trois principaux foyers de développement de l'informatique en Grande-Bretagne. Il est évident que lorsque nous écrivons ici le terme « informatique », c'est tout autant la composante matérielle que la dimension logicielle de cette discipline que nous avons à l'esprit. Le projet de Maurice V. Wilkes, quant il entreprit la conception de l'E.D.S.A.C., consistait nous l'avons dit à disposer au plus vite d'une machine pour pouvoir travailler au développement de programmes. De manière plus générale le scientifique britannique entendait ici se consacrer tout particulièrement à l'étude des principes théoriques et pratiques de la programmation afin de mieux les définir et, éventuellement, de les étendre. Pour la petite équipe de pionniers de l'informatique réunie autour de lui, il n'était donc pas question de s'aventurer à relever d'audacieux défis d'ingénierie. Plus qu'un banc test informatique performant qui leur aurait permis d'éprouver telle ou telle solution technologique inédite (et onéreuse), ils voulaient posséder un ordinateur fiable, à la programmation duquel se consacrer entièrement ou presque. Une des conséquences majeures de l'adoption de cette direction de travail pour le moins inhabituelle à l'époque – outre la fabrication de l'E.D.S.A.C. c'est évident - est qu'elle contribua à faire de Cambridge et de son *Computer Laboratory* un centre informatique éminemment influent en matière de programmation. Entre la fin des années quarante et le début des années cinquante deux évènements de taille vinrent en quelque sorte « sanctionner » cet état de faits. Premièrement, du 22 au 25 juin 1949, l'Université de Cambridge organisa une grande série de conférences sur les « machines à calculer » automatiques à haute vitesse⁹⁷¹. C'était la première réunion de ce type organisée en dehors du territoire des Etats-Unis et à cette occasion, plus d'une centaine de personnes purent assister à une démonstration des capacités de l'E.D.S.A.C. Deuxièmement en 1951 Maurice V. Wilkes, David J. Wheeler et leur collègue Stanley Gill firent paraître aux U.S.A. – et non en Angleterre comme on aurait pu s'y attendre- le tout premier manuel de programmation informatique de l'histoire. Intitulé

⁹⁷⁰ Il s'agissait d'un LEO III 360 et d'un LEO III 326.

⁹⁷¹ M. V. Wilkes et W. Renwick, « The EDSAC: Report of a Conference on High Speed Automatic Calculating Machines », 22-25 juin 1949, *Cambridge: University Mathematical Library*, 1950; Reproduit in B. Randell, *The Origins of Digital Computers: Selected Papers*, 3^{ème} Edition, Berlin: Springer-Verlag, 1982.

*The Preparation of Programs for an Electronic Digital Computer*⁹⁷², il présentait des concepts fondamentaux tels que le recours à une forme de notation symbolique pour l'écriture des programmes, l'emploi de sous-programmes réutilisables organisés sous forme de librairie ou bien encore celui de routines d'interprétation ou de débogage. Bref cet ouvrage hautement spécialisé dévoilait au monde entier tout ce qui faisait l'excellence et l'originalité de ce que l'on pourrait peut-être appeler le modèle ou le système de programmation de Cambridge. Car ne nous y trompons pas. C'est bien d'abord et avant toute chose grâce aux travaux formidablement innovants qui furent réalisés par ses personnels dans le domaine de la programmation que le *Computer Laboratory* de l'Université de Cambridge put durablement marquer de son empreinte l'histoire de l'informatique. En écrivant ceci nous n'oublions pas bien sûr que l'E.D.S.A.C. fut le premier ordinateur opérationnel de l'histoire. A juste titre, la déjà glorieuse Université de Cambridge ne pouvait et ne peut encore que s'enorgueillir de ce fait prestigieux. Cependant il ne faut pas non plus oublier que l'E.D.S.A.C. était une machine technologiquement orthodoxe, c'est-à-dire fidèle en tous points aux plans que John von Neumann avait établis en 1945 pour la construction de l'E.D.V.A.C. Ceci doit impérativement être pris en compte lorsque l'on en vient à évoquer l'avance étonnante que le *Computer Laboratory* possédait sur les autres grands centres informatiques de la planète⁹⁷³... Son hégémonie d'alors Cambridge la devait par conséquent aux percées fondamentales qui, de 1948 à 1951, avaient été réalisées en matière de programmation. Pour ce qui est des innovations touchant au matériel informatique, l'Université de Manchester et le *National Physical Laboratory* de Teddington tenaient à leur tour les devants. C'est à l'histoire de l'*Automatic Computing Engine*, l'ordinateur du N.P.L., que nous allons à présent nous intéresser.

1.1.4. L'*Automatic Computing Engine* (A.C.E.), du *National Physical Laboratory*.

De l'élaboration du concept logico-mathématique de Machine Universelle – condition de possibilité théorique nécessaire à son apparition - à sa première concrétisation réellement opérante, une douzaine d'années plus tard, toute la protohistoire de l'ordinateur est intimement liée au cheminement intellectuel et à la chronique d'un homme d'exception: Alan

⁹⁷² M. V. Wilkes, D. J. Wheeler, et S. Gill, *The Preparation of Programs for an Electronic Digital Computer*, Cambridge, Massachusetts, Addison Wesley, 1951.

⁹⁷³ Comme l'a soutenu M. Campbell-Kelly dans « The Development of Computer Programming in Britain (1945—1955) », (in *Annals of the History of Computing*, vol. 4, n°2, pp. 121-139, 1982), il est fort probable que Cambridge ait peu à peu perdu son leadership au cours des années cinquante en raison de son incapacité à développer des langages de programmation de haut niveau.

Mathison Turing. Le mathématicien et logicien anglais, nous l'avons dit plus haut, rejoignit les rangs des chercheurs du *Royal Society Computing Machine Laboratory* de Manchester dans le courant du mois de septembre 1948. Là, pendant plusieurs années, il participa au développement de l'*Automatic Digital Machine* (le *Mark I*). Cet ordinateur n'était pourtant pas le premier à la construction duquel A. M. Turing prenait une importante part active. En effet entre le moment où il quitta les fonctions qu'il occupait à la très secrète *Government Code and Cipher School* de Bletchley Park, à la fin de la deuxième guerre mondiale, et celui où il vint renforcer l'équipe de Max H.A. Newman à l'Université de Manchester, le mathématicien conçut le design puis participa à la mise au point de l'*Automatic Computing Engine*, le futur ordinateur du *National Physical Laboratory*. De façon fort étonnante, des trois projets britanniques majeurs qui furent démarrés quasi simultanément dans la période de l'immédiat après-guerre c'est certainement l'A.C.E. qui connut la destinée la plus tumultueuse et l'achèvement le moins réussi. En principe pourtant toutes les conditions paraissaient réunies pour que le N.P.L. réussisse à coiffer largement les Universités de Manchester et de Cambridge – et pour le coup aussi la *Moore School of Electrical Engineering* et la *Princeton University* - dans ce que faute d'une désignation peut-être plus appropriée nous pourrions appeler « la course au développement du premier ordinateur opérationnel de la planète ». On sera mieux à même de juger de cela après avoir brièvement reconsidéré certains des moments et des points les plus importants et les plus pertinents du parcours intellectuel et historique - il sera question dans ce qui suit des périodes d'avant guerre et de guerre - du principal maître d'œuvre de l'A.C.E., Alan M. Turing.

Dans les premiers mois de l'année 1936, Alan M. Turing rédigea un article d'une très grande portée scientifique⁹⁷⁴. Dans ce travail, il démontrait que le problème ouvert de Hilbert consistant à fournir un inventaire des assertions vraies existant dans le domaine mathématique était insoluble. Cette question fondamentale était celle de l'*Entscheidungsproblem*, c'est-à-dire de la décidabilité des mathématiques. Pour résumer il s'agissait de savoir si, au moins en droit, il existait une *procédure effective* grâce à laquelle il était possible de décider si un quelconque énoncé mathématique pouvait être démontré. On pourra encore formuler la chose d'une autre façon en disant que cela revenait à se demander s'il existait une méthode de calcul - un algorithme - permettant de démontrer une proposition mathématique donnée en un nombre fini d'étapes déterminées. C'est pour les besoins de l'établissement de cette preuve d'insolubilité que le mathématicien, en tissant audacieusement le parallèle avec le mode

⁹⁷⁴ Alan M. Turing, « On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem », in *Proceedings of the London Mathematical Society*, Série 2, vol. 42, , pp. 230-265, 1937.

opérateur d'un calculateur humain procédant de façon *méthodique* – c'est-à-dire finalement *mécanique* - introduisit la notion de « machine à calculer universelle ». Rappelons que ce dispositif qui nous est à présent beaucoup mieux connu sous l'appellation de Machine Universelle de Turing (ou M.U.T.) était une construction théorique capable d'effectuer, grâce à une tête de lecture/écriture « obéissant » aux entrées d'une table de configurations⁹⁷⁵, une tâche spécifique en réalisant un certain nombre d'opérations très élémentaires sur un jeu fini de symboles. Ces éléments symboliques devaient figurer individuellement au sein des cases d'une bande de « papier » de longueur potentiellement infinie défilant discrètement dans un sens ou dans l'autre « sous » la tête de lecture/écriture de la machine abstraite. Au moyen de ces inscriptions il était alors tout à fait possible de représenter la table de configurations d'une machine de Turing spécifique, c'est-à-dire d'une machine de Turing correspondant à telle ou telle fonction ou algorithme particuliers, sur la bande d'une machine universelle afin d'amener (temporairement) cette dernière à opérer exactement comme cette machine caractéristique. La machine universelle décrite par Turing dans « On computable numbers, with an application to the *Entscheidungsproblem* » n'était par conséquent rien d'autre que l'archétype idéal du calculateur digital à programme enregistré. En d'autres termes elle représentait le modèle théorique de l'ordinateur. Cependant quant, à dessein, il introduisit pour la première fois sa « machine à calculer universelle » au début de la seconde moitié des années trente, l'attention de Turing ne portait pas tant sur ce qu'elle était en mesure de calculer mais bien plutôt sur ce qu'elle ne pouvait pas calculer. Cette construction intellectuelle lui permit en effet de prouver qu'il existait des problèmes mathématiques parfaitement définis qui, en dépit de cela, ne pouvaient être résolus en recourant à des méthodes effectives (des algorithmes). Dans les années qui suivirent cette perspective ne tarda toutefois pas à s'inverser, entraînant alors des conséquences aussi heureuses que spectaculaires (tout du moins quant elles furent connues).

Au mois de septembre 1936, Turing rejoignit l'*Institute of Advanced Study* de l'Université de Princeton pour une durée de deux ans afin d'y rédiger une thèse de logique mathématique⁹⁷⁶ sous la direction du logicien Alonzo Church. Pendant ce long séjour aux Etats-Unis, Turing se lia avec le Professeur John von Neumann – immense figure planétaire des mathématiques et de la logique s'il en était – lequel partageait avec le jeune scientifique britannique un intérêt plus que marqué pour la question des automates calculateurs. D'après

⁹⁷⁵ Encore appelée table d'états ou table d'instructions.

⁹⁷⁶ Ce travail qui constitue aujourd'hui un classique de la théorie des fonctions récursives a été publié avant guerre sous le titre de « Systems of Logic Based on Ordinals » (in *Proceedings of the London Mathematical Society*, Séries 2, vol. 45, pp. 161-228, 1939).

Jack B. Copeland⁹⁷⁷ qui rapporte ici des propos tenus en 1976 par Stanislas Ulam, l'un des plus proches collègues et amis de l'auteur des *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, c'est au cours de cette période que le grand physicien se familiarisa véritablement avec les premiers travaux théoriques de Turing, et plus particulièrement avec la notion de machine à calculer universelle. Manifestation on ne peut plus significative de la très haute estime professionnelle et personnelle dans laquelle il tenait déjà Alan M. Turing, John von Neumann proposa à ce dernier de devenir son assistant à Princeton en avril ou mai 1938. Cependant le jeune homme déclina l'offre – laquelle paraissait pourtant avantageuse en tous points - et préféra retourner en Grande-Bretagne et retrouver son statut de *fellowship* au King's College de Cambridge. Pendant son séjour à l'*Institute of Advanced Study* ses travaux de recherche en logique mais aussi un sentiment croissant d'inquiétude lié aux positions de plus en plus ouvertement bellicistes du gouvernement de l'Allemagne nazie conduisirent Turing à s'intéresser de près à la cryptographie et ce non seulement d'un point de vue théorique, ce qui n'était pas véritablement surprenant de la part d'un mathématicien de son rang, mais aussi, et cela l'était nettement plus, d'un point de vue pratique. Pour les besoins d'un petit prototype de machine de décryptage de son invention, il se fit ingénieur, imaginant et confectionnant ainsi une unité à commutateurs électriques permettant de multiplier des nombres représentés en binaire. Revenu au King's College, quelques temps avant que le deuxième conflit mondial n'éclate, il poursuivit ses activités de logicien et de spécialiste de la théorie des nombres. On sait également qu'à Cambridge, il suivit les enseignements philosophiques donnés par Ludwig Wittgenstein sur les fondements des mathématiques⁹⁷⁸. Au cours de la brève période d'accalmie qui précéda l'entrée en guerre des principaux pays d'Europe, l'intérêt manifesté par Turing à l'endroit des automates mathématiques concrets ne diminua en aucune manière. Tout au contraire.

En lieu et place de réaliser un dispositif cryptanalytique, le mathématicien entreprit cette fois de concevoir un appareillage mécanique permettant de calculer la fonction Dzêta de Riemann. Cet instrument par définition très limité (en raison même de la spécificité de l'usage auquel son créateur le destinait), n'avait il est vrai pas grand-chose à voir avec une « incarnation » de la machine universelle telle que Turing l'avait décrite en 1936-37. L'auteur de « Sur les nombres calculables... » avait évidemment tout à fait conscience de cela et il ne dissimula rien du caractère univalent de sa machine aux gens de la *Royal Society* quant il prit

⁹⁷⁷ In [Copeland, 2004], pp.21-22. Voir notamment la note 16.

⁹⁷⁸ L. Wittgenstein, *Cours sur les fondements des mathématiques*, Ed. Trans Europ Repress, Mauvezin, 1995.

contact avec eux afin de solliciter une aide financière⁹⁷⁹. Une nouvelle fois A. M. Turing ne laissa à personne d'autre que lui le soin de fabriquer sinon la machine elle-même – en raison de la tournure prise par les évènements cette dernière ne put d'ailleurs jamais être achevée – du moins quelques-unes de ses pièces. Ce fait mérite d'être noté car à l'époque la frontière séparant les théoriciens purs des ingénieurs était très marquée. Cette disjonction professionnelle se vérifiant tout particulièrement en Angleterre. Il existe un plan de cette machine de Turing un peu inhabituelle (voir le diagramme original présenté ci-dessous). Intitulé *Zeta Function Machine*, il porte la date du 17 juillet 1939 et a été réalisé par Donald MacPhail qui était alors étudiant en ingénierie mécanique au King's College⁹⁸⁰.

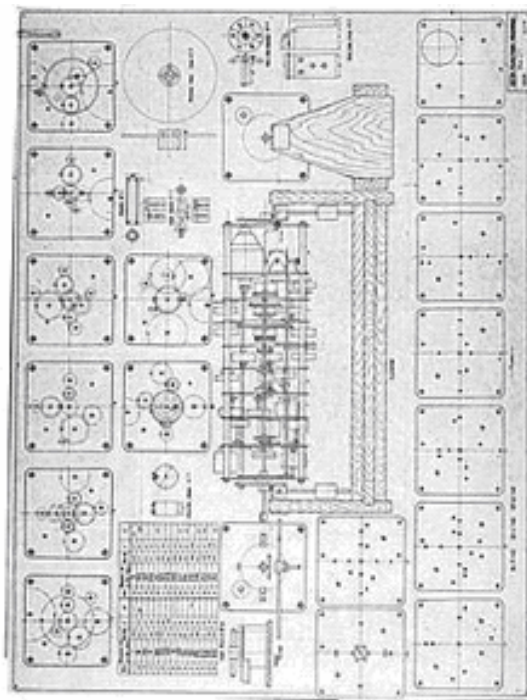


Fig 3: Diagramme de la Zeta Function Machine, , Donald MacPhail, 17 juillet 1939, © University of Southampton and King's College Cambridge, 2002, 2003.

Cinq mois avant que le plan de ce dispositif spécial ne soit tracé par le jeune élève ingénieur, le vent de l'Histoire avait commencé à dangereusement tourner. Le 15 mars 1939, l'Allemagne avait ainsi envahi la Tchécoslovaquie. Seize jours après que cette invasion se soit produite, le Royaume-Uni et la France assurèrent le gouvernement d'une Pologne désormais

⁹⁷⁹ Pour la réalisation de cet instrument, il obtint de la part de la prestigieuse institution britannique une subvention de 40 livres sterling.

⁹⁸⁰ Ce diagramme portant l'identifiant « AMT/C/2 image 1 » est accessible sur le site Internet des archives de Turing (<http://www.turingarchive.org>). Un commentaire actuel rajouté en marge précise qu'il a très probablement été préparé en liaison avec « A Method for the Calculation of the Zeta Function », un article qu'Alan M. Turing rédigea et fit parvenir à la *Royal Society* en 1939 (laquelle l'éditiona en 1943).

directement menacée par les armées nazies de leur complet soutien. Depuis le début des années trente, et grâce entre autres choses à l'aide que leur fournissaient les services du renseignement militaire français, les cryptographes et mathématiciens du bureau du chiffre polonais avaient été en mesure de lire tous les messages que l'armée allemande cryptait au moyen de ses machines à chiffrer Enigma. Le 15 septembre 1938 cependant, les nazis procédèrent à une modification drastique de leur mode opératoire, forçant les polonais à faire évoluer leurs équipements de déchiffrement en conséquence⁹⁸¹. Un mois plus tard le mathématicien Marian Rejewski mit au point sa fameuse *bombe cryptologique* – que l'on pourrait globalement décrire comme un appareil de décryptage électromécanique agrégeant six Enigma - laquelle devait permettre aux polonais de continuer à accéder au contenu des communications allemandes. A partir de la date du 15 décembre 1938 la situation se compliqua encore singulièrement car les allemands commencèrent à employer de manière régulière deux rotors cryptants additionnels - les rotors numéros IV et V dans la numérotation en vigueur – pour accroître davantage la complexité de leur protocole de chiffrement. Ceci ne signifie pas qu'à cette date les services du renseignement polonais n'étaient plus capables de déchiffrer les messages allemands mais que les moyens matériels et humains nécessaires pour mener à bien cette tâche étaient désormais dix fois plus élevés qu'ils ne l'avaient été jusqu'à présent⁹⁸². Dire ici que la situation avait pris une tournure critique ne reviendrait évidemment qu'à formuler un doux euphémisme. A la mi-juillet 1939 le Lieutenant Général W. Stachiewicz, chef du bureau du chiffre polonais, prit la décision de partager avec les alliés français et anglais les connaissances et le savoir-faire accumulés par son département à propos du dispositif d'encryptage Enigma. Il doit être noté que jusqu'à ce moment précis, ces informations extrêmement sensibles avaient en effet été jalousement gardées par les services d'espionnage polonais. Suite à ce changement de politique en matière de partage du renseignement, une rencontre fut organisée le 25 juillet à Varsovie, à l'occasion de laquelle les polonais confièrent aux membres des délégations de ces deux pays des documents et des matériels (pour l'essentiel des reproductions des machines allemandes), relatifs à Enigma. Le

⁹⁸¹ Lequel comptait près de deux dizaines de répliques de machines Enigma et un appareil nommé « cyclomètre » qui employait les rotors combinés de deux Enigma et servait à découvrir les clefs de chiffrement.

⁹⁸² Dans l'appendice I du premier volume de *British Intelligence in the Second World War* (F. H. Hinsley, Cambridge University Press, édition abrégée, 1993), Marian Rejewski a commenté de la sorte l'apparition de ces deux roues cryptantes supplémentaires: « *Nous découvrîmes rapidement les câblages des nouveaux rotors mais l'introduction de ces derniers fit passer le nombre des possibles successions de rotors de 6 à 60, décuplant ainsi la quantité de travail à fournir pour découvrir les clefs [de cryptage]. Le changement n'était donc pas qualitatif mais quantitatif. Nous nous trouvions dans l'obligation d'augmenter sensiblement les effectifs pour faire fonctionner les bombes, produire les fiches perforées (60 séries comportant chacune 26 fiches perforées étaient à présent nécessaires, tandis que jusqu'à la rencontre du 25 juillet 1939, nous ne disposions que de deux d'entre elles), et manipuler ces dernières* ».

16 août 1939 le Général Stuart Menzies, chef du *British Secret Intelligence Service*, reçut un exemplaire de l'Enigma polonaise. A compter de cet instant les britanniques disposèrent donc de la capacité de briser les protections cryptologiques qui garantissaient la confidentialité du trafic informationnel nazi.

Le 3 septembre 1939, suite à l'invasion de la Pologne par les troupes de la Wehrmacht, la France et la Grande-Bretagne déclarèrent la guerre à l'Allemagne. Au lendemain de cet évènement, Alan M. Turing boucla ses bagages et s'en fut rejoindre le nouveau quartier général de la *British Government Code and Cipher School* (GC&CS). Afin de le soustraire aux intentions d'individus possiblement malveillants ainsi qu'à la menace des raids aériens qui tôt ou tard, on le savait, ne manqueraient pas de frapper la capitale anglaise, les autorités britanniques avaient prit la décision de transférer ce centre de cryptographie hautement stratégique autrefois installé dans la ville de Londres à Bletchley Park⁹⁸³. C'est dans cet endroit typique situé non loin de la petite ville de Bletchley, dans le Buckinghamshire, que Turing et quelques dizaines de collègues mathématiciens, linguistes, joueurs d'échecs ou cruciverbistes écrivirent certaines des pages les plus importantes, mais aussi les plus secrètes, de la deuxième guerre mondiale. Pour les besoins de notre propos il nous suffira simplement de rappeler ici que ce sont pour une large part les idées et les réalisations d'Alan M. Turing et de son confrère mathématicien William G. Welchman qui, à partir du mois de mars 1940, permirent aux alliés de décoder un nombre toujours grandissant de messages ennemis cryptés au moyen de l'une ou l'autre des différentes variantes du code militaire Enigma. Héritières directes – quoique perfectionnées - des machines électromécaniques mises au point avant-guerre par les spécialistes polonais du déchiffrement, les 211 bombes de Turing-Welchman construites entre 1940 et 1945 par la *British Tabulating Machine Company*⁹⁸⁴ jouèrent comme on le sait aujourd'hui un rôle plus que décisif dans la reconquête par les alliés de la suprématie militaire sur la plupart des théâtres d'engagement, à commencer bien sûr par l'océan Atlantique et sa partie septentrionale. La sécurisation et le contrôle de cette vaste zone rendue excessivement dangereuse par les patrouilles incessantes de nombreux sous-marins de la *Kriegsmarine* représentaient un impératif stratégique absolu pour les alliés. Cependant la mobilité, la discrétion et l'efficacité extrêmes des sous-marins nazis rendaient cette double entreprise tout particulièrement ardue. La presque totale incapacité dans laquelle se trouvaient

⁹⁸³ Géographiquement Bletchley Park se trouve à environ quatre-vingt kilomètres au nord-ouest de Londres.

⁹⁸⁴ Rappelons que par le biais d'accords commerciaux datant de 1908, la *British Tabulating Machine Company of London* se vit accorder par la *Tabulating Machine Company* – la future I.B.M. - une licence exclusive pour commercialiser ses machines à cartes perforées en Grande-Bretagne et dans tout l'Empire Britannique. Les bombes fabriquées par la B.T.M. pour la *British Government Code and Cipher School* étaient connues au sein de cette entreprise sous les noms de code *Cantab* et 6/6502.

en vérité les marines et les aviations de l'Alliance de lutter efficacement contre les attaques coordonnées lancées par les « meutes de loups » des profondeurs sur les convois de ravitaillement navigant depuis les U.S.A. vers l'Angleterre coûtait chaque jour plus cher à celles-ci, que ce soit en tonnes de matériel ou bien en vies humaines. Entre le mois de septembre 1939 et celui de décembre 1940, ce ne furent pas moins de 585 bâtiments marchands qui furent ainsi envoyés par le fond à cause de l'action imparable et dévastatrice des groupes d'U-boats⁹⁸⁵. Une des raisons majeures permettant de rendre compte de l'impressionnante efficacité militaire de ces vecteurs sous-marins était l'impénétrabilité du système de cryptage spécial qu'ils employaient pour communiquer entre eux – afin de déclarer le positionnement d'une cible et d'organiser ensuite l'attaque collective destinée à la neutraliser - ou avec leurs états-majors.

Initialement basée sur la version de la machine Enigma employée par la *Luftwaffe* et la *Wehrmacht* (modèle M3) mais au final équipée d'un jeu de huit rotors permutables (modèle M4), l'Enigma Navale commença à être utilisée régulièrement par la marine militaire allemande à partir du premier jour du mois de mai 1937. Au début du conflit, il était de l'avis de nombreux spécialistes en cryptographie que le niveau de sécurité donné aux messages grâce au chiffre *Dolphin* – le nom de code qui fut donné à l'un des principaux systèmes de chiffrement de l'Enigma Navale par les gens de la *GC&CS* - était tellement élevé qu'il ne pourrait pas être brisé. Parvenir à réussir cette prouesse cryptanalytique relevait pourtant d'un intérêt plus que vital. Percer à jour les secrets de *Dolphin* revenait en effet 1°) à pouvoir localiser les U-boats avant qu'ils ne se regroupent pour attaquer les convois de vaisseaux ravitailleurs; 2°) à connaître les détails de leurs mouvements d'approche et ceux de leur tactique d'assaut; et 3°) à se trouver véritablement en position d'échapper aux assaillants, voire de faire face et d'annihiler ces derniers grâce à la capacité d'anticipation conférée par la pleine possession d'une information considérée comme normalement inviolable par l'ennemi.

L'invulnérabilité (supposée et finalement surestimée) de l'Enigma Navale reposait essentiellement sur le fait que son protocole d'encryptage impliquait la réalisation non pas d'une mais de deux procédures de chiffrement distinctes et additionnelles. L'une d'entre elles réclamait comme de bien entendu l'utilisation d'une machine Enigma tandis que l'autre s'appuyait sur l'emploi de tables alphabétiques périodiquement renouvelées⁹⁸⁶ et manipulées par un opérateur humain. Ces matrices d'encryptage permettaient d'opérer des substitutions par paires sur les caractères composant les messages à encoder. Les marins et les sous-

⁹⁸⁵ Contre un tout petit peu plus de 200 coulés par les appareils de la *Luftwaffe*.

⁹⁸⁶ Les *bigram tables* en anglais.

mariniers allemands disposaient de neuf tables de ce genre, chacune offrant individuellement quelques 676 options de substitution... Pour les utiliser convenablement - c'est-à-dire quand et comment il le fallait – ils se référaient en outre systématiquement à des livrets réglementaires eux aussi mis à jour de temps à autre et comprenant toutes les informations de sécurité nécessaires à l'usage conforme du système. En 1940, Alan M. Turing reçut pour mission de mettre en place et de diriger la *Hut Eight* (Hutte 8). Même si le mathématicien n'en assumait pas le commandement pendant toute la durée du conflit, les activités de ce département spécial de la *Government Code and Cipher School* ne cessèrent jamais d'être entièrement dédiées au décryptage du, ou plutôt des divers chiffres Enigma que la *Kriegsmarine* mettait en œuvre dans tel ou tel océan ou mer du globe⁹⁸⁷. Le rôle tenu par Turing dans la lutte victorieuse contre les machines à chiffrer allemandes fut assurément décisif et ses contributions théoriques et pratiques à la fois nombreuses et capitales. Outre le fait déjà mentionné qu'il conçut une version améliorée de la bombe cryptologique polonaise (laquelle put par ailleurs être encore perfectionnée grâce aux idées de G. Welchman), le logicien développa une technique d'attaque cryptanalytique reposant sur des méthodes probabilistes et d'inférence bayésienne. Il lui donna le nom assez inhabituel de *Banburismus*. De portée générale, cette méthode statistique impliquait l'évaluation d'un poids de preuve ou d'évidence – le « *ban* » - notion fort proche de la mesure de l'information développée sensiblement à la même période par le père de la future théorie éponyme, Claude Shannon. La technique du *Banburismus*, pour le coup amendée et rebaptisée *Turingismus*, fut également employée à la GC&CS afin de casser le chiffre *Tunny*, selon l'appellation que les britanniques avaient donné aux signaux ennemis protégés avec les systèmes *Fish*⁹⁸⁸. En juin 1941, la Hutte 8 commença à décrypter le chiffre *Dolphin* sur une base régulière. Mais le succès des anglais, s'il fut spectaculaire et payant, ne dura malheureusement pas. Le 1^{er} février 1942 une nouvelle Enigma dotée d'un protocole de cryptage inédit et d'un emplacement supplémentaire pour recevoir un rotor entra en service dans la *Kriegsmarine*. L'introduction de l'Enigma M4 marqua la fin de l'efficacité des bombes électromécaniques de la GC&CS et les alliés se retrouvèrent à nouveau aveugles face à une flotte sous-marine adverse forte de plus de 150 unités.

⁹⁸⁷ *Heimisch Gewässe*, ou *Dolphin*, n'était en effet pas le seul système d'encryptage utilisé par la marine de guerre nazie pendant la guerre. Si *Süüd*, *Medusa* et *Triton*, des chiffres essentiellement employés en Méditerranée, ne posèrent guère de problèmes aux alliés, ces derniers ne furent en revanche jamais capables de briser *Ausserheimische Gewässe*, *Thetis*, ou *Neptun*.

⁹⁸⁸ *Fish* était le nom de code attribué par les anglais aux machines allemandes de cryptage Lorenz SZ 40 et SZ 42.

Le 6 novembre 1942, Turing quitta l'Angleterre à bord du Queen Elisabeth pour gagner le sol nord-américain (et ce non sans avoir auparavant cédé le commandement de la Hutte 8 au mathématicien et joueur d'échecs Hugh Alexander). L'épuisement graduel des ressources du Royaume-Uni, mais aussi, en cette période de grave crise navale, la nécessité politico stratégique⁹⁸⁹ d'un renforcement de la collaboration entre les deux nations anglo-saxonnes concernant le partage du renseignement et de ses techniques, conduisirent les autorités militaires anglaises à accepter que leurs alliés américains produisent désormais un nombre important de bombes pour le compte des deux parties. A. M. Turing devait assurer à partir de là, et pour une durée de 4 mois, le rôle d'agent de liaison et de conseiller scientifique et technique de haut niveau entre la Grande-Bretagne et les Etats-Unis. Là-bas les missions du mathématicien consistèrent tout d'abord à assurer le transfert aux services et groupes militaro-industriels compétents en la matière l'ensemble du savoir-faire britannique touchant aux méthodes et équipements de déchiffrement des dispositifs Enigma⁹⁹⁰. Il dut ensuite se charger d'examiner de façon détaillée un tout nouveau dispositif d'encodage et de transmission de la parole fabriqué par le *War Department* des *Bell Telephone Laboratories*. Destiné à sécuriser les communications vocales transatlantiques de haut niveau en les cryptant – F. Roosevelt, W. Churchill et le Général D. MacArthur devaient figurer au nombre de ses principaux utilisateurs - le système ultrasecret SIGSALY⁹⁹¹ fut pour la première fois déployé en 1943. Un des exemplaires du terminal SYGSALY devant être expédié puis installé à Londres afin de permettre au Premier Ministre anglais et au Président américain de converser l'un avec l'autre en toute sécurité, l'appréciation d'un expert britannique chargé non seulement

⁹⁸⁹ Un désaccord sérieux survint en 1942 entre les anglais et les américains quant aux efforts fournis par les premiers – et plus particulièrement la *Government Code and Cipher School* - en matière de décryptage des chiffres nazis. Les personnes en charge du *Communications Supplementary Activity – Washington* (division équivalente à la GC&CS, aussi appelée C.S.A.W. ou OP-20-G), décidèrent alors de court-circuiter les britanniques. Au mois de septembre 1942, ils annoncèrent qu'ils étaient en train de fabriquer une bombe électromécanique plus puissante que celle utilisée à Bletchley Park, ajoutant qu'à la fin de la même année, ils disposeraient de 360 dispositifs de ce type. Un arrangement put au final être défini qui satisfaisait les deux parties en présence. Sur fond de partage intégral de l'information sensible, les américains devaient se charger de la fabrication d'une centaine de ces nouvelles bombes. Quant aux britanniques, ils conserveraient la pleine maîtrise du projet et auraient à assurer sa conduite. En raison de son rôle déterminant à Bletchley Park, de son excellente connaissance et de sa compréhension profonde des questions théoriques et pratiques de la cryptologie, c'est Alan M. Turing que les anglais envoyèrent aux Etats-Unis afin de superviser et de coordonner la nouvelle entreprise anglo-américaine.

⁹⁹⁰ A cette fin Turing contrôla l'usine *National Cash Register* de la ville de Dayton, dans l'Ohio, site où étaient produites les bombes américaines. A la fin du mois de décembre 1942, il rédigea un document récapitulatif des détails de cette inspection. Intitulé « Visit To National Cash Register Corporation of Dayton, Ohio », il comporte neuf pages, chacune portant la mention *Secret* (à présent biffée). Il est possible de consulter un fac-similé digital de ce rapport en se rendant à l'adresse suivante: www.turing.org.uk/turing/scrapbook/dayton/pages123.html.

⁹⁹¹ Le SIGSALY – cette dénomination n'étant en rien un acronyme - était encore connu sous d'autres désignations : *X System*, *Project X*, *Ciphony I* et *Green Hornet* (nom donné au prototype). Le SIGSALY était en fait partiellement dérivé du *Vocodeur*, un dispositif de transmission de la voix de haute technologie conçu aux *Bell Labs*. dans les années trente et breveté par un ingénieur de la firme en 1935.

d'évaluer les propriétés techniques dudit matériel mais aussi de gérer les différents aspects logistiques, militaires et diplomatiques de son utilisation – chacun voulant évidemment tout contrôler - s'imposait ici comme quelque chose d'absolument indispensable. Son étude du brouilleur de voix digital SYGSALY amena Turing à côtoyer les plus illustres chercheurs des *Bell Laboratories*, parmi lesquels le mathématicien et électronicien Claude E. Shannon et le physicien Harry Nyquist. Au contact des deux scientifiques il eut notamment l'opportunité d'approfondir sa connaissance du théorème d'échantillonnage qui porte leur nom. Il en alla d'ailleurs de même concernant l'emploi des technologies liées aux applications de pointe que l'on concevait alors sur la base de ce théorème (à commencer bien évidemment par l'électronique). Pendant les quelques mois que dura son séjour aux *Bell Labs.*, il eut aussi très fréquemment l'occasion de discuter de la question de la fabrication de « cerveaux artificiels » avec Claude E. Shannon. On sait parfaitement l'importance que ce thème de recherche revêtit par la suite pour les deux hommes...

Si le système SIGSALY semblait satisfaire ses concepteurs quant au niveau de sécurité qu'il permettait de conférer aux messages transmis et reçus par son entremise, l'inspection détaillée que Turing eut le loisir d'en faire le conduisit à formuler officiellement un certain nombre de réserves à propos de sa sûreté effective. Fort de cette constatation, le mathématicien alla jusqu'à proposer aux ingénieurs américains que certaines modifications soient apportées au dispositif dans le but d'augmenter sa fiabilité avant qu'on ne commence à l'utiliser. Un terminal SIGSALY fut en définitive expédié en Angleterre par voie maritime puis placé en service dans les sous-sols du *Selfridges Department Store*, un grand magasin sis sur *Oxford Street*. On s'étonnera peut-être de ce que cette machine à brouiller les conversations pourtant destinée en priorité à Winston Churchill n'ait pas été directement installée dans l'une ou l'autre des différentes pièces souterraines que comptait son *Cabinet War Rooms*, lequel se trouvait lui aussi situé en plein cœur de Londres, sur *King Charles Street*. En vérité les dimensions du SIGSALY étaient telles qu'il n'avait pas été possible de le faire. Cet instrument pesait en effet 55 tonnes⁹⁹² et comprenait, outre un encombrant mais efficace circuit de refroidissement, une quarantaine d'armoires métalliques garnies d'une multitude de composants électriques et électroniques. En outre, et à l'instar du monumental calculateur électronique construit à peu près à la même période à la *Moore School of*

⁹⁹² C'est-à-dire à titre indicatif 25 tonnes de plus que l'E.N.I.A.C.

Electrical Engineering, la mise en marche et le maintien en état de fonctionnement⁹⁹³ du SIGSALY exigeait la présence de nombreux opérateurs (environ une trentaine de personnes). S'il existait bel et bien une *Transatlantic Telephone Room* dans le cabinet de guerre souterrain de Churchill, il ne s'agissait par conséquent que d'une simple ligne terminale, d'une sorte de combiné téléphonique si l'on préfère, reliée par un moyen filaire à l'appareil de brouillage proprement dit⁹⁹⁴.

Lorsque le 23 mars 1943 Turing s'embarqua sur le *Empress of Scotland* pour retourner en Grande-Bretagne, la situation des alliés en Atlantique et en Manche était nettement plus favorable qu'elle ne l'était lors de son voyage aller. Américains et anglais se trouvaient en effet à nouveau en position de décrypter régulièrement les codes Enigma de la *Kriegsmarine*. Ceci avait été rendu possible par les percées réalisées en matière d'analyse cryptologique, mais aussi par les erreurs de cryptage grossières qu'avaient de temps à autre commises les opérateurs allemands. On ajoutera également à cela la capture consécutive de trois U-boats entre les mois de mai 1941 et le mois d'octobre 1942⁹⁹⁵. Deux de ces sous-marins abandonnés précipitamment par leurs équipages paniqués possédaient en effet encore à leur bord leur machine et leurs carnets d'encodages journaliers. Pendant les huit jours que dura sa traversée de l'océan sur l'*Empress of Scotland*, Turing étudia un manuel consacré à la technologie électronique en même temps qu'il réfléchit à une nouvelle façon de crypter les conversations distantes. De retour à Bletchley Park, Turing n'eut plus de responsabilités directes dans le domaine du décryptage. Bien que n'étant pas rattaché à un projet ou à une « hutte » spécifiques, il se voyait néanmoins très fréquemment sollicité par les différentes équipes du grand centre de déchiffrement britannique. Son rôle était désormais celui d'un consultant général, aussi talentueux et imaginatif que chevronné.

Au cours de la période qui suivit immédiatement son retour des Etats-Unis, on sait que le mathématicien se lia d'amitié avec une future grande figure du domaine de l'intelligence artificielle⁹⁹⁶, Donald Michie. Avec le jeune diplômé en sciences biologiques Turing joua aux échecs, évoquant au passage les machines qui auraient le pouvoir de s'adonner à ce jeu. Dans

⁹⁹³ Tout comme l'E.N.I.A.C. et les autres gigantesques machines à lampes électroniques construites à cette époque (ou un peu après), la phase de mise en opération était délicate. Etablir une communication transatlantique réclamait environ 55 minutes.

⁹⁹⁴ Le même type d'aménagement distribué fut mis en œuvre aux Etats-Unis. Un terminal SIGSALY fut placé à la Maison Blanche, un autre dans les locaux du bâtiment abritant le Département de la Marine. Quant au cœur du système, on l'installa au Pentagone.

⁹⁹⁵ Il s'agissait des sous-marins U-110, U-570 et U-559. Un quatrième bâtiment allemand fut capturé en juin 1944. Quant au U-571, dont l'histoire fut récemment « mise à l'honneur » par Hollywood, il a été coulé à la fin janvier 1944 par un appareil australien de lutte anti sous-marine, dans l'Atlantique Nord.

⁹⁹⁶ Auteur de plusieurs ouvrages de référence dans le secteur de l'intelligence artificielle, D. Michie a fondé le *Department of Machine Intelligence and Perception* de l'Université d'Edinburgh.

une perspective toute aussi empreinte d'opérationnalisme que de matérialisme et d'athéisme inexprimés, il parla également avec lui de la mécanisation de la pensée et de la possibilité de machines non spécialisées qui, sur la base de règles générales, seraient capables d'apprendre de leur expérience. La chose on le voit préfigure de façon tout à fait claire les approches heuristiques qui seraient mises en œuvre des années plus tard dans telle ou telle sous division – les jeux à espace d'états fini informatisés ou les systèmes experts par exemple – du vaste domaine de l'intelligence artificielle. Mais Donald Michie n'était pas seulement l'ami et l'interlocuteur privilégié d'Alan M. Turing. A la « *Newmanry* », division spéciale de la GC&CH fondée en 1942 et chargée en particulier du décryptage du trafic chiffré avec *Fish*, il était aussi et surtout le premier assistant⁹⁹⁷ du mathématicien Max H. A. Newman – d'où l'étrange appellation de cette section - pour les questions de cryptanalyse. Il nous a été donné de voir précédemment que Max H.A. Newman était un partisan convaincu de la nécessité d'accroître l'automatisation des procédures de décryptage. Il pensait par ailleurs qu'ici la technologie électronique, du fait même des vitesses d'opération très élevées la caractérisant, permettrait d'obtenir des résultats concluants. Au printemps 1943, les idées de M. H. A. Newman prirent corps et les machines de la série *Robinson* commencèrent à se succéder dans la Hutte F. Au début du mois de décembre 1943, elles furent remplacées par le premier exemplaire du *Colossus*, une machine à décrypter que nous avons déjà longuement évoquée et dont le caractère innovant tenait pour l'essentiel à une idée qu'avait eue Tommy Flowers. Cette idée, rappelons-le, consistait à enregistrer les diverses clefs du code allemand non plus sous une forme matérielle, mais sous une forme électronique.

Contrairement à une idée parfois admise, Alan M. Turing ne prit une part directe ni à la conception ni à la fabrication des *Robinsons*. Du reste, il ne se trouva pas davantage impliqué dans celles du *Colossus*⁹⁹⁸. Ce qui est juste en revanche, c'est que certaines de ses idées et de ses innovations théoriques – et tout spécialement la méthode probabilitaire qu'il avait mise au point afin de briser les chiffres *Enigma* – furent reprises par les gens de la « *Newmanry* » dans le cadre de leur travail sur *Fish*. Dans tous les cas – ne serait-ce que par sa fréquentation de Michie qui ne manquait pas de le renseigner au cours de leurs nombreuses conversations - Turing était parfaitement au fait de ce qui se passait dans la Hutte F, et lorsqu'on lui proposa de venir se joindre au groupe de recherches dirigé par Newman, il

⁹⁹⁷ Le second assistant était ici I. J. Good.

⁹⁹⁸ Chose souvent omise: les *Robinsons* et les *Colossi* n'avaient pas été construites pour casser les chiffres d'*Enigma*. Or l'essentiel du travail de Turing à la GC&CS porta précisément sur la déconstruction des procédures d'encryptage des messages réalisées au moyen de la machine imaginée en 1923 par le Dr Arthur Scherbius.

refusa. A la fin de l'année 1943, l'évolution plutôt favorable du cours de la guerre permit au mathématicien de consacrer un peu plus de temps aux projets qui lui tenaient à cœur. D'une part il s'agissait pour lui d'entreprendre la réalisation d'une machine à encrypter les communications radio. Dans le cadre de sa mission aux Etats-Unis, il avait inspecté en détail les brouilleurs américains et avait ainsi pu acquérir les connaissances et les compétences techniques nécessaires à cela. D'autre part il entendait également réfléchir de façon plus sérieuse à la possibilité d'un cerveau artificiel. A partir de septembre 1943, Turing commença à se rendre ponctuellement à la station d'Hanslope Park, un site distant d'une quinzaine de kilomètres de Bletchley Park, où avait été installée l'Unité de Communication Spéciale n°3, une division du *British Security Service*⁹⁹⁹ chargée de l'interception des transmissions radio ennemies émises depuis n'importe quel point du globe. Là, jusqu'à la fin de la guerre, il se consacra avec une équipe réduite à l'élaboration du brouilleur - ce dispositif reçut le nom de *Dalila* - au sujet duquel il avait eu ses premières idées sur l'*Empress of Scotland*. Le système *Dalila* fut achevé à la toute fin de la guerre et s'il ne connut guère de succès auprès des instances officielles qu'il était au départ susceptible d'intéresser¹⁰⁰⁰, il autorisa malgré tout le logicien du King's College à renforcer sa compréhension et sa maîtrise de la technologie électronique. Sa fréquentation assidue du centre d'écoute et de détection d'Hanslope permit aussi à Turing d'en apprendre davantage sur la technologie du radar et sur les lignes retard acoustiques. Entre-temps, à Bletchley Park, le travail de développement réalisé autour du *Colossus* n'avait pas vraiment faibli. Donald Michie et Irving J. Good s'étaient en effet rendu compte qu'il était possible d'intervenir sur la configuration du système de décryptage alors même que celui-ci était en train de fonctionner. De cette façon, il devenait alors possible de lui faire exécuter des tâches qui, en raison de leur caractère relativement élaboré, n'avaient pu être confiées jusque-là qu'à des opérateurs humains. Une évolution du *Colossus* - le Mark II - exploitant précisément cette intéressante propriété put dès lors être définie et fabriquée dans d'assez brefs délais par les ingénieurs anglais. Certes la seconde version de la machine créée par Tommy Flowers n'était pas un ordinateur, mais il n'en reste pas moins que celle-ci était déjà pourvue d'un petit répertoire d'instructions autorisant une flexibilité - notamment pour tout ce qui regardait les branchements conditionnels - encore jamais atteinte dans le domaine des automates électroniques. A ce stade bien entendu aucune machine universelle n'avait

⁹⁹⁹ Encore appelé MI5, il s'agit du service de contre-espionnage britannique, lequel a pour mission de garantir la sécurité de la Grande-Bretagne.

¹⁰⁰⁰ En effet la deuxième guerre mondiale s'achevait et, outre le fait que la Grande-Bretagne disposait déjà du système américain SIGSALY, le développement d'un nouvel instrument de brouillage avait débuté au *General Post Office*.

encore été construite dans le monde mais le rêve que caressait depuis plusieurs années maintenant Alan M. Turing, rêve qui consistait comme nous le savons à concevoir un jour un « cerveau artificiel », commençait graduellement à devenir une réalité tangible.

Plus haut nous laissions entendre que l'*Automatic Computing Engine* était très certainement l'ordinateur le plus prometteur parmi les premiers dispositifs qui apparurent au commencement de l'ère informatique. Lorsque nous employons le terme « prometteur » nous voulons signifier que, tant du point de vue architectural que du point de vue technologique, la machine du *National Physical Laboratory* - ou plutôt la machine du N.P.L. telle que l'avait initialement pensée Turing – était un dispositif singulièrement original. De fait, et comme nous allons le voir à présent, il se démarquait nettement des différents systèmes construits au même moment et qui respectaient les grands principes fixés par John von Neumann dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*.

Saisir pleinement le caractère prometteur de l'A.C.E., et donc cette originalité que nous venons d'évoquer, implique que nous procédions maintenant à une brève récapitulation des idées conçues et des travaux accomplis par A. M. Turing avant et pendant la deuxième guerre mondiale :

- Rédacteur de l'article « On computable numbers, with an application to the *Entscheidungsproblem* », Turing était à l'origine du concept logico-mathématique de machine universelle. En d'autres termes il avait engendré, en 1936, l'archétype conceptuel de l'ordinateur.
- Son expérience de cryptographe et de consultant de tout premier ordre en mathématiques et machineries électromécaniques et électroniques (bombes, SIGSALY, Dalila), au cours de la guerre, lui avait permis de prendre conscience de trois choses absolument essentielles pour la suite :

1°) L'électronique était une technologie offrant conjointement fiabilité et haute vitesse. Elle constituait par conséquent un medium tout à fait indiqué dans la perspective de la fabrication d'un « cerveau électronique » (l'existence des trois systèmes précités, mais aussi celle du *Colossus*, en constituaient l'indéniable preuve).

2°) A condition que cela s'avère réalisable sur le plan technologique il était hautement préférable de concevoir une seule machine au pouvoir générique, c'est-à-dire une machine unique qui puisse être paramétrée (programmée) pour accomplir un certain nombre de tâches différentes (toutes exprimables sous la forme de procédures effectives, donc programmables) en fonction des besoins courants, plutôt que de construire à chaque fois une machine de puissance limitée, spécialement destinée à exécuter une fonction spécifique.

3°) Lorsqu'un problème donné se présentait, mieux valait s'efforcer de le résoudre par les moyens de la pensée, de la logique, que par des moyens matériels (ainsi que les américains avaient tendance à le faire, selon Turing).

La guerre étant sur le point de se terminer complètement, et après une brève mission en terre allemande où il prit part à une commission d'évaluation sur l'état des recherches ennemies dans le secteur des communications, Turing réintégra momentanément ses fonctions académiques au King's College. Dans le même temps, des événements d'une extrême importance étaient en train de se produire aux Etats-Unis. Au cours des mois de mars et d'avril 1945 les membres le plus influents de l'équipe de l'E.N.I.A.C. avaient ainsi entrepris la rédaction du *First Draft of A Report on the EDVAC*, un texte fondateur qui, après avoir été signé de la seule main de John von Neumann, serait appelé à faire rapidement le tour de la planète et à exercer une influence considérable sur tous ceux – ou presque - qui entendaient désormais entreprendre la fabrication d'un ordinateur. Si von Neumann devait effectivement mentionner le résultat central du travail de logicien de Turing dans *La théorie générale et logique des automates*¹⁰⁰¹ et *L'ordinateur et le cerveau*¹⁰⁰² - des textes parus pour la première fois en 1951 et 1958 - il n'y fit en revanche aucune espèce d'allusion directe dans le *First Draft*. Il est vrai aussi qu'il n'était pas le seul et unique rédacteur du célèbre brouillon. Comme il a déjà été précisé plus haut, von Neumann, possédait une excellente connaissance des idées contenues dans le « Sur les nombres calculables... » de Turing. Dans l'ouvrage tout à fait remarquable qu'il a consacré en 2004 à l'oeuvre et à la vie du scientifique britannique,

¹⁰⁰¹ In [Von Neumann, 1951], « La théorie des automates de calcul de Turing », « Principal résultat de la théorie de Turing » et « Elargissement du programme aux automates qui produisent des automates », pp.96-99 dans l'édition française de ce texte.

¹⁰⁰² In [Von Neumann, 1958], « La fonction d'un code court », p. 73.

Jack B. Copeland a produit deux témoignages d'acteurs clefs de cette époque, lesquels attestent l'un et l'autre de ce fait. D'abord celui de Stanley P. Frankel, physicien de Los Alamos qui, avec le savant d'origine hongroise et d'autres personnes encore, était notamment responsable de la mécanisation des multiples calculs devant être effectués dans le cadre du projet Manhattan. Dans une lettre datée de 1972 et adressée à Brian Randell, Professeur émérite à l'Université de Newcastle, S. P. Frankel avait ainsi affirmé la chose suivante :

« Je sais qu'en 43 ou 44, von Neumann était tout à fait conscient de l'importance fondamentale de l'article « Sur les nombres calculables » écrit par Turing en 1936, et qui décrit en principe « la machine universelle » dont chaque ordinateur moderne (...) constitue une réalisation. Von Neumann me fit découvrir ce papier et insista pour je le lise avec soin...¹⁰⁰³ ».

Le second témoignage émane de Julian Bigelow, coauteur en janvier 1943 (avec Norbert Wiener et Arturo Rosenblueth), de l'article fondateur de la cybernétique, « Behavior, Purpose and Teleology », mais aussi, et c'est sans nul doute là un fait un peu moins connu, ingénieur en chef sur le projet d'ordinateur initié par von Neumann en 1946 à l'*Institute for Advanced Study* :

« La personne qui a réellement... poussé en avant le domaine était von Neumann, car il comprenait logiquement ce que [le concept de programme enregistré] signifiait d'une façon bien plus profonde que n'importe qui d'autre. La raison pour laquelle il en était ainsi était que, parmi d'autres choses, il saisissait toute la logique mathématique que cette idée due au travail d'Alan. M. Turing...en 1936-1937... sous-entendait. Quant on la considère aujourd'hui la machine [universelle] de Turing ne ressemble pas beaucoup à un ordinateur moderne, et pourtant c'en était un... Elle était l'idée germinale...Aussi von Neumann vit-il ... que [l'ENIAC] ne constituait que la première étape, et qu'une grande amélioration allait se produire...¹⁰⁰⁴ ».

Comme on peut le constater ces deux déclarations ne laissent planer aucune espèce de doute quant au fait que von Neumann avait parfaitement conscience de l'immense valeur

¹⁰⁰³ Lettre de Stanley P. Frankel à Brian Randell, 1972, cité in [Copeland, 2004], p.22. La traduction est notre.

¹⁰⁰⁴ Interview de Julian Bigelow réalisée par la *Smithsonian Institution* en 1972 et partiellement retranscrite in [Copeland, 2004], p.23.

théorique de la machine universelle de Turing. Nul doute qu'il avait aussi pleinement saisi toute l'étendue de sa portée pratique. Même s'il n'est pas fait ouvertement mention de la M.U.T. dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*, il n'en demeure pas moins que celle-ci inspire et traverse littéralement tout le texte du mathématicien de Princeton. D'une manière il est vrai détournée, indirecte, comme affleurante ou en filigrane, on peut la rencontrer sous deux formes différentes dans le célèbre brouillon. Ainsi la *mémoire* que von Neumann destine dans son rapport à supporter indifféremment données et instructions du programme n'est-elle qu'une autre façon de nommer et de représenter le ruban de longueur idéalement infinie de la machine universelle de Turing. Bien que la mémoire d'un ordinateur puisse effectivement se voir réalisée de bien des manières possibles – toutes évidemment dépendantes des technologies disponibles à un moment donné ou un autre de l'histoire – celle-ci ne constitue en définitive qu'une instantiation, qu'une précipitation dans le champ de la matérialité, d'un concept ici absolument essentiel et donc supérieur : celui de M.U.T. D'autre part, et c'est là la seconde façon dont l'idée fondatrice de Turing se trouvait indirectement représentée dans le *First Draft* - von Neumann convoquant les travaux de W. S. McCulloch et W. Pitts afin d'établir un rapprochement entre ordinateur et système nerveux sur le mode de l'analogie - on sait que les auteurs de « A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity » avaient lu « Sur les nombres calculables... » et démontré que leurs réseaux de neurones formels étaient équivalents à une machine de Turing à mémoire finie¹⁰⁰⁵.

Si l'on doit à présent établir un premier constat ou état des lieux avant se pencher plus proprement sur la genèse de l'*Automatic Computing Engine*, alors il sera le suivant. Turing et von Neumann s'étaient rencontrés et fréquentés à l'Université de Princeton avant la guerre ; ils connaissaient leurs travaux respectifs et éprouvaient également du respect l'un pour l'autre. Par ailleurs, et en dépit de personnalités aussi brillantes qu'elles pouvaient être socialement contradictoires, leurs trajectoires et leurs aspirations professionnelles, leurs accomplissements pendant la guerre et leurs centres d'intérêts théoriques mutuels se recoupaient en de nombreux points. Mais il existait aussi des différences tout à fait notables entre les deux hommes. Ainsi von Neumann était en quelque sorte inscrit dans le monde et prenait activement part, de bien des manières, à sa marche, alors que Turing lui paraissait toujours en retrait des choses, comme distant ou curieusement décalé (ce que ne démentaient jamais ni sa tenue vestimentaire, ni son comportement en public). Ensuite, et pour ce qui concernait au moins

¹⁰⁰⁵ Les réseaux de neurones formels de McCulloch et Pitts sont Turing-complets – c'est-à-dire qu'ils peuvent calculer toutes les fonctions calculables par une M.U.T. (ou émuler une M.U.T., cela revient au même ici) – à condition qu'ils disposent de suffisamment de mémoire. Dans le cas contraire ils sont mathématiquement équivalents à des automates finis, autrement dit à des machines de Turing disposant d'une mémoire limitée.

son projet de construire un « cerveau artificiel », le savant britannique avait toujours travaillé en solitaire ou presque, poursuivant avec des moyens matériels très limités et la force de sa seule volonté ce rêve qui l'habitait voire l'obsédait depuis tellement d'années. A l'inverse von Neumann avait travaillé avec tous les moyens humains, financiers et matériels que l'on sait sur le système militaro scientifique E.N.I.A.C. - premier et unique grand calculateur digital électronique de la planète — lequel, contrairement aux bombes et aux autres systèmes cryptologiques à tubes conçus à Bletchley Park ou à Hanslope, finit par quitter la zone ténébreuse du secret militaire pour être présenté avec ses concepteurs au grand public, une fois la guerre achevée. Les choses se passèrent très différemment pour les personnels impliqués dans les activités de renseignement de la *Government Code and Cipher School* au cours de cette période tragique. Sous peine d'emprisonnement, voire de mort, ils se virent astreints par le gouvernement anglais à observer le silence le plus strict sur tout ce qu'ils avaient pu faire ou voir en ce lieu pendant la guerre. La levée du secret militaire concernant Bletchley Park s'amorça vers le milieu des années 1970 mais à ce moment, comme on le sait, la vérité pouvait bien émerger ou éclater, on pouvait bien vouloir rendre à qui on voulait ce qui lui revenait de droit et célébrer tous les figures héroïques de l'ombre et des nombres, il était de toute façon trop tard pour A. M. Turing.

Alors que dans la perspective de la construction de l'E.D.V.A.C. von Neumann devait procéder à la rédaction du *First Draft*¹⁰⁰⁶ – un écrit séminal qui, par sa portée théorique et pratique et aussi sa diffusion à l'échelon mondial, allait bientôt imposer comme modèle techno-logique dominant l'architecture informatique type qui porte le nom de son rédacteur - Turing, lui, continuait à œuvrer de façon solitaire, plus directement préoccupé par les questions de logique fondamentale ou encore, disons-le en dépit de l'inélégance de cette expression, de formalisation et de synthétisation de l'intelligence, que par les possibles applications gouvernementales des nouvelles machines électroniques de traitement de l'information. Pour résumer la situation en quelques mots, on peut dire que si Turing avait conçu l'idée de l'automate logico-mathématique universel, von Neumann en avait imaginé une version pratique et avait fait don de cette dernière aux ingénieurs et aux gouvernements du monde entier. Par un retour des choses que nous nous plaisons à nous représenter comme juste ou au moins heureux, l'ordinateur ressurgit dans l'existence de Turing d'une façon relativement inattendue ou détournée. En effet au mois de février 1945 le mathématicien John

¹⁰⁰⁶ En rassemblant d'une manière tout à fait remarquable des concepts décisifs presque tous tirés de travaux de savants issus du Vieux Continent (si l'on pense notamment aux œuvres et/ou aux réalisations de Charles Babbage, d'Ada Lovelace et, évidemment, d'Alan M. Turing).

R. Womersley, qui occupait la tête de la toute nouvelle *Mathematical Division* du N.P.L. depuis la date du 27 septembre 1944, partit en tournée aux Etats-Unis dans le but d'étudier les instruments de calcul digitaux électroniques perfectionnés qui s'y trouvaient en cours ou en attente de développement. Si le *National Physical Laboratory* existait depuis l'année 1900, sa division mathématique était elle de création plus récente. Alors que la fin de la guerre commençait à se profiler, un sentiment partagé quant à la nécessité de fonder au plus vite une structure interdépartementale dédiée à la coordination des techniques et des équipements attachés au calcul assisté par machine s'était fait jour chez nombre de décideurs scientifiques – au rang desquels D .R. Hartree et L. J. Comrie - appartenant à différentes organisations étatiques de premier plan (sans chercher à être exhaustifs, on citera notamment l'Amirauté britannique, le *Ministry of Aircraft Production*, le *War Office*, le *Ministry of Supply*, le *Central Statistical Office* et le *Department of Scientific and Industrial Research*).

Dans un premier temps, la création d'un *National Mathematical Laboratory* (ou *Central Mathematical Station*) fut envisagée mais à cette solution on préféra finalement celle qui consistait à établir un département spécial au sein d'un institut de recherches déjà existant, à savoir le N.P.L. Les missions scientifiques que serait appelée à remplir cette division pour le compte des départements d'état, des grandes industries et des Universités intéressés se virent définies dans un rapport classé confidentiel¹⁰⁰⁷, rédigé dans les premiers jours du mois d'avril 1944.

Il s'agissait donc:

1°) d'entreprendre des recherches dans le champ des nouvelles méthodes et des nouveaux dispositifs de calcul.

2°) d'encourager le développement de ces méthodes et de ces machines et aussi de contribuer à diffuser les connaissances afférentes à ces dernières ainsi qu'aux procédures et instruments existants.

3°) de prendre en charge des difficultés procédant du domaine des sciences statistiques, en particulier en aidant à appliquer des méthodes probabilistes à des problèmes de

¹⁰⁰⁷ *Department of Scientific and Industrial Research*, « Report on a Proposed Central Mathematical Station », 3 avril 1944. Un fac-similé digital de ce document de 11 pages à présent déclassifié peut être consulté au : http://www.alanturing.net/turing_archive/archive/1/169/L69-023.html.

recherche, de développement ou de production dans le secteur industriel, dans les sciences physiques et l'ingénierie ...

4°) de servir d'organisme conseil quant aux besoins en nouvelles tables mathématiques et, éventuellement, préparer (calculer) ces tables.

5°) de fournir des services de calcul aux organisations gouvernementales, aux industries et aux Universités.

6°) d'intervenir en qualité de consultant en techniques mathématiques et statistiques pour le compte des institutions étatiques, des industries et des Universités.

Supposant et anticipant d'un côté la possibilité d'une diminution prochaine de la demande militaire en matière de calculs – il ne faisait en effet plus aucun doute que l'Allemagne nazie serait bientôt battue - et de l'autre l'augmentation non moins probable de celle de la recherche scientifique en général, un deuxième document confidentiel intitulé « Research Program for Maths Division for the Year 1945-1946 » fut produit par le même comité du N.P.L. au mois d'octobre 1944. Il précisait de manière un petit peu plus détaillée le contenu de certaines des missions de recherche¹⁰⁰⁸ qui reviendraient à la *Mathematical Division* une fois celle-ci établie. La rubrique 6502 et ses deux sous parties (items portant respectivement les numéros 6502.1 et 6502.2) comptaient assurément au nombre des objectifs de travail les plus intéressants. Il y était ainsi indiqué qu'on entendait :

6502 : « *Explorer l'application des méthodes de commutation (mécanique, électrique et électronique) à des calculs de toutes sortes* ».

Ce point particulier du programme de travail impliquait quant à lui deux choses¹⁰⁰⁹:

¹⁰⁰⁸ En l'occurrence celles appelées à être vraisemblablement financées par le *Department of Scientific and Industrial Research*. Ce document ne recensait pas les investigations scientifiques dont les financements ressortissaient soit au secteur de la défense, soit à celui de l'industrie.

¹⁰⁰⁹ Dans « A.C.E. Project – Origin and Early History », une note récapitulative d'une page rédigée le 26 novembre 1946 par J. R. Womersley, le Directeur de la Division Mathématiques du N.P.L. écrivait : « 1944 Oct. *J.R.W. prepares research program for Maths. Division which includes an item covering the A.C.E.* ». Il s'agit ici plus que sûrement du sous élément du programme de recherches identifié par le numéro 6502.2. Un fac-similé digital de ce mémorandum est disponible en libre consultation à l'adresse Internet suivante: http://www.alanturing.net/ace_early_history/. Remarquons en outre que cette note est citée dans son intégralité dans [Copeland, 2004], pp. 363-364, et en partie dans [Hodges, 1988], p. 260.

6502.1 : « la conduite d'une étude au sujet de la possible adaptation d'équipement téléphonique automatique au calcul scientifique ».

6502.2 : « le développement d'un dispositif électronique permettant l'exécution rapide de calculs ».

C'est avec ces objectifs en tête que J. R. Womersley, lequel, précisons-le avant de poursuivre notre propos, avait pris connaissance de l'article de Turing sur les nombres calculables avant que la guerre n'éclate, fut envoyé en mission d'étude aux Etats-Unis du mois de février au mois de mai 1945 par le Directeur du N.P.L.¹⁰¹⁰. Lors de son périple outre-atlantique, l'occasion fut offerte à Womersley d'examiner en détail l'I.B.M. *Automatic Sequence Controlled Calculator* d'Howard H. Aiken. En voyant cette dernière machine, à Harvard, le Directeur de la *Mathematical Division* eut d'ailleurs le sentiment d'avoir affaire à du « Turing matérialisé », comme il le relata lui-même un peu plus tard dans sa langue natale¹⁰¹¹. Lors de ce même voyage Womersley eut également le privilège rare – puisque évidemment il ne possédait pas la citoyenneté américaine - de pouvoir approcher et étudier l'*Electronic Numerical Integrator And Computer* à la *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie. Plus important encore, John von Neumann et Hermann H. Goldstine partagèrent avec lui des informations de premier ordre au sujet des plans de la première machine à calculer digitale électronique à programme enregistré, c'est-à-dire l'*Electronic Discrete Variable Computer* (E.D.V.A.C.).

Le Directeur de la *Mathematical Division* du N.P.L. revint en Grande-Bretagne le 15 mai 1945 et dans le courant du mois qui suivit, il eut une entrevue professionnelle avec Maxwell H. A. Newman. En plus de faire part de sa récente expérience américaine au grand mathématicien de Manchester, J. R. Womersley mit également à profit cette rencontre pour lui signifier son souhait de rencontrer au plus vite A. M. Turing. Pour avoir été son Professeur et inspirateur à Cambridge avant la deuxième guerre mondiale, mais aussi pour l'avoir fréquenté à la *Government Code and Cipher School* pendant toute la durée du conflit, M. H. A. Newman connaissait fort bien Turing. Il figurait par conséquent parmi les personnes les

¹⁰¹⁰ Le poste de Directeur du *National Physical Laboratory* était alors occupé par le mathématicien et physicien Sir Charles Galton Darwin, petit-fils du fameux auteur de *De l'origine des espèces*. Sir C. G. Darwin présida aux destinées du N.P.L. de 1938 à 1949.

¹⁰¹¹ L'expression « Turing in hardware » figure in extenso dans la note « A.C.E. Project – Origin and Early History ».

mieux indiquées pour organiser un rendez-vous entre le représentant du N.P.L. et l'éminent logicien. En réalité cette rencontre fut arrangée le jour même et Womersley put non seulement faire la connaissance de Turing mais aussi inviter ce dernier à son domicile afin de lui soumettre d'une part les matériaux dont il était en possession concernant l'E.D.V.A.C. et, d'autre part, de tenter de le convaincre de rejoindre la division de mathématiques du *National Physical Laboratory* dans la perspective d'y développer un ordinateur¹⁰¹². Turing accepta volontiers cette proposition – après tout il ne s'agissait ni plus ni moins que de concevoir une version matérielle de sa machine logique universelle pour le compte et aux frais du gouvernement britannique – et intégra officiellement le N.P.L. à la date du 1^{er} octobre 1945 avec le titre de *Temporary Scientific Senior Officer*¹⁰¹³.

Sans plus attendre Turing se mit au travail. Pendant les tout derniers mois de l'année 1945, il s'attela ainsi à la rédaction d'un rapport technique détaillant une machine universelle digitale électronique à programme enregistré. Sobrement intitulé « Proposed Electronic Calculator¹⁰¹⁴ » ce document composé de 48 pages se distinguait assez radicalement du *First Draft of a Report on the EDVAC* en ceci qu'à la différence du célèbre rapport de von Neumann, il contenait une description technique complète, ou presque, de ce que devait être un ordinateur. Il est d'ailleurs assez intéressant de remarquer que si le logicien ne faisait aucune référence directe à son célèbre article de 1936 dans « Proposed Electronic Calculator », il recommandait cependant de lire son rapport en même temps que celui de von Neumann¹⁰¹⁵. Si les deux écrits pouvaient donc être parfaitement appréhendés de manière séparée – de fait ils étaient clairement indépendants l'un de l'autre même si tous deux procédaient fondamentalement des résultats présentés dans « Sur les nombres calculables... » - ils n'en étaient pas moins complémentaires jusqu'à un certain point. Les différences architecturales notoires qui particularisaient ces deux dispositifs informatiques marquaient d'ailleurs les limites de cette complémentarité. Comme nous l'avons dit en effet, le contenu de la proposition de Turing pour un « calculateur électronique » se démarquait notablement de celui du *First Draft of a Report on the EDVAC*. Alors que la place accordée par von Neumann dans son texte aux aspects proprement techniques, pratiques et financiers du projet d'ordinateur se

¹⁰¹² Le récit – extrêmement concis – de cette journée et de ces rencontres avec Maxwell H. A. Newman et Alan M. Turing figure également dans la note « A.C.E. Project – Origin and Early History ».

¹⁰¹³ Soit officier scientifique supérieur temporaire. Ce poste lui donnait droit à un salaire annuel de 800 livres sterling.

¹⁰¹⁴ A. M. Turing, « Proposed Electronic Calculator », document non daté, consultable en ligne à l'adresse suivante: http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/p/p01/P01-001.html

¹⁰¹⁵ « *The present report gives a fairly complete account of the proposed calculator. It is recommended however that it be read in conjunction with J. von Neumann's 'Report on the EDVAC'* », in « Proposed Electronic Calculator », p. 3.

réduisait à rien ou presque, Turing, lui, devait leur consacrer une part non négligeable de sa démarche réflexive. Ainsi non seulement le scientifique britannique fournissait-il un descriptif circonstancié des différentes unités physiques appelées à composer le futur système informatique du N.P.L., mais il donnait également de nombreuses explications détaillées concernant la circuiterie électronique de ce dernier de même qu'un exemple de table d'instruction (c'est-à-dire de programme), appelée INDEXIN et rédigé en code machine. Turing devait aussi procéder à l'examen de questions encore plus pragmatiques puisqu'en plus de fournir une estimation du coût final de la machine (la valeur de 11200 livres sterling fut avancée), il donnait une approximation de la surface au sol qu'elle occuperait (1400 pieds carrés soit environ 426 m²). Pour la première fois aussi il énumérait quelques-unes des utilisations concrètes qui pourraient être faites de l'*Automatic Computing Engine*. De façon plus large, le logicien prétendait que l'A.C.E. serait à même de résoudre tous les « problèmes solvables par des employés de bureau humains travaillant selon des règles fixes et sans compréhension [de ces problèmes]¹⁰¹⁶... ».

Cette approche au moins aussi pratique qu'elle peut être théorique ne doit pas nous surprendre. Comme il a été précisé plus haut Turing n'était pas seulement un mathématicien et un logicien hors de pair. C'était également un homme habité depuis sa jeunesse par la volonté persistante d'élaborer un « cerveau artificiel », que ses hautes responsabilités durant la guerre avaient conduit d'une part à engendrer de complexes automates manipulateurs de séquences symboliques et d'autre part à s'approprier la technologie électronique par l'entremise de manuels spécifiques et aussi, si l'on ose parler de la sorte, la fréquentation assidue de l'établi. En électronicien et concepteur d'instruments d'encryptage et de décryptage confirmé, il ne pouvait légitimement passer sous silence les questions pratiques principales – et par conséquent primordiales – qu'impliquaient la conception et la réalisation d'un ordinateur.

Rebaptisé « Proposals for the Development of an Automatic Computing Engine » et accompagné d'un rapport de présentation rédigé par J. R. Womersley et intitulé « ACE Machine Project¹⁰¹⁷ », le rapport de Turing fut soumis à l'approbation du Comité Exécutif du *National Physical Laboratory* le 19 mars 1946. Entre-temps, et sous l'impulsion du Directeur

¹⁰¹⁶ « The class of problems capable of solution by the machine can be defined fairly specifically. They are those problems which can be solved by human clerical labor, working to fixed rules, and without understanding... », in « Proposed Electronic Calculator », p. 14.

¹⁰¹⁷ Le mémorandum de J.R. Womersley comporte 4 pages, il est daté du 13 février 1946 et porte le numéro E.881. Il est consultable au : http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/1/171/L71-001.html. Précisons qu'il existe un autre mémorandum intitulé « 'A.C.E' Machine Project ». Long de 2 pages, celui-ci est non daté et il fut rédigé à la fin de l'année 1945 par le même J.R. Womersley à l'adresse de Sir Charles Darwin (http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/1/146/L46-001.html).

de la *Mathematical Division* qui souhaitait saluer ici les accomplissements du grand précurseur Charles Babbage, l'expression « *electronic calculator* » employée par le logicien britannique à la fin de l'année 1945 avait laissé place à une désignation peut être un peu moins anonyme, en tous cas plus particularisante: *Automatic Computing Engine*, ou A.C.E.¹⁰¹⁸.

John R. Womersley, puis Alan M. Turing lui-même défendirent le projet A.C.E. devant les membres du Comité Exécutif du N.P.L. (dont Douglas R. Hartree était), au cours de la journée du 19 mars 1946. Se livrant à l'intention de son auditoire à une synthèse des principes essentiels qui sous-tendaient sa proposition de « calculateur électronique », Turing devait exposer en quelques points – primordiaux et donc parfaitement révélateurs de ses idées et préoccupations premières en la matière - quelle était sa conception personnelle de l'ordinateur. Dans le compte rendu qui a été fait de son intervention, on soulignera les éléments suivants :

«...Le Dr. Turing a expliqué que si une vitesse globale de calcul élevée devait être obtenue, il était nécessaire d'effectuer l'ensemble des opérations automatiquement. Réaliser les opérations arithmétiques aux vitesses électroniques n'était pas suffisant : des dispositions devaient être prises pour le transfert des données (nombres, etc.) d'un emplacement à un autre [de la machine]. Ceci conduit à [l'expression de] deux exigences supplémentaires – le 'stockage' ou 'mémoire' pour les nombres qui ne sont pas directement en usage et les moyens permettant de donner l'ordre à la machine d'effectuer les bonnes opérations dans le bon ordre.»¹⁰¹⁹

Et Turing d'identifier immédiatement après la formulation de ces quelques observations préliminaires quatre problèmes d'ordre général. Les deux premiers problèmes relevaient selon lui du domaine de l'ingénierie, tandis que les deux autres ressortissaient à l'univers des mathématiques.

« Problème (1) (ingénierie). Doter [l'A.C.E.] d'un système de stockage adapté ».

¹⁰¹⁸ On remarquera que le vocable anglais « ace » signifie « as » en français. Dans le domaine des jeux de hasard - particulièrement ceux qui nécessitent l'emploi de cartes à jouer - il est de nombreuses expressions anglo-saxonnes où il figure qui renvoient à l'idée de posséder une carte maîtresse ou un atout en réserve (*to keep an ace up one's sleeve*). Peut-être n'était-ce pas là un pur hasard...

¹⁰¹⁹ In « National Physical Laboratory Executive Committee Minutes », 19 mars 1946, p. 5. Ce document de 8 pages a lui aussi fait l'objet d'une procédure de numérisation. Il peut être vu dans son intégralité à l'adresse suivante : http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/1/170/L70-024.html

« Problème (2) (ingénierie). Doter [l'A.C.E.] d'unités de commutation électroniques à haute vitesse ».

« Problème (3) (mathématiques). Concevoir des circuits pour l'A.C.E., élaborer ces circuits à partir du [dispositif] de stockage et des unités de commutations décrits sous les Problèmes 1 et 2. »

« Problème (4) (mathématiques). Décomposer les travaux de calcul devant être effectués avec l'A.C.E. [dans les termes des] processus élémentaires que l'A.C.E. est capable d'exécuter (comme déterminé dans la solution du Problème 3). Concevoir des tables d'instructions permettant de traduire les travaux [de calcul] sous une forme accessible à la machine ».

Les remarques et les problèmes énoncés tour à tour ici par Turing sont comme nous le soutenions plus haut particulièrement révélateurs de sa vision ou de sa philosophie quant à la façon dont il convenait de procéder pour représenter physiquement la machine logique universelle qu'il avait imaginée au milieu des années trente. Ainsi les circonstances historiques avaient peut-être conduites le scientifique anglais à délaisser le champ des mathématiques et de la logique pure pour plonger six années durant dans celui de la bataille cryptographique et de l'automatisation des méthodes de déchiffrement – il devait au passage acquérir à Bletchley et à Hanslope de fort précieuses connaissances en électronique et en technologie radar - son expérience et son génie logiques n'en devaient pas moins dépendre fortement sur la manière dont il entendait à présent concevoir puis fabriquer l'*Automatic Computing Engine*. Turing avait compris dès le départ que les questions auxquelles il convenait d'apporter en priorité une réponse appropriée pour être en mesure de construire un ordinateur fiable et performant étaient 1°) celle du stockage interne des données informatiques; et 2°) celle de la vitesse de leur acheminement et de leur traitement à l'extérieur et à l'intérieur de la machine. Ces deux préoccupations *techniques* essentielles se doublaient du souci toujours constant de concevoir un dispositif aussi simple qu'il était possible. La volonté affirmée de parvenir ici à un optimum de simplicité matérielle, justement, allait déterminer spectaculairement à la fois la configuration de l'architecture électronique de l'A.C.E. – le design de ses circuits si l'on préfère - et la manière de programmer ce dernier (ce qui correspond aux problèmes *mathématiques* n° 3 et 4).

Selon Turing en effet le dessin du hardware de l'ordinateur devait constituer un modèle de simplicité, d'économie. A l'opposé de cette attitude américaine qu'il trouvait navrante et qui consistait en quelques mots à presque toujours solutionner les problèmes en multipliant les « prothèses » matérielles, *le scientifique anglais estimait que la complexité des*

opérations à réaliser devait avant tout être prise en charge par le programmeur de la machine et non par les équipements arithmétiques composant cette dernière. L'ordinateur devait donc être conçu de la manière la plus élémentaire et la plus économique qui se puisse envisager – toujours dans une perspective d'efficacité et de rapidité maximum – tandis qu'il était de la responsabilité de ceux qui entendaient en faire usage de rédiger des tables d'instructions répondant exactement à leurs besoins propres, quels qu'ils soient (ce qui pouvait éventuellement déboucher sur la composition de tables compliquées, faites d'un grand nombre d'ordres). Ceci revient à dire que Turing déplaçait ou maintenait dans la sphère logico-mathématique ce qu'il pensait impérativement devoir y être ou y demeurer. Pour lui, l'ordinateur n'était en fait rien d'autre qu'une machine logique universelle « cristallisée » dans la matière. Or la machine logique universelle était un parangon de simplicité puisque sa « réalité physique » - même d'un point de vue strictement théorique il avait bien fallu trouver un moyen de se la représenter- se réduisait comme il l'avait dit en 1936-37 à une tête de lecture/écriture mobile (correspondant à l'unité de contrôle de l'ordinateur), un ruban de longueur idéalement infinie (correspondant à sa mémoire interne), et un répertoire comportant un nombre déterminé de symboles alphanumériques (correspondant à ses instructions et à ses données). L'extraordinaire puissance de cet automate mathématique, toute la complexité de son comportement, bref tout ce qui faisait qu'il était capable de calculer l'ensemble des choses pouvant effectivement être calculées résidait non pas dans sa complexion « matérielle » mais bien plutôt dans ses tables d'états, c'est-à-dire, pour faire ici usage d'un terme moderne, ses programmes. La compréhension fondamentale qu'avait Turing de l'ordinateur, sa vision de ce qu'il devait être, ne différait en aucun de cela. Il s'agissait pour lui de faire en sorte que seuls l'absolument nécessaire, le totalement indispensable, se trouvent pris en charge par l'instrument, autrement dit par les circuits électroniques matérialisant telles ou telles fonctions mathématiques ou opérations de contrôle essentielles. Tout le reste, par l'entremise de la composition de tables d'instructions et dans les limites fixées par la structure de la machine¹⁰²⁰, devait être intégralement assumé par le programmeur, c'est-à-dire en dernier lieu par l'esprit humain et par la logique...

Le scientifique devait poursuivre sa présentation devant le Comité Exécutif du N.P.L en apportant ou en tentant d'apporter une réponse à chacun des problèmes qu'il avait identifiés, dans l'ordre où ceux-ci avaient été énoncés. La première des quatre questions

¹⁰²⁰ Dans la partie 8 (*Scope of the Machine*, p. 14) de « Proposed Electronic Calculator », Turing indiquait que les problèmes en droit solvables par l'A.C.E. pourraient effectivement être résolus pourvu que « *la quantité de matériel écrit devant être enregistré [par la machine] à n'importe quelle étape [du traitement] soit limitée à 5000 nombres réels, i.e. ce qui est susceptible d'être commodément écrit sur 50 feuilles de papiers* ».

posées était d'ordre technique et concernait le genre de système de stockage qui pourrait être employé sur l'A.C.E. sachant qu'il était absolument indispensable que celui-ci réponde à trois impératifs de base : il devait être *concurrentement* vaste, économique et accessible¹⁰²¹. Dans la seconde partie de « Proposals for the Development of an Automatic Computing Engine », une importante section de ce rapport entièrement dédiée à l'exposition de considérations et d'analyses de nature technique, Turing s'était livré à une étude (parfois d'ailleurs assez peu circonstanciée), des différentes méthodes de stockage disponibles au sortir de la guerre. Au moyen d'un tableau où il avait pris en compte des critères d'évaluation quantitatifs tels que la capacité de stockage offerte par rapport à « l'économie financière » et à « l'économie spatiale » réalisables, ou encore les temps d'accès en lecture et en écriture, le scientifique s'était ainsi efforcé de mettre en balance les avantages et les inconvénients propres à chacun des dispositifs d'enregistrement existants¹⁰²². Il les connaissait tous relativement bien pour avoir commencé à les étudier avec son camarade Donald Bayley, l'électromécanicien d'Hanslope Park avec lequel il avait travaillé en 1944 sur le projet de machine à crypter la voix Dalila.

De ce comparatif technico-économique il ressortait de toute façon assez clairement qu'au sein du groupement d'appareils étudiés – lequel comprenaient des systèmes dits « non effaçables » tels que les films, les bandes de papier ou bien les cartes perforées de type Hollerith et des systèmes dits « effaçables », comme les tableaux de branchements, les relais, les néons, les roues, les bandes magnétiques et... le cortex cérébral - la ligne à délai acoustique au mercure représentait assurément la meilleure des solutions envisageables en termes de capacité de stockage et d'accessibilité/prix de revient (ici exprimé en livres sterling). Remarquons tout de même à ce stade que dans sa proposition de « calculateur électronique » de la fin 1945, Turing avait parlé d'une mémoire à tubes cathodiques spéciaux - ou Iconoscopes, « dans la terminologie de J. von Neumann » - comme du « projet le plus prometteur » eut égard aux économies financières qu'il permettrait certainement de réaliser et

¹⁰²¹ La notion d'accessibilité dont Turing fait ici usage doit être comprise en termes de temps d'accès aux données. Elle n'est pas séparable des considérations de coût liées à la production et à l'éventuel entretien du dispositif d'enregistrement. Afin d'illustrer cela, le logicien donne dans son intervention du 19 mars 1946 l'exemple d'une bande de télétype et d'un circuit de commutation à lampes à vide. Le premier instrument est économiquement avantageux mais le fait qu'il offre un accès sériel aux informations – et aussi qu'il soit électromécanique - le range d'emblée dans la catégorie des dispositifs peu accessibles. Le second système envisagé, parce qu'à fonctionnement discret, est au contraire présenté comme hautement accessible. Cependant le prix d'une mémoire de capacité idoine composée de ce genre d'éléments serait nécessairement prohibitif. Il faudrait en effet de très nombreux composants électroniques pour l'élaborer.

¹⁰²² A. M. Turing, « Proposed Electronic Calculator ». La partie technique de ce document couvre les pages 20 à 48. Le tableau où sont examinées les différentes formes alternatives de mémoire figure dans sa section 16 (*Alternative Forms of Storage*, pp. 46-48), à la page 47.

aux vitesses de fonctionnement élevées qu'il autoriserait. Toujours dans ce rapport, il suggérait même que l'on modifie des tubes cathodiques communs – du genre de ceux ordinairement utilisés dans le domaine de la détection par moyens radar – afin de les faire correspondre aux besoins particuliers des nouvelles machines informatiques. Malheureusement, à ce moment précis de l'histoire, Turing ne disposait pas plus d'Iconoscopes - leurs travaux de développement, étroitement liés à la démocratisation de la télévision et à l'apparition des écrans couleur, battaient alors leur plein à la *Radio Corporation of America* – que de tubes cathodiques traditionnels. Dans ces conditions il n'eut par conséquent pas d'autre choix que celui consistant à se tourner vers les lignes délai acoustiques au mercure pour concevoir la mémoire du futur ordinateur du N.P.L.

Pour peu séduisantes qu'elles pussent effectivement apparaître aux yeux de Turing, les lignes délai acoustiques n'en possédaient pas moins un certain nombre de qualités fort intéressantes. D'abord, et ce n'était pas là la moindre d'entre elles, ces dispositifs d'enregistrement avaient l'immense mérite de déjà exister et donc d'être disponibles. Ensuite, comme leur emploi massif sur les appareils de détection à ondes radio durant la deuxième guerre mondiale l'avait parfaitement démontré, ils offraient de solides garanties de robustesse et de fiabilité. Enfin, pour terminer, Turing avait eu l'occasion de les voir fonctionner et d'analyser leur mode opératoire pendant qu'il travaillait à Hanslope Park. Andrew Hodges rapporte d'ailleurs que dans le courant du mois de septembre 1945 – le logicien était alors encore à Hanslope mais il savait déjà à ce moment là qu'il s'en irait bientôt pour le N.P.L. afin d'y construire un ordinateur – Turing et Donald Bayley « bricolèrent » une ligne délai au moyen d'un haut-parleur, d'un amplificateur régénérant et d'un long tube de carton (3 mètres) de 20 centimètres de diamètre¹⁰²³. Les deux hommes ne parvinrent pas à faire fonctionner correctement leur prototype avant le départ du scientifique au *National Physical Laboratory*. Cependant cette tentative rudimentaire et plus ou moins avortée témoigne du fait qu'en septembre 1945 Turing se préoccupait déjà très sérieusement de la solution qu'il pourrait apporter plus tard au problème du choix de la technologie supportant l'enregistrement des données informatiques lequel, il le savait, conditionnerait ensuite l'ensemble du processus de conception de son « calculateur électronique ». Cette expérimentation relativement précoce montre aussi que dans cette perspective somme toutes décisive, le logicien avait déjà commencé à privilégier la solution des lignes retard acoustiques... C'est par conséquent le

¹⁰²³ In [Hodges, 1988], pp. 267-268.

principe de fonctionnement général de ces dernières qu'il exposa sommairement à son auditoire en ce jour de mars 1946.

Le deuxième point ou problème énoncé dans l'intervention que Turing fit devant le comité Exécutif du N.P.L. se rapportait aux « *unités de commutation électroniques à haute vitesse* » que l'on emploierait pour réaliser les circuits logiques de l'A.C.E. Du fait d'un temps de parole limité, Turing n'eut guère le loisir ici de développer ses explications et de s'étendre longuement sur les détails techniques que cette question impliquait. Cependant il indiqua que les quantités stockées et manipulées à l'intérieur du système devraient être représentées en notation binaire. Les multiples tubes à vide du dispositif seraient quant à eux employés comme des composants de base capables de commuter entre deux états exclusifs aux vitesses sensationnelles qu'autorisait la technologie électronique (Turing parlait ici de « *'on-off' devices* »). Et le scientifique de se vouloir ensuite résolument optimiste quant aux chances élevées de succès qui se rencontreraient sans doute lorsque l'on procéderait effectivement à l'élaboration des divers circuits et unités fonctionnelles de la machine au moyen de ces éléments primordiaux.

Faute d'un temps suffisant le Comité Exécutif du N.P.L. ne laissa pas à Turing la possibilité d'aborder comme ils auraient véritablement mérité de l'être les problèmes 3 et 4 de son exposé (c'est-à-dire les deux points présentés par lui comme relevant plus spécifiquement du domaine des mathématiques). Prompt à se lancer dans de complexes analyses techniques qui sans doute auraient été bien dispensables compte tenu des circonstances, il eut en fait tout juste le temps d'évoquer la conception des circuits logiques de la machine en l'illustrant avec un exemple concret, celui de l'unité additionneuse. Turing ne put en revanche aborder en détail la question pourtant fondamentale entre toutes – surtout quant on sait le rôle à la fois central et supérieur que ces dernières tiennent dans sa vision si singulière de l'ordinateur – de la création des tables d'instructions. Ce développement absolument essentiel n'ayant pu être développé et encore moins conduit à son terme, la plupart des membres du Comité Exécutif, Sir Charles G. Darwin en tête, éprouvèrent en conséquence quelques réelles difficultés à appréhender ce qui faisait l'extraordinaire spécificité du système qui venait de leur être présenté à savoir non pas tant sa confondante rapidité d'opération – après tout c'était une qualité technique que l'on était en droit de voir exhibée par toute machine à calculer massivement constituée de composants électroniques - mais bien plutôt sa portée ou sa puissance *universelles*.

Douglas R. Hartree qui connaissait fort bien certaines des grandes installations américaines pour en avoir inspecté et/ou utilisé quelques-unes, et non des moindres¹⁰²⁴, avant et pendant les années de guerre, prit alors la parole, plaçant de fait son expérience et son autorité reconnues de tous au service de la cause défendue par Turing. Hartree commença par vanter le caractère économique du futur système A.C.E. en n'omettant pas de souligner les hautes performances dont ce dernier s'avèrerait certainement capable une fois construit. Etablissant immédiatement un rapprochement entre l'A.C.E. et l'E.N.I.A.C., lequel, puisqu'il était l'unique et fort spectaculaire représentant de sa lignée¹⁰²⁵, constituait alors l'incontournable référence mondiale en matière de grandes machines à calculer électroniques, le spécialiste en physique mathématique fit remarquer à l'assemblée que le système proposé, pour un coût de revient sensiblement équivalent à celui du fameux calculateur américain, serait assurément plus rapide que ce dernier. Du fait de son design original et de son mode opératoire sériel, il avait ainsi été prévu par son concepteur que l'*Automatic Computing Engine* n'exigerait pas plus de 2000 tubes à vide pour fonctionner. Et Hartree de poursuivre sa brève intervention en précisant que ce nombre somme toute peu important d'éléments électroniques – assez habilement il devait le confronter ici aux 18000 lampes radio totalisées par l'E.N.I.A.C. – n'empêcherait pas l'A.C.E. de disposer d'une vitesse d'opération et d'un espace de stockage largement supérieurs à ceux du calculateur de la *Moore School of Electrical Engineering*¹⁰²⁶. D. R. Hartree fit également valoir l'argument selon lequel il était à présent du plus grand intérêt pour la Grande-Bretagne de voir le développement de l'A.C.E. commencer dans les délais les plus bref sinon, prétendait-il, le pays se verrait à coup sûr devancé par les Etats-Unis en dépit du fait qu'il avait jusque-là « *fait montre d'une bien plus grande souplesse que les américains dans l'usage des appareils mathématiques*¹⁰²⁷ ».

¹⁰²⁴ On songera d'abord ici à l'E.N.I.A.C. Le scientifique britannique servit en effet de conseiller à l'équipe de la Moore School à propos de certaines des utilisations qui pourraient être faites de cette machine. Il montra ainsi aux américains comment employer leur grand calculateur électronique pour calculer des trajectoires balistiques. On se souviendra également que dans les années trente, D. R. Hartree avait vu l'analyseur différentiel de Vannevar Bush au M.I.T. et qu'il s'était directement inspiré de ce calculateur analogique pour construire un système équivalent à l'Université de Manchester.

¹⁰²⁵ Inutile, bien entendu, d'indiquer à nouveau que l'E.N.I.A.C. n'était pas un ordinateur mais un calculateur parallèle reconfigurable par câbles. En dépit de cela il s'agissait de la première grande machine à calculer électronique construite dans le monde et pour convaincre les membres du Comité Exécutif du N.P.L. de la nécessité de fabriquer l'*Automatic Computing Engine* – des membres qui connaissaient l'E.N.I.A.C. et qui peinaient à comprendre en quoi résidait l'originalité de l'A.C.E. – il représentait un élément de comparaison tout à fait pertinent.

¹⁰²⁶ On ne saurait bien sûr comparer de façon frontale la fonction remplie par les accumulateurs de l'E.N.I.A.C. avec celle qui revenait à la mémoire interne de l'A.C.E. (le premier système étant un calculateur, le second un ordinateur). Cependant si l'on suit le raisonnement de Douglas R. Hartree et que l'on s'en tient à une comparaison quantitative des capacités de stockages de ces deux instruments, on constate seulement que la machine de la *Moore School* était capable d'enregistrer 20 nombres alors que l'A.C.E. pouvait en stocker 6000.

¹⁰²⁷ In « National Physical Laboratory Executive Committee Minutes », p. 6.

Afin d'amener le Comité Exécutif du N.P.L. à prendre conscience de la nécessité et de l'urgence réelles dans lesquelles se trouvait désormais l'Angleterre de se doter d'une machine de la catégorie de l'A.C.E., Hartree enjoignit de surcroît ses membres à donner la priorité absolue à la conception et à la construction de ce nouvel instrument électronique, fut-ce au détriment de celles du grand analyseur différentiel auquel il était en train de travailler. On constate par là même que Sir Charles G. Darwin et ses pairs n'étaient pas encore parvenus à voir en quoi la machine imaginée par Turing se différenciait de tous les autres automates mathématiques construits jusqu'à cette période, Douglas R. Hartree, lui, l'avait tout à fait compris. Son comportement – au demeurant d'une noblesse et d'une élégance rares – au cours de cette réunion officielle témoigne on ne peut plus clairement de cet état de fait.

Toutefois les arguments déterminants avancés par D R. Hartree ne portèrent pas autant ou aussi rapidement qu'ils l'auraient peut être du et il fallut une intervention supplémentaire de la part de John R. Womersley pour qu'enfin, l'adhésion du Comité au projet A.C.E. devienne une chose acquise. Au moment où furent abordées les questions relatives aux possibles modalités de financement de l'A.C.E. le Directeur de la *Mathematical Division* du N.P.L. fit état d'une éventualité qui jusqu'ici n'avait pas encore été exprimée: celle qui consistait tout simplement à construire dans un premier temps une installation expérimentale ou, ainsi qu'on devait le dire un peu plus tard, un modèle pilote de l'*Automatic Computing Engine*. De dimensions et de puissance nécessairement plus modestes que l'A.C.E., cette petite machine n'en devait pas moins comporter les caractéristiques les plus essentielles, donc les plus intéressantes et les plus délicates à mettre en œuvre, de sa « grande sœur ». Comme l'établissent les minutes de cette assemblée, tout un chacun s'accordait à ce stade à reconnaître qu'aucune évaluation précise ne pouvait encore être réalisée du coût de revient global qui serait finalement celui de l'A.C.E. (c'est-à-dire de la machine complète). Nonobstant cela J. R. Womersley estimait approximativement à une dizaine de milliers de livres sterling la somme qu'il conviendrait d'investir afin de développer la version pilote de cet ordinateur. E. S. Hiscocks, le Secrétaire du N.P.L. déclara que ce travail pourrait être entrepris dans le cadre d'un programme de recherches déjà existant au N.P.L. *Mathematical Laboratory* sachant qu'il était probable que les fonds financiers disponibles à ce moment soient suffisants pour assurer son financement. D. R. Hartree insista encore sur le fait qu'un tel instrument pourrait permettre de prendre en charge une gamme complète de nouveaux problèmes en physique. Le Dr. R. V. Southwell, Professeur d'ingénierie et *Fellowship of the Royal Society*, fit quant à lui part du fait que Sir Geoffrey I. Taylor, l'un des plus grands

physiciens du 20^{ème} siècle, lui avait dit que l'A.C.E. serait bien plus utile que ne l'avait été l'E.N.I.A.C.

Sir Taylor savait très exactement de quoi il parlait. Spécialiste de renommée internationale en mécanique des fluides et des phénomènes ondulatoires, il avait figuré au nombre des quelques scientifiques britanniques qui furent délégués en qualité d'experts au centre de recherche et d'expérimentation de Los Alamos, pendant l'année 1944-1945. D'après les propos de Southwell, celui qui avait été conseiller scientifique sur le projet Manhattan souhaitait vivement que des dispositions spécifiques soient prises de façon à rendre aisé l'accès des utilisateurs universitaires à la future machine. Son opinion sur la question était qu'on ne devait pas s'efforcer d'amortir le coût de l'ordinateur (lequel pourrait s'élever selon lui à plus de cent mille livres sterling), mais bien plutôt considérer la mise au point et la fabrication de ce dernier comme une contribution importante du *National Physical Laboratory* au bien général de la nation. Cette fois-ci, les membres du Comité se laissèrent convaincre de manière définitive et ils se résolurent « *unanimement à soutenir avec enthousiasme la proposition voulant que la Division Mathématique entreprenne le développement et la construction d'une calculatrice du genre de celle proposée par le Dr. A. M. Turing*¹⁰²⁸ ». Il était par ailleurs entendu que le Directeur du N.P.L., extrêmement séduit par cet idée d'un « ordinateur national », se chargerait d'examiner les volets financiers et autres du projet avec les états-majors des diverses institutions scientifiques susceptibles d'être intéressées par la machine.

En premier lieu Sir Charles G. Darwin prit contact avec les responsables de la *British General Post Office Research Station* de Dollis Hill afin de leur proposer d'associer leur établissement au développement de l'*Automatic Computing Engine*. Le fait que le Directeur du N.P.L. ait directement choisi d'approcher ici les gens du *Post Office* pour leur faire cette proposition n'est pas surprenant. En effet deux des scientifiques qui travaillaient à cette époque au *British General Post Office* étaient considérés comme de véritables spécialistes du calcul électronique (tout particulièrement par ceux qui avaient connaissance de leurs travaux passés). Le premier de ces hommes était l'ingénieur Tommy H. Flowers. Pendant la guerre celui-ci avait imaginé le design puis réalisé les systèmes de décryptage *Colossi* en prenant pour base de travail les opto-comparateurs électromécaniques *Robinson*. Le second était Allen W. M. Coombs. Le Dr. Coombs fut le principal architecte des *Colossi Mark II*, lesquels virent le jour à Dollis Hill entre le mois de mars et le mois de mai 1944. S'il était par conséquent sur

¹⁰²⁸ *Ibid.*

le sol britannique deux personnes possédant tout à la fois les capacités d'expertise et la motivation nécessaires pour pouvoir prendre une part active à la construction de l'A.C.E. *Pilot Model*, c'était à n'en point douter T. H. Flowers et A. W. M. Coombs.

Le sens de la réponse faite par le *British General Post Office* à la requête de Sir Darwin s'avérant positif – notons que le 3 avril 1946 Turing et Womersley visitèrent les installations du *General Post Office* et s'entretenirent de l'A.C.E. avec le Contrôleur Radley¹⁰²⁹ - celui-ci put adresser à l'assemblée consultative du *Department of Scientific and Industrial Research* (D.S.I.R.) un mémorandum¹⁰³⁰ qui, d'une part, présentait dans ses grandes lignes le programme d'ordinateur A.C.E. et, d'autre part, formulait officiellement auprès de cet organisme une demande d'aide financière s'élevant à 10000 livres sterling. Dans ce document Sir Darwin indiquait qu'il avait été décidé qu'une machine pilote serait tout d'abord mise au point au N.P.L. Il spécifiait par ailleurs que le travail portant sur le développement des circuits électroniques et des lignes retard acoustiques¹⁰³¹ devant entrer dans la composition de celle-ci serait conduit par des chercheurs « expérimentés » du *Post Office*, « en collaboration avec le Dr. Turing et ses assistants ». Le D.S.I.R. fit plus qu'accéder à la doléance du directeur du N.P.L. puisque le 8 mai 1946, son comité consultatif conseillait officiellement 1°) « *que la proposition consistant à installer une machine à calculer automatique au National Physical Laboratory soit approuvée en principe* » et 2°) « *qu'une subvention allant de 5000 à 10000 livres pour l'année fiscale en cours soit consentie pour [la réalisation d'] une petite machine expérimentale* ». Qui plus est, et ce n'était pas là la moindre des choses sur laquelle ces derniers s'avançaient ici, les représentants du *Department of Scientific and Industrial Research* se montraient tout à fait disposés à « *recommander des financements supplémentaires pour [la construction d'] une machine complète, ceci portant peut-être le montant global des subventions à 100000 livres, sous réserve que la machine pilote satisfasse toutes les attentes.*¹⁰³² ».

¹⁰²⁹ La reproduction digitale de la note du 6 avril 1946 d'où est extraite cette information (« ACE Machine – Conversation with Dr. Radley, Controller of Research, Post Office »), peut être consultée à l'adresse Internet suivante : http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/1/148/L48-001.html

¹⁰³⁰ « Memorandum on a proposal to install an automatic computing engine (ACE) at the National Physical Laboratory », document confidentiel de 3 pages rédigé le 17 avril 1946 par Sir Charles Darwin à l'intention des membres du conseil consultatif du D.S.I.R. Un fac-similé digital de cet exposé peut être consulté à l'adresse : <http://www.tech.port.ac.uk/staffweb/andersod/HoC/AlanTuringNet/DisplayScans.php?id=37%205>

¹⁰³¹ En raison de sa vulnérabilité géographique, le N.P.L. n'avait pas été associé aux recherches sur les ondes radio et le radar pendant la guerre. D'où la nécessité de faire appel à une capacité d'expertise extérieure.

¹⁰³² Ces trois citations sont extraites d'un document officiel de quatre pages portant la date du 8 mai 1946 et le titre suivant: « Extract from the Minutes of the DSIR Advisory Council ». Une reproduction numérique de ces actes est consultable en ligne : http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/p/p36/P36-009.html

Si tout cela laissait augurer de suites plutôt favorables pour le devenir du projet A.C.E., rien de concret et de définitif n'avait encore été véritablement arrêté (et évidemment versé), pour assurer son financement. Cette sorte de conjecture expectative ne devait pourtant pas dissuader les responsables du N.P.L de s'engager davantage auprès du *General Post Office* en définissant avec précision la nature des missions de ses scientifiques et en estimant aussi le montant de la somme d'argent qui leur serait allouée pour les mener à bien (soit 5000 livres sterling). Dans un mémorandum rédigé le 21 mai 1946, J. R. Womersley devait ainsi consigner les informations suivantes :

« *Le travail que j'ai demandé au Dr Radley d'entreprendre dans la correspondance que j'ai eue avec lui se divise en deux parties, (a) le développement d'une ligne retard ultrasonique employable comme unité de stockage dynamique pour des impulsions à hautes fréquences en même temps que les moyens [permettant d'assurer] le contrôle et la synchronisation de plusieurs de ces lignes, et (b) le développement de circuits pour exécuter les processus arithmétiques et celui d'unités génératrices d'impulsions [destinés à être utilisés] en conjonction avec les lignes retard ... Il a été proposé dans la correspondance et les conversations [que nous avons eues] avec le Dr. Radley que la somme de 5000 livres sterling serait disponible dans le cadre de l'exercice budgétaire courant.*¹⁰³³ ».

A la date du 15 août 1946, le Fondé de Pouvoir du Ministère des Finances de sa Majesté répondit par courrier au Secrétaire du D.S.I.R. que la subvention de 10000 livres qui avait été réclamée par son organisation afin de pouvoir entamer le développement d'une version pilote de l'A.C.E. était accordée¹⁰³⁴. A partir de ce moment précis la mise au point et la construction de l'ordinateur imaginé par Turing, du moins sa version pilote, purent enfin débiter officiellement. Le 1^{er} octobre 1945 Alan M. Turing avait pris ses fonctions de *Temporary Scientific Senior Officer* au *National Physical Laboratory*. Comme on s'en doute bien, il n'avait depuis lors cessé de nourrir sa réflexion sur le design de sa machine et les possibilités techniques de son implémentation matérielle. Dans le cadre de la deuxième section de la proposition pour un « calculateur électronique » qu'il avait écrite au cours du

¹⁰³³ In « ACE Machine – Research Work at Post Office Research Station », mémorandum de John Womersley, *Mathematics Division, National Physical Laboratory*, 21 mai 1946. Un duplicata digital du document original est consultable en ligne au : http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/1/149/L49-001.html.

¹⁰³⁴ Cette lettre d'une page du Fondé de Pouvoir du Ministère des Finances britannique (*Treasury*) au Secrétaire du D.S.I.R. porte l'estampille « *Research* », la date d'enregistrement du 15 août 1946, et le n°NPL/19/77/1. On peut en consulter une reproduction numérique au : http://www.alanturing.net/turing_archive/archive/p/p36/P36-026.html.

dernier trimestre de l'année 1945, il avait comptabilisé et commencé à spécifier les organes fonctionnels les plus importants de sa future machine. Ainsi écrivait-il :

« Nous dressons ici la liste des principaux composants du calculateur tels qu'ils sont à présent conçus :-

- (1) Unités mémoire effaçables d'assez large capacité, connues sous le nom de stockage dynamique (DS). Consistant probablement entre 50 et 500 réservoirs de mercure avec une capacité d'à peu près 1000 chiffres chacun.*
- (2) Unités de stockage temporaires à référence rapide (TS), probablement une cinquantaine, avec chacune une capacité de 32 chiffres binaires.*
- (3) Organe d'entrée (IO) pour transférer les instructions et les autres matériaux dans le calculateur à partir du monde extérieur. Il possèdera une composante mécanique sous la forme d'une unité lectrice de cartes Hollerith, et une composante électronique qui sera propre [interne] au calculateur.*
- (4) Organe de sortie (OO) pour transférer les résultats hors du calculateur. Il possèdera une partie externe consistant en un reproducteur de cartes Hollerith, et une partie électronique interne.*
- (5) Le contrôle logique (LC). C'est le cœur même de la machine. Sa fonction consiste à interpréter les instructions et à les exécuter. Dans une large mesure, il transmet simplement les instructions à CA. Il n'existe pas véritablement de ligne distincte entre LC et CA.*
- (6) La partie arithmétique centrale (CA). Si nous voulons considérer LC comme l'analogue d'un calculateur humain [« computer »] alors CA doit être vu comme une machine à calculer de bureau. Il exécute les quatre processus arithmétiques essentiels (à l'exception possible de la division, voir p.27), et d'autres opérations diverses telles que copier, substituer. Dans une large mesure ces processus peuvent être réduits les uns aux autres par des moyens détournés ; une décision est par conséquent requise pour faire le choix d'un ensemble approprié de processus fondamentaux.*

- (7) *Plusieurs 'arbres' nécessaires en connexion avec LC et CA pour la sélection de l'information requise à n'importe quel moment. Ces arbres exigent bien plus d'équipement électronique que LC et CA eux-mêmes.*
- (8) *L'horloge (CL). Ceci fournit les impulsions, probablement à la fréquence récurrente d'un mégacycle, qui sont appliquées, en même temps que les signaux d'ouverture et de fermeture, aux grilles de la plupart des valves. Elle est la source de synchronisation du calculateur dans son entier.*
- (9) *Système de contrôle de la température pour les lignes retard. C'est une question quelque peu terre-à-terre, mais elle est importante.*
- (10) *Convertisseurs binaires à décimal et décimal à binaire. Ces derniers ne possèdent virtuellement pas de forme qui soit extérieure et visible. Ils sont mentionnés ici de peur que l'on pense qu'ils aient été oubliés*
- (11) *Dispositif de démarrage.*
- (12) *Alimentation électrique.¹⁰³⁵ ».*

On peut voir ici, en procédant à un rapide rapprochement des parties intéressées des textes de Turing et de von Neumann¹⁰³⁶, qu'il existait d'importantes ressemblances, mais aussi quelques différences notables, dans les façons respectives qu'avaient ces deux grands mathématiciens et précurseurs de l'ère informatique de concevoir et de dénommer les composants fonctionnels primordiaux de leurs ordinateurs (ceci bien sûr en sachant que Turing connaissait le contenu du *First Draft of a Report on the EDVAC*). L'un comme l'autre, les deux scientifiques devaient évidemment faire mention du contrôle logique de l'ordinateur (il se nommera *Logical Control* ou LC chez Turing et *Central Control* ou CC chez von Neumann), tout comme de l'unité électronique destinée à prendre en charge l'exécution de ses opérations arithmétiques élémentaires (il sera question de *Central Arithmetic part* ou CA dans

¹⁰³⁵ A. M. Turing, « Proposed Electronic Calculator », pp. 3-4.

¹⁰³⁶ Pour Turing, il s'agira de la deuxième partie de « Proposed Electronic Calculator », (« 2. Composition of the Calculator », pp. 3-4), et pour von Neumann, de la deuxième partie du *First Draft of a Report on the EDVAC* (« 2.0 Main Subdivisions of the System », pp. 1-3).

le premier cas et de *Central Arithmetical* ou CA dans le second). Qu'il s'agisse d'instruments devant être installés en entrée ou en sortie de l'ordinateur les dispositifs servant de périphériques au système de même que les canaux de liaison assurant leur connexion à ce dernier étaient également évoqués (ou sous-entendus) dans les deux documents. Turing parlera ici d'*Input* et d'*Output Organs* (IO et OO). Von Neumann examinera quant à lui séparément les périphériques proprement dits et les voies de communication permettant à ceux-ci de transférer les informations en direction ou à partir de la machine. Dans tous les cas les ensembles composés de *Outside Recording Medium* (ou R) et de I ainsi que de R et de O pourront être compris comme correspondant respectivement aux *Input Organ* et *Output Organ* dont il est question dans le travail de Turing. Enfin, pour le mathématicien d'origine hongroise, la mémoire centrale de l'ordinateur – qu'il nomme *Memory* ou M - représentait la troisième partie spécifique de la machine. Par nature agencement technique extrêmement composite, von Neumann proposait dans le *First Draft of a Report on the EDVAC* de considérer M comme une unité ou une totalité fonctionnelle¹⁰³⁷. Turing, lui, envisageait pour l'*Automatic Computing Engine* l'emploi de deux sortes de mémoires. Si elles ne différaient pas en genre – il envisageait en effet dans les deux cas de figure de recourir à la technologie des lignes retard acoustiques au mercure – leur nombre et certaines de leurs qualités n'étaient en revanche pas du tout semblables. Une première classe de sous éléments d'enregistrement internes devait ainsi être formée d'un nombre encore à déterminer mais de toute façon assez important de lignes retard – il est question dans le texte d'une fourchette allant de 50 à 500 unités – dotées d'une capacité individuelle de stockage de 1000 chiffres (binaires). Turing qualifiait ces éléments mémoire de premier type en employant l'expression « stockage dynamique » (*Dynamical Storage* ou DS). La seconde classe de lignes retard identifiée devait quant à elle être composée d'unités de stockage temporaires à référence rapide, d'où leur désignation, TS (pour *Temporary Storage*). Le mathématicien pensait qu'une cinquantaine de ces dispositifs à capacité d'enregistrement réduite – 32 chiffres binaires – et à accès rapide serait nécessaire pour mettre au point l'A.C.E.

L'introduction de deux catégories de mécanismes de stockage internes certes identiques en nature mais différents en performances, constituait une caractéristique conceptuelle inédite par rapport à l'approche « académique » que von Neumann avait proposée au monde à la fin du mois de juin 1945. Comme nous ne tarderons pas à le voir la

¹⁰³⁷ « While it appeared that various parts of this memory have to perform functions which differ somewhat in their nature and considerably in their purpose, it is nevertheless tempting to treat the entire memory as one organ, and to have its parts even as interchangeable as possible... At any rate the total memory constitutes the third specific part of the device: M. », in [Von Neumann, 1945], p.3.

distribution spatiale de ces deux sortes de lignes retard dans la machine, de même que les fonctions spécifiques qu'elles remplissaient l'une et l'autre au sein de celle-ci, allaient contribuer à faire de l'A.C.E. un ordinateur doté d'un dessin logique singulièrement original (en tout cas si on le compare à l'architecture de von Neumann). Entre le début du mois d'octobre 1945 et le mois de mai 1946 A. M Turing travailla, seul, à l'élaboration et au perfectionnement des plans des versions préliminaires de l'A.C.E. *Pilot Model*. La *Mathematics Division* du N.P.L. était une structure composée de plusieurs équipes de recherches et bien qu'en droit il ait été accordé toute priorité au projet A.C.E., dans les faits, J. R. Womersley avait plusieurs groupes à établir et par conséquent de nombreux problèmes à administrer concurremment. En conséquence et pendant plusieurs mois, il se trouva dans la complète impossibilité d'adjoindre ne serait-ce qu'une seule personne à Turing afin de le seconder dans ses travaux. Dans le courant du mois de mai 1946 la situation s'améliora quelque peu puisque l'auteur de « Sur les nombres calculables » reçut le renfort intermittent – dans un premier temps cette aide devait en effet se concrétiser sur la base d'un travail à mi-temps - du mathématicien James H. Wilkinson¹⁰³⁸. Pendant la guerre ce savant anglais formé à l'Université de Cambridge avait travaillé au département Recherche et Armement du *Ministry of Supply*. Comme bon nombre de ses confrères à ce moment précis de l'histoire il s'était donc penché sur des problèmes ciblés, tels la thermodynamique des explosions, la balistique, les flux supersoniques et la fragmentation des obus. Dans le cadre de sa pratique de scientifique engagé dans l'effort de guerre, il en était peu à peu arrivé à se détourner des méthodes analytiques dont il avait l'habitude et avait commencé, de plus en plus, à s'intéresser et à employer des méthodes d'approximation numériques. Pendant le conflit, il avait d'ailleurs eu largement recours à un calculateur mécanique digital à manivelle afin de calculer des solutions aux équations différentielles partielles sur lesquelles il travaillait. Le Docteur J. H. Wilkinson était certes un excellent mathématicien et pour avoir directement été confronté à ce problème, il était au fait des questions soulevées par la numérisation et la mécanisation des procédures de calcul. Cependant, il est vrai aussi que son expérience dans le domaine de la technologie électronique était sinon inexistante, du moins extrêmement limitée.

Lorsque Wilkinson commença à seconder Turing au premier jour du mois de mai de l'année 1946, ce dernier en était déjà à la cinquième évolution, ou plutôt à la cinquième « version » comme il est coutume de dire, du design de l'A.C.E. A ce stade notons qu'aucune

¹⁰³⁸ J. H. Wilkinson travaillait parallèlement avec Charles Goodwin, un ancien d'Hanslope Park. Ce mathématicien spécialisé dans le domaine de l'analyse numérique concevait lui aussi des calculateurs et partageait donc son assistant avec Turing.

structure matérielle opérante n'avait encore été produite par les gens du N.P.L ou bien ceux du *Post Office*. Toute la recherche, toute la démarche réflexive sur la machine et son économie logique, s'effectuaient donc encore de manière purement théorique. Pour schématiser, chacune des versions successives du design de l'A.C.E. devait comprendre un certain nombre d'étapes particulières, comme la spécification des composants élémentaires du système, celle de ses unités principales (contrôle logique, centre arithmétique et mémoire), ainsi que la définition de méthodes de programmation adaptées aux orientations technologiques retenues. La phase suivante du travail consistait en la rédaction de tables d'instructions précisément conçues autour du design en cours d'élaboration. Un des principales raisons d'être de ces programmes était qu'ils autorisaient la sélection de caractéristiques programmatiques favorisant soit l'écriture des procédures effectives (on se situait donc dans ce cas du côté de l'utilisateur humain), soit leur vitesse d'exécution (on était alors du côté de la machine). Fidèle à son entente fondatrice de l'automate logico-mathématique universel – conception qui une fois déplacée dans la sphère du règne matériel visait finalement à accroître la complexité de la tâche du programmeur dans le but de simplifier les circuits électroniques de la machine et d'augmenter par là même sa vitesse de fonctionnement – Turing tendait à toujours privilégier le second terme de cette alternative. Mettant ensuite à profit l'ensemble des données et des conclusions récoltées lors de l'élaboration d'une version particulière de la machine, le logicien et sa petite équipe, de proche en proche et par perfectionnements successifs, se trouvaient en mesure de commencer à réfléchir sur une nouvelle évolution du design de l'A.C.E.

Il y eu en tout et pour tout sept versions différentes du design de l'A.C.E., toutes pensées entre la fin de l'année 1945 et l'année 1948. Les premières - jusqu'à la version IV – furent intégralement imaginées par Turing. Quant aux évolutions subséquentes – c'est-à-dire les versions V, VI et VII de l'A.C.E. – elles sont dues pour l'essentiel à Turing et à James H. Wilkinson bien sûr, mais aussi à deux autres personnes qui, entre le milieu de 1946 et le début de 1947, vinrent renforcer les rangs il est vrai fort ténus de l'équipe de recherche emmenée par le mathématicien anglais. Il s'agissait du britannique Michael Woodger et de l'américain Harry D. Huskey. Si le premier, arrivé au N.P.L. dans le courant du mois de mai 1946, était un jeune scientifique enthousiaste mais manquant encore singulièrement d'expérience, le second, arrivé en janvier 1947, avait en revanche fait ses armes sur le chantier de l'E.N.I.A.C., aux côtés de quelques-unes des plus grandes figures américaines du calcul électronique, à

savoir Presper J. Eckert, John W. Mauchly et John von Neumann¹⁰³⁹. La présence d'Harry D. Huskey au N.P.L. pendant cette période représenta assurément un élément décisif en faveur de la bonne continuation du projet A.C.E. *Pilot Model* après qu'A. M. Turing, aussi dépité qu'il pouvait être mécontent de la tournure prise par le cours des choses, ait décidé de retourner au *King's College* de Cambridge¹⁰⁴⁰ en septembre 1947.

La chronique de l'A.C.E. n'est pas exempte de soubresauts, de complications causées par les individualités en présence ou les difficultés organisationnelles rencontrées, de ruptures plus ou moins brutales aussi, dont bon nombre ont pu, à un moment donné ou à un autre, peser comme autant de menaces sérieuses sur le devenir même de cette entreprise ô combien laborieuse. Pendant trois années, de 1945 à 1948, la poignée de scientifiques engagée dans ce labeur monumental engendra des circuits électroniques et un système d'enregistrement interne comportant plusieurs centaines de lignes ultrasoniques. Elle imagina également une façon assurément originale d'organiser et de faire interagir ces éléments informatiques multiples. Elle produisit aussi de nombreuses tables d'instructions autorisant le calcul de fonctions mathématiques. Pourtant, jamais ces hommes ne disposèrent de la capacité de fabriquer et de tester *concrètement* tout ce qu'ils avaient été en mesure de concevoir. Les importantes difficultés rencontrées dans le cadre de la collaboration technique initiée d'abord entre le N.P.L. et la *General Post Office Research Station* de Dorris Hill, puis entre le N.P.L. et le *Telecommunications Research Establishment* de Malvern, eurent d'assez fâcheuses conséquences. Non seulement le développement de l'A.C.E. enregistra des retards fréquents en raison de la façon dont fut conduite cette politique de sous-traitance, mais Turing, excédé par ces ajournements répétés, la rigidité administrative du *National Physical Laboratory* et aussi, c'est un fait indéniable, la personnalité et les prises de positions tant théoriques que pratiques de son « collaborateur » Harry D. Huskey, finit par s'en aller en abandonnant la destinée de l'*Automatic Computing Engine* entre les mains des responsables du vénérable institut scientifique britannique. Ainsi l'ordinateur dont avait rêvé le père de la machine logique universelle, celui-là même qui devait en constituer sinon l'expression la plus pure, du moins la plus rapprochée qui se puisse imaginer au sein de la sphère du monde physique, vit en fin de compte le jour sans son concepteur, son ambitieuse architecture réétudiée – en fait largement revue « à la baisse » - en fonction d'impératifs extérieurs ou de considérations rapportées.

¹⁰³⁹ Comme Hermann H. Goldstine le rappelle à la page 218 de son livre *The Computer from Pascal to von Neumann*, Harry D. Huskey rédigea un manuel d'ingénierie pour l'E.N.I.A.C.

¹⁰⁴⁰ Turing passa une année sabbatique à Cambridge, avant de rejoindre le Département de Mathématiques de l'Université de Manchester, pendant l'automne 1948.

Comme nous le savons ni cet ensemble de péripéties contraires et malheureuses, ni même le renoncement d'Alan M. Turing n'entamèrent la résolution des gens du N.P.L. de mettre au point l'A.C.E. A tel point d'ailleurs que ce n'est pas une seule mais bel et bien trois machines – en l'occurrence l'A.C.E. *Pilot Test Assembly*, l'A.C.E. *Pilot Model* et la version finale de l'A.C.E. proprement dit - qui furent ici assemblées les uns après les autres¹⁰⁴¹, entre 1947 et 1957. C'est l'évolution V du design de l'A.C.E., laquelle n'était peut-être pas la plus sophistiquée mais constituait néanmoins la plus soigneusement pensée et la plus aisément réalisable du point de vue matériel, qui servit de noyau logique fondamental, ou de base architecturale si l'on préfère, à ces constructions informatiques successives.

La proposition de Harry D. Huskey visant à fabriquer un A.C.E. *Test Assembly*, c'est-à-dire un prototype simplifié et à échelle réduite de l'A.C.E. *Pilot Model* (système qui lui-même rappelons-le représentait déjà une simplification de l'A.C.E.), fut adoptée par le N.P.L. au mois d'avril 1947. Le démarrage de la fabrication de ce petit ordinateur expérimental destiné à tester les principes informatiques décrits par Turing signa le coup d'envoi effectif, si l'on ose dire, du projet A.C.E. En effet la grande majorité des efforts réalisés préalablement à cette date par le logicien et son petit groupe l'avait été dans le domaine théorique, qu'il s'agisse du reste de la conception de l'architecture du système ou bien de sa programmation. A côté de cela, nous l'avons dit, très peu de choses tangibles avaient été conçues. En d'autres termes, et ce fut là un des motifs principaux qui précipitèrent le départ de Turing, le développement du hardware ne cessa de prendre un retard énorme. Retard qui pour être efficacement rattrapé nécessita à son tour que des compromis technologiques dénaturants – puisque réduisant les ambitieuses architectures logiques originellement pensées par Turing - soient par la suite consentis. Pour être parfaitement clairs et précis, il nous faut indiquer ici que ni les gens du *British General Post Office*, ni non plus ceux du *Telecommunications Research Establishment*, n'honorèrent complètement les engagements qu'ils s'étaient les uns après les autres engagés à tenir auprès des représentants du *National Physical Laboratory*. Aucun doute n'est évidemment permis quant au fait que Tommy H. Flowers et Allen W. M. Coombs, les deux anciens de Bletchley Park entrés au *Post Office* une fois la guerre achevée, possédaient les compétences requises mais aussi la motivation nécessaire pour prendre part à la construction de l'ordinateur du N.P.L. Cependant le pays était alors en pleine phase de reconstruction et après quelques tentatives relativement fructueuses qui eurent pour résultat la

¹⁰⁴¹ Quatre machines si l'on inclut ici le D.E.U.C.E. – cet acronyme signifiant *Digital Electronic Universal Computing Engine* - c'est-à-dire la version commerciale de l'A.C.E. *Pilot Model* que la firme English Electric commença à produire en 1954.

mise au point d'un petit nombre de lignes retard au mercure, les énergies et les compétences des scientifiques du *Post Office* se virent mobilisés au profit quasi exclusif de la remise en état du réseau téléphonique britannique (quant elles ne se trouvaient pas déjà placées au service du *Department of Atomic Energy*). Dans ces conditions, on comprend sans difficulté que Flowers et Coombs n'aient pas disposé d'autant de temps qu'ils l'auraient peut-être souhaité pour travailler efficacement à la conception et à la fabrication des éléments ultrasoniques de la mémoire de l'A.C.E. *Pilot Model*. Tels étaient donc la situation et l'état d'avancement des recherches lorsque Womersley et Turing effectuèrent une visite d'inspection à Dollis Hill, au cours des premiers jours du mois d'avril 1946. Ce que les deux hommes furent en mesure d'y constater ne fit bien entendu qu'ajouter à leur incertitude grandissante. A un point tel d'ailleurs qu'à peine un mois plus tard, Sir Charles G. Darwin prit la décision d'écrire aux responsables du *Telecommunications Research Establishment* dans le but de savoir à quel stade de progression en étaient exactement les travaux que le Dr. F.C. Williams réalisait sur les systèmes d'enregistrement à tubes cathodiques¹⁰⁴². Même si des contacts plutôt encourageants furent immédiatement établis avec le T.R.E. et ses principaux experts – ainsi les Dr. Frédéric C. Williams et Albert M. Uttley se rendirent-ils au N.P.L. le 22 novembre 1946 – aucun accord de coopération véritablement consistant ne put au final être arrêté entre les deux organisations. Les raisons permettant de rendre compte de l'échec de ces rencontres sont il est vrai multiples et complexes. Toutefois leurs grandes lignes peuvent être dégagées et exposées de manière concise. Tout d'abord il convient de préciser qu'au sortir de la guerre, les individus spécialisés dans le domaine de l'électronique étaient encore relativement peu nombreux en Angleterre. A la grande rareté de cette expertise pourtant indispensable devait qui plus est se surajouter la multiplication rapide des projets d'ordinateurs démarrés soit dans les grands centres universitaires du pays (comme Manchester ou Cambridge), soit dans le secteur ultra confidentiel de la défense nationale¹⁰⁴³. En même temps que se dissipait peu à peu l'idée d'un ordinateur national fabriqué et abrité par le seul N.P.L., la « tradition » de

¹⁰⁴² Dans son rapport « Proposed Electronic Calculator », on se souvient que Turing avait effectivement envisagé la possibilité de recourir à cette catégorie de support de l'information (voir en particulier le paragraphe 16, *Alternative Forms of Storage*, pp. 46-48).

¹⁰⁴³ On pensera par exemple au système militaire M.O.S.A.I.C. (pour *Ministry Of Supply Automatic Integrator and Computer*). Placée sous la responsabilité d'Allen W. M. Coombs sa construction débuta en 1947 pour se conclure en 1954. Il s'agissait d'un ordinateur à tubes électroniques dont la mémoire à lignes retard fut conçue sur le modèle de celle de l'E.D.S.A.C. de Maurice Wilkes. La fabrication de ce système destiné au traitement des données acquises par surveillance radar impliqua conjointement et à des degrés divers le *Post Office*, le *National Physical Laboratory* et la firme anglaise *All-Power Transformer Co.* S'agissant d'une machine destinée à un usage exclusivement militaire, priorité absolue lui fut donnée sur toutes les autres réalisations en cours dans ces institutions. Dans une certaine mesure ceci peut aussi expliquer pourquoi les spécialistes en électronique du *Post Office* n'avaient guère de temps à consacrer à l'A.C.E. *Pilot Model*.

coopération et de répartition des tâches héritée des temps sombres qui avaient donné naissance aux *Robinson* et aux *Colossus* perdrait graduellement de sa force et cédait désormais la place à une certaine forme de concurrence inter-institutionnelle (sachant bien évidemment que cette rivalité ne devait pas non plus exclure de possibles formes de collaborations entre les organisations scientifiques en présence). Ensuite, l'A.C.E. était une machine dont il avait initialement été prévu que la mémoire interne serait constituée d'un nombre relativement élevé de lignes retard au mercure. En outre, mais nous reviendrons de façon détaillée sur ce point un peu plus loin, le design de cet ordinateur prévoyait qu'il devait être dépourvu d'accumulateur. Dès lors passer de ce modèle architectural original à un autre, similaire en nature mais fort différent sur les plans technologique et programmatique puisque reposant sur l'utilisation de tubes cathodiques, aurait exigé un important travail de refonte de ses schémas fondamentaux. Or compte tenu des retards dont souffrait déjà le projet A.C.E., cette option pourtant séduisante ne pouvait raisonnablement être retenue par les responsables du N.P.L. Enfin Frédéric C. Williams et Albert M. Uttley, les deux experts du T.R.E., possédaient l'un et l'autre leurs motivations personnelles pour ne pas se montrer véritablement intéressés par la proposition du N.P.L. Le premier, accompagné de son confrère Tom Kilburn, s'apprêtait ainsi à quitter Malvern pour l'Université de Manchester dans le courant du mois de décembre 1946 afin, d'une part, de prendre possession de la Chaire d'ingénierie électronique¹⁰⁴⁴ qu'on lui avait offerte et, d'autre part, de travailler dans le laboratoire de calcul que Maxwell H. A. Newman avait récemment créé. Fort d'une réputation flatteuse de chercheur et d'inventeur, il aurait là-bas toute latitude « politique » et financière pour conduire ses recherches à la façon dont il l'entendait (une chose que ne lui aurait certainement pas permise le N.P.L.). La *Small-Scale Experimental Machine* et le *Mark 1*, deux ordinateurs conçus et construits entre 1947 et 1951 au *Royal Society Computing Machine Laboratory* de Manchester, représentèrent très certainement l'expression la plus tangible et la plus réussie de cette liberté de recherche et de l'ingéniosité impressionnante des deux hommes.

Quant à A. M. Uttley et aux membres de son équipe, eux aussi s'engagèrent dans la conception d'un ordinateur – il s'agissait du *Telecommunications Research Establishment Automatic Calculator* ou T.R.E.A.C. – qui, une fois achevé à la mi-1953, devint le premier

¹⁰⁴⁴ A l'époque le terme usité était plutôt celui d'électrotechnique.

système informatique britannique possédant une mémoire principale à tubes cathodiques et un mode opératoire parallèle¹⁰⁴⁵.

Le deuxième – et dernier - centre d'expertise en calcul électronique susceptible à l'époque de pouvoir fournir ses précieuses ressources humaines et techniques au *National Physical Laboratory* était le *Computer Laboratory* que Maurice Wilkes dirigeait à l'Université de Cambridge. Cependant, ici aussi, aucun accord de coopération dans le long terme ne put être mis en place entre les deux organismes... Grâce à Douglas R. Hartree qui avait intercédé en sa faveur auprès des américains, M. Wilkes s'était en effet vu accorder le privilège immense de pouvoir assister à la série de conférences sur les nouvelles machines à calculer électroniques que les principaux cadres de l'équipe de l'E.N.I.A.C. avaient prononcées au cours des mois de juillet et d'août 1946 à la *Moore School of Electrical Engineering*. Ce qu'il s'était trouvé alors en mesure d'apprendre à cette occasion avait produit sur lui une très forte impression et une fois revenu sur le sol anglais, il s'était aussitôt décidé à réaliser un ordinateur en s'appuyant sur ses connaissances en électronique, son nouveau savoir à propos des « calculateurs modernes » et les précieuses indications contenues dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*.

Parce qu'ils s'inspiraient directement des grands projets en cours aux Etats-Unis, les travaux qu'entendait poursuivre M. Wilkes après son séjour en Pennsylvanie n'étaient bien évidemment pas compatibles – ou tout au moins conciliables – avec ceux que s'efforçait de réaliser au même moment l'équipe de l'A.C.E. *Pilot Model*. La conception qu'avait Maurice Wilkes de l'ordinateur était en effet directement dérivée de celle de John von Neumann. Privilégiant par conséquent l'implémentation matérielle des fonctions logico-mathématiques plutôt que la réalisation de travaux de programmation destinés à produire des résultats strictement équivalents, cette façon de voir les choses allait à l'encontre de celle de Turing pour qui l'effort intellectuel de l'homme devait permettre ici une réduction du nombre des circuits contenus dans le système et par là même une augmentation de la vitesse de fonctionnement de celui-ci. Les défections consécutives du *British General Post Office* et du *Computer Laboratory* de Cambridge, ajoutées au fait que l'Université de Manchester se trouvait elle aussi sur le point de démarrer son propre projet d'ordinateur, achevèrent de convaincre les hauts responsables du N.P.L. qu'ils ne disposeraient jamais du monopole de l'ordinateur sur le territoire de la Grande-Bretagne. La guerre étant bel et bien terminée, les

¹⁰⁴⁵ En dehors de données d'ordre général et de quelques spécifications techniques, il semble qu'à ce jour peu d'informations soient disponibles concernant le T.R.E.A.C. A l'instar du M.O.S.A.I.C. l'ordinateur du T.R.E. était selon toutes vraisemblances essentiellement utilisé à des fins militaires.

scientifiques et les techniciens qui, sous le sceau du secret militaire le plus absolu, avaient œuvré à Bletchley Park, à Hanslope Park ou à Malvern au cours de cette période étaient quasiment tous retournés à la vie civile. Pour la plupart, évidemment, ils avaient recouvré leurs anciennes affectations ou avaient obtenu de nouveaux postes. Les organisations qui réintégrèrent ou qui engagèrent ces individus à ce moment précis se placèrent par conséquent en position de bénéficier immédiatement de la presque totalité des connaissances et des compétences techniques rares qu'ils avaient acquises et mises en pratique pendant le conflit... Comme nous le disions un peu plus haut le démembrement des grands centres nerveux où s'était confidentiellement constitué le formidable outil de guerre électronique britannique ne se fit pas sans s'accompagner d'une perte graduelle de l'esprit de collaboration et d'entraide qui avait prévalu depuis leur création. De la dispersion obligée des membres des équipes de ces centres dans les sphères universitaires ou gouvernementales résulta cependant le lancement quasi concomitant de plusieurs projets de machines informatiques sur le territoire anglais. Dès lors, et ainsi que les faits l'attestèrent, l'idée première de Sir Darwin – à savoir celle d'un ordinateur national construit en partenariat avec les départements calcul et électrotechnique des plus grandes universités du pays mais possédé et abrité uniquement par le *National Physical Laboratory* – devint parfaitement irréalisable. Non seulement cela, mais il s'avéra également que s'assurer le concours durable de ces divisions universitaires pour aider à la mise au point de telle ou telle partie fonctionnelle de l'A.C.E. était chose sinon impossible, du moins extrêmement difficile.

Dans les années 1946-47, toutes les personnes compétentes pour cela étaient alors beaucoup trop occupées à travailler aux projets d'ordinateurs démarrés ou sur le point d'être démarrés dans leurs propres établissements pour pouvoir sérieusement songer à consacrer une partie de leur temps à une machine « étrangère », qui plus est dotée d'un modèle architectural différent de celui proposé par von Neumann... Les tensions et les difficultés de tous ordres ne cessaient donc pas de s'accumuler autour de l'*Automatic Computing Engine*. C'est alors que Sir Darwin prit la décision – peut-être tardive mais néanmoins salutaire – d'abandonner la politique de sous-traitance qu'il avait adoptée depuis le départ et de créer une section électronique (*Electronics Section*) au N.P.L. Composé d'une douzaine de personnes et placé sous la responsabilité du Dr. Horace A. Thomas, ce nouveau département fut créé et intégré à la *Radio Division* de l'établissement scientifique national au mois d'août 1947. C'est au sein de cette unité que la construction de l'A.C.E. *Pilot Model* commença officiellement, le 18

août 1947¹⁰⁴⁶. Dans les faits, on le devine, il fallut évidemment plus de temps pour que quelque chose de concret et d'efficace puisse enfin être mis au point. Des problèmes d'entente, de coordination, et pour tout dire de rivalité entre certains individus en charge des aspects théoriques de l'A.C.E. à la *Mathematical Division* et d'autres œuvrant à sa fabrication, à la nouvelle *Electronics Section* de la *Radio Division*, surgirent en effet assez vite, ralentissant d'autant l'avancée des travaux en cours. Plus tard, la réalisation d'un transfert temporaire des membres de la première équipe à la nouvelle section électronique permit de mettre un terme définitif à ces difficultés. Entre le mois de novembre 1947 et le début du mois de janvier 1948, un rapport long d'une page non daté, non signé et portant l'intitulé « Test Assembly for Automatic Computing Engine » fut néanmoins rédigé (certainement par l'un des membres de la *Mathematical Division*). Dans ce document étaient récapitulés de façon extrêmement synthétique les traits techniques déterminants du futur « assemblage de test » de l'*Automatic Computing Engine*. Ainsi pouvait-on apprendre que: «...la machine [qui est construite] en ce moment au N.P.L. [a] été conçue pour être la plus petite machine suffisante pour tester toutes les caractéristiques essentielles de l'A.C.E. grandeur nature et qu'en même temps, elle [est] une machine à calculer comparable à bien des égards à l'ENIAC¹⁰⁴⁷.».

Proposé au début l'année 1947 par l'ingénieur américain Harry D. Huskey, pensé et réalisé comme un modèle réduit simplifié du *Pilot Model* de l'*Automatic Computing Engine*, l'A.C.E. *Test Assembly* devait reprendre à son compte la plupart des attributs technologiques spécifiés dans la cinquième évolution du design de cet ordinateur. Il avait donc été prévu que son mode opératoire serait de type sériel, que son horloge interne (c'est-à-dire CL dans la terminologie initialement usitée par Turing), atteindrait la fréquence d'un mégacycle par seconde, et que les nombres qu'il serait appelé à manipuler devraient être exprimés en notation binaire. Il était également précisé que le format de ses instructions serait un code à double adresse d'une longueur de 32 bits (ce qui correspondait dans ce cas précis à un mot informatique). Quant aux « *équipements arithmétiques et logiques* » de l'ordinateur,

¹⁰⁴⁶ Une cérémonie à laquelle A. M. Turing prit part – sans toutefois jamais prendre la parole – fut organisée au N.P.L. à cette occasion. Il existe un rapport d'une page intitulé « Initiation of ACE Project in Radio Division », daté du 21 août 1947, qui retrace dans ses grandes lignes le déroulement de cette réunion inaugurale. Ce document peut être consulté sous forme de fac-similé digital à l'adresse électronique suivante : <http://www.tech.port.ac.uk/staffweb/andersod/HoC/AlanTuringNet/DisplayScans.php?Target=ACE&id=109%2007>.

¹⁰⁴⁷ « Test Assembly for Automatic Computing Engine », document non daté (dernier trimestre de l'année 1947), non signé, une page. On pourra en visualiser une représentation digitale à l'adresse électronique figurant ci-après: http://www.cs.usfca.edu/www.AlanTuring.net/turing_archive/archive/1/167/L67-001.html. Pour surprenant qu'elle soit la suggestion de comparaison figurant dans cette citation renvoie très certainement au rapport volume spatial/nombre de tubes à vide/capacité de calcul des deux machines. A cette époque, c'est-à-dire fin 1947, on savait en effet fort bien ce qu'était l'E.N.I.A.C. – un calculateur électronique monumentale – et ce que serait l'A.C.E. – un calculateur électronique possédant une mémoire interne – à savoir un ordinateur.

autrement dit aux dispositifs devant prendre en charge l'effectuation des opérations logico-mathématiques de base communes à tout « calculateur » digital, ils devaient être localisés non pas en un point déterminé du système – comme c'était effectivement le cas avec l'architecture de type von Neumann – mais plutôt *distribués* en plusieurs emplacements physiques de la machine. Il faut bien voir ici que le modèle de von Neumann reposait sur le concept central d'un flux d'instructions linéaire et continu occasionnellement interrompu par des opérations de branchement conditionnel (elles-mêmes déclenchées par l'obtention antérieure de certains résultats). Dans ce cas, les instructions du programme se suivaient dans la mémoire du système et son unité logique n'avait tout simplement qu'à les exécuter dans l'ordre dans lequel elles se présentaient. Turing estimait en revanche qu'une telle linéarité dans l'organisation des instructions n'avait pas lieu d'être. Dans son approche tous les ordres informatiques représentaient en effet des transferts de contrôle à part entière. Leur disposition sérielle sur le support d'enregistrement physique de la machine n'apparaissait nullement comme quelque chose de nécessaire. On pouvait donc procéder à leur « éparpillement » en mémoire sous réserve bien sûr que chaque instruction comporte un champ spécial indiquant l'adresse mémoire où la machine serait à même de trouver le prochain ordre à exécuter.

Composée de 10 lignes retard acoustiques, la mémoire principale l'A.C.E. *Test Assembly* devait disposer d'une capacité d'enregistrement de 320 mots informatiques (sachant que la longueur de chacun de ces mots était de 32 bits et que la capacité de stockage individuelle de ces lignes était de 32 mots). Ces éléments particuliers correspondaient en fait aux « *unités mémoire effaçables d'assez large capacité* » que Turing avait baptisées stockage dynamique (ou DS) dans son rapport « Proposed Electronic Calculator ». En complément, il devait aussi recevoir 10 lignes au mercure de petite taille. Comme ces dernières, du fait de leur moindre longueur, ne pouvaient offrir qu'une capacité de stockage assez réduite – celle-ci était en effet d'un mot informatique, ce qui équivalait par conséquent à une seule instruction de 32 bits – elles devaient autoriser fort logiquement un accès ultrarapide au peu d'information qu'elles contenaient. Turing avait appelé ces lignes spéciales « *unités de stockage temporaires à référence rapide* (TS) ». Sans surprise il était également indiqué que les périphériques d'entrée et de sortie de cette machine devaient être des équipements de lecture et d'écriture à cartes perforées de type *Hollerith*¹⁰⁴⁸. Enfin le rapport « Test Assembly for Automatic Computing Engine » se terminait en faisant état d'une double estimation.

¹⁰⁴⁸ Il était en outre précisé que les informations acquises ou restituées par la machine pourraient l'être en notation binaire ou en notation décimale. Dans ce dernier cas bien entendu, des convertisseurs de base automatiques seraient nécessaires.

D'abord celle du nombre de tubes à vide devant entrer dans la composition de la machine. Il était ainsi question d'un total de 800 lampes. Ensuite celle de la date à laquelle on supposait que la construction de cette dernière serait achevée. La période avancée ici correspondait sans davantage de précisions à la fin de l'année 1949.

Le processus de conception et de construction de l'A.C.E. *Test Assembly* ne fut jamais mené à son terme. D'une part parce qu'en l'absence de Turing seuls deux membres du groupe A.C.E. possédaient véritablement l'expérience nécessaire pour concevoir des circuits électroniques (il s'agissait en l'occurrence de Harry D. Huskey et de Donald W. Davies). D'autre part parce que la Section Electronique de la Division Radio du N.P.L. désormais associée à la conception de l'A.C.E. *Test Assembly* ne s'investit jamais comme il l'aurait fallu pour faire avancer efficacement les travaux sur la machine. La conséquence prévisible de tout ceci fut un ralentissement voire une quasi immobilisation de la progression des travaux sur l'A.C.E. *Test Assembly*. Pour compliquer davantage encore une situation déjà passablement délicate c'est à ce moment précis que Turing, à présent totalement démobilisé vis-à-vis du projet A.C.E., quitta définitivement le N.P.L. pour l'Université de Manchester et qu'Harry D. Huskey, l'ancien de l'équipe de l'E.N.I.A.C., s'en retourna aux Etats-Unis (en décembre 47). Le départ consécutif des deux hommes, leaders s'il en était du projet A.C.E., ne fit qu'ajouter à l'incertitude régnante en plongeant le restant de l'équipe chargée de la conception de cet ordinateur dans un désarroi profond. Fort heureusement pour le *National Physical Laboratory* et le devenir de sa machine, cette conjoncture bien peu favorable ne dura que temporairement. Horace A. Thomas, le premier Directeur de la Section Electronique du N.P.L. démissionna en effet de son poste en février 1948 pour rejoindre le groupe industriel *Unilever Limited*. Il fut immédiatement remplacé par Francis M Colebrook. Ce scientifique avait beau se montrer plus intéressé par les aspects managériaux de sa fonction que par les développements qu'on était en train de réaliser dans son nouveau département en matière de circuiterie électronique, il n'en n'était pas moins ouvert d'esprit, ce qui lui permit de comprendre rapidement la situation et d'œuvrer efficacement en faveur d'un rapprochement des équipes des différentes sections du N.P.L. qui, jusqu'alors, avaient travaillé de façon bien peu coordonnée à la mise au point de l'A.C.E. *Test Assembly*¹⁰⁴⁹.

¹⁰⁴⁹ En ce qui concerne la nature de la politique adoptée par Francis M. Colebrook au sein de l'*Electronics Section* du N.P.L., nous nous référons principalement au témoignage écrit de Ted Newman, un jeune spécialiste en électronique (notamment dans le domaine des radars et des caméras de télévision), qui rejoignit la Section Electronique du N.P.L. et le projet A.C.E. au mois de septembre 1947, après avoir travaillé pendant un certain temps au sein des laboratoires de recherche de la firme londonienne E.M.I. (*Electric and Musical Industries*). Ce témoignage figure sous forme d'article dans *Computer Resurrection, The Bulletin of the Computer Conservation Society*, n°9, printemps 1994, pp. 11-14.

Ce changement à la tête de la Section Electronique s'avéra extrêmement bénéfique puisque F. M. Colebrook proposa presque tout de suite à J. H. Wilkinson et à l'équipe de l'A.C.E. de prendre totalement en charge la construction de leur prototype d'ordinateur. Compte tenu des circonstances ces derniers ne se trouvaient bien entendu pas en position de refuser une telle offre tant elle était providentielle. Les scientifiques et les techniciens de la section A.C.E. abandonnèrent à partir là tout travail de développement sur l'A.C.E. *Test Assembly* pour se consacrer entièrement à un travail de remaniement de la version V du design de l'A.C.E. Il s'agissait ici pour eux de tenter de simplifier l'ensemble de la circuiterie électronique de la machine. C'est en définitive cette version V amendée – pour ne pas dire tronquée - du design de l'*Automatic Computing Engine* qui servit de base architecturale à l'A.C.E. *Pilot Model*. Ce sont les caractéristiques matérielles et logicielles de ce prototype informatique, conçu en grande partie selon les idées originales de Turing, que nous allons à présent considérer. A compter du moment de la nomination de F. M. Colebrook à la tête de l'*Electronics Section*, donc, les travaux de fabrication de l'A.C.E. *Pilot Model* purent débiter sérieusement et être effectués dans de bonnes conditions. A l'opposé de tout ce qui s'était déroulé auparavant les choses avancèrent ici remarquablement vite et dès le milieu du mois de mai 1950 – le 10 exactement - la machine était déjà partiellement opérationnelle (elle pouvait ainsi effectuer automatiquement quelques séquences d'opérations élémentaires ou exécuter le petit programme de test « *successive digits* »).

La mémoire de ce prototype de l'A.C.E. – le tout premier à fonctionner effectivement au N.P.L. rappelons-le - était composée de 10 lignes retard acoustiques capables de stocker individuellement 32 mots informatiques de 32 bits chacun (soit 10 x 1024 bits ou 10 x 128 octets). A la fin de l'année 1950, cette capacité fut étendue à 352 mots de 32 bits¹⁰⁵⁰. A cette batterie principale de dispositifs d'enregistrements acoustiques devaient encore s'ajouter deux autres ensembles de lignes au mercure, beaucoup plus courtes que les précédentes. Celles appartenant au premier ensemble additionnel étaient au nombre de 2 et pouvaient stocker chacune 2 mots de 32 bits (soit 2 x 64 bits ou 8 octets). Le second groupe de lignes comportait 6 unités, chacune d'entre elles pouvant enregistrer un mot informatique de 32 bits (ce qui au total donnait une capacité de stockage égale à 6 x 32 bits ou à 24 octets). Comme il avait été décidé dès l'origine, et puisque le N.P.L. possédait déjà cette catégorie de matériels, l'acquisition et la restitution des données se faisaient ici via des systèmes électromécaniques à

¹⁰⁵⁰ Le nombre de lignes retard acoustiques courtes et longues dont fut doté l'A.C.E. *Pilot Model* évolua avec le temps, ce qui signifie bien évidemment que sa capacité de stockage augmenta au fur et à mesure des années. Les données techniques que nous produisons ici valent donc pour une période donnée et non pas forcément pour une autre, plus tardive.

cartes perforées *Hollerith*. A défaut de disposer de mieux, c'est-à-dire en définitive de plus rapide, ces machines servaient aussi de mémoire de masse à l'A.C.E. *Pilot Model*. Il était toutefois prévu qu'à terme, on lui rajoute un tambour magnétique. Ce fut chose faite trois ans plus tard puisqu'en 1954, l'ordinateur reçut un tambour auxiliaire d'une capacité de 4096 mots de 32 bits.

Au regard des autres systèmes informatiques mis en chantier à la même période, l'A.C.E. *Pilot Model* était une toute petite machine. Pour preuve, il ne comprenait au total que 800 lampes à vides alors que l'E.D.S.A.C. et le T.R.E.A.C., pour prendre ici deux exemples bien connus de machines informatiques britanniques, en comportaient respectivement 3000 et 2000 (plus environ 1000 diodes au germanium pour l'ordinateur du T.R.E.). Ce nombre relativement modeste de composants électroniques ne doit pas nous induire en erreur. En raison du dessin spécifique de son architecture logique, mais aussi de la vitesse de cadencement très élevée de son horloge interne – celle-ci était en effet d'un mégahertz alors que la valeur ordinairement constatée sur les systèmes d'alors était de 500 kilohertz – l'A.C.E. *Pilot Model* pouvait solutionner des problèmes mathématiques impliquant des matrices numériques bien plus rapidement par exemple que ne pouvait le faire l'E.D.S.A.C. de l'Université de Cambridge. En réalité, et bien qu'elle n'ait jamais été qu'une version à échelle réduite de l'A.C.E., la machine du *National Physical Laboratory* surclassait tous les systèmes informatiques anglais en vitesse. Les performances remarquables de l'A.C.E. *Pilot Model* ne tenaient évidemment pas aux propriétés des composants électroniques dont il était fait. S'il s'agissait à coup sûr d'éléments d'excellente qualité, ces derniers ne possédaient en revanche rien qui méritât vraiment d'être qualifié d'exceptionnel. Les surprenantes performances dont était capable cet ordinateur constituaient en vérité l'une des expressions les plus manifestes de la viabilité et de l'extrême efficacité de l'approche conceptuelle et architecturale originale qu'Alan M. Turing avait imaginée puis formulée dans les années 45-46.

Nous avons indiqué à plusieurs reprises déjà que la vision que Turing possédait de l'ordinateur reposait sur une idée à la fois centrale et essentielle. Autant que faire se pouvait, il s'agissait ici de privilégier l'accroissement de la complexité du travail de programmation – tâche intellectuelle par définition dévolue aux opérateurs humains - afin de parvenir à simplifier au maximum la circuiterie électronique de la machine. Le modèle idéal, le prototype pur de l'ordinateur étant la machine logico-mathématique universelle décrite par lui dans « Sur les nombres calculables... », il était normal que le logicien anglais cherchât à l'instancier dans la matière en tentant d'en conserver deux des attributs les plus fondamentaux: l'universalité bien sûr, mais aussi la simplicité structurelle. En déplaçant de la sorte les

difficultés classiquement rencontrées dans le domaine physique de l'ingénierie en direction de la sphère immatérielle du logiciel, puis en cherchant à toujours rendre optimale l'expression des codes informatiques produits (c'est-à-dire en élaborant les « tables d'instructions » en tenant rigoureusement compte des particularités de la structure de l'ordinateur auxquelles elles étaient destinées), Turing fut en mesure de concevoir un système informatique capable d'exhiber une certaine « simplicité » matérielle et des performances hors normes.

La représentation schématique présentée ci-dessous nous permettra de comprendre plus aisément le *modus operandi* si remarquable de l'A.C.E. *Pilot Model*. Il convient peut-être, pour commencer notre analyse, de rappeler que cet ordinateur possédait un format d'instructions à plusieurs emplacements assez peu courant pour l'époque. Ailleurs et habituellement, il n'était bien entendu pas rare qu'une instruction informatique comporte plusieurs positions. Mais ce format multi champs répondait en général à un modèle type incluant 1°) un code opérationnel spécifiant la nature de l'opération à effectuer et 2°) les adresses mémoire respectives des opérandes sur lesquelles réaliser ladite opération ainsi que l'emplacement de la zone de stockage où transférer le résultat obtenu après le traitement de l'information numérique. Dans le cas de l'A.C.E. *Pilot Model* chaque instruction ou ordre était composé de plusieurs champs distincts. Ce schème programmatique auquel on se référait parfois en parlant de code à trois adresses¹⁰⁵¹ fonctionnait selon la modalité suivante. La structure de l'instruction permettait tout d'abord de récupérer la séquence binaire à traiter à partir d'une *source* donnée – à savoir une ligne retard dont l'adresse numérique était écrite dans un des champs de l'instruction - puis de la router jusqu'à une *destination* précise (ici aussi une ligne retard dont l'adresse en mémoire figurait dans un des emplacements de l'instruction en cours de traitement). Le dernier champ de l'instruction était quant à lui utilisé pour définir l'emplacement du prochain ordre informatique devant être exécuté par la machine. D'une part ceci signifie qu'à l'inverse de tout ce qu'il était possible de voir au même moment en d'autres lieux, les instructions de l'A.C.E. *Pilot Model* ne contenaient absolument pas de code opérationnel. D'autre part, cela veut également dire que la nature des fonctions ou opérations logico-mathématiques que l'ordinateur avait à accomplir se trouvait exactement déterminée par les adresses des lignes retard source et destination spécifiées dans l'instruction traitée, ainsi que par le chemin que les données devaient emprunter pour pouvoir transiter de l'une à l'autre. En procédant, via un travail de programmation qu'on imagine évidemment être

¹⁰⁵¹ Outre les champs où figuraient les adresses mémoire de la source, de la destination, et de l'instruction suivante, l'instruction de l'A.C.E. comportait trois éléments supplémentaires parmi lesquels le « *wait number* » et le « *timing number* ».

d'une très grande complexité, à la modification des positions des commutateurs permettant de mettre en contact telles ou telles lignes retard (sources ou destinations), avec le chemin de données de la machine (« *Highway* »), il était possible d'établir une ligne de transfert informationnelle sur laquelle les combinaisons de mémoires retard longues ou courtes ainsi créées donnaient lieu à la réalisation de telle ou telle opération mathématique ou fonction logique.

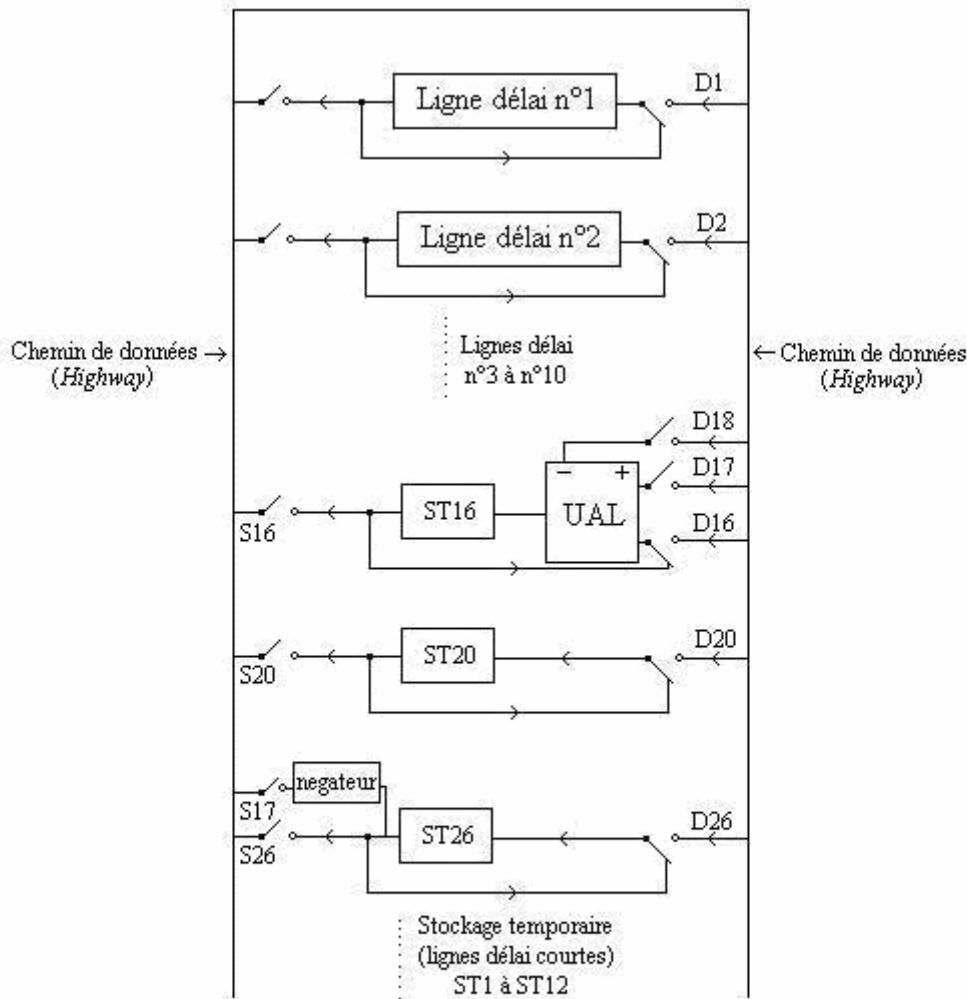


Fig. 4: diagramme logique simplifié de l'A.C.E. *Pilot Model*, circa 1951, d'après un dessin original de Michael R. Williams (1997).

Pour le dire encore autrement, en fonction de la source de laquelle elle provenait, de la destination qui était la sienne et de l'itinéraire qu'elle avait à parcourir pour passer de l'une à l'autre, une séquence numérique, du fait même de son passage par tel ou tel emplacement de la circuiterie, pouvait par exemple altérer une quantité déjà stockée dans une ligne retard ou encore provoquer la sortie (l'impression) d'un résultat. Andrew Hodges a pu dire du contrôle

de l'A.C.E. qu'il « *fonctionnait un peu comme on compose un numéro de téléphone*¹⁰⁵² », à ceci près bien sûr qu'ici le travail de programmation remplaçait l'acte physique de composition du numéro. Mais ce n'est pas tout. Les instructions de l'A.C.E. *Pilot Model* comportaient également un emplacement réservé servant à stocker une adresse numérique qui permettait d'indiquer au système où il pouvait trouver la prochaine instruction à exécuter dans la séquence logique du programme. Cette stratégie programmatique représentait en fait une conséquence directe de la philosophie informatique de Turing, laquelle, nous l'avons dit, tendait toujours à complexifier le code au bénéfice d'une simplification de la structure de la machine et d'une accélération de sa marche. La mémoire de l'A.C.E. *Pilot Model* étant composée de nombreuses lignes retard acoustiques au mercure, c'est-à-dire de dispositifs de stockage fonctionnant en mode sériel, il était nécessaire, pour éviter d'avoir à attendre que les données expressément requises par un ordre se présentent enfin en bout de ligne pour pouvoir être exploitées¹⁰⁵³, de définir une méthode permettant de limiter au maximum, voire de supprimer, ces périodes de latence indésirables. Quel intérêt y aurait-il eu en effet à mettre au point un ordinateur capable en droit de performances hors du commun si celles-ci, dans les faits, s'étaient systématiquement vues grevées en raison même de la nature du fonctionnement des modules composant sa mémoire interne ? Aucun, cela va bien entendu de soi. Afin de surmonter cette difficulté, et puisque l'A.C.E. ne devait de toute façon jamais être pourvu d'une mémoire principale à accès aléatoire, Turing imagina une solution aussi laborieuse à mettre en œuvre qu'elle pouvait être efficace sur le plan informatique. Etant donné que les programmeurs de la machine connaissaient le nombre exact de microsecondes requis pour l'exécution de telle ou telle instruction, ils devaient utiliser ce savoir de manière à optimiser la distribution spatiale de ces dernières à l'intérieur des mémoires acoustiques. Si, pour prendre un exemple général, la réalisation d'un ordre spécifique A exigeait une période de n microsecondes, il était par conséquent nécessaire qu'ils fassent en sorte que l'instruction suivante B occupe une position dans la ligne retard qui permette à celle-ci d'être disponible exactement n microsecondes après la première.

Aujourd'hui on ne mesure qu'imparfaitement le degré de difficulté inhérent à cette manière de procéder. Cependant, on peut tout de même se figurer combien la tâche des programmeurs de l'A.C.E. *Pilot Model* devait être ardue, eux qui avaient à définir avec la plus extrême des minuties la position de chacune des instructions des programmes au sein des

¹⁰⁵² In [Hodges, 1988], p. 275.

¹⁰⁵³ Cela pouvait parfois exiger que toutes les séquences d'informations contenues dans le tube opèrent une rotation complète, avant qu'on ne parvienne enfin à celle effectivement recherchée.

lignes retard du système afin d'en optimiser la vitesse d'opération...En dépit de son architecture peu canonique, de sa programmation difficile et des énormes problèmes qui plusieurs années durant freinèrent son développement au point de provoquer finalement son obsolescence prématurée, l'A.C.E. *Pilot Model* eut une descendance que l'on qualifia de relativement importante. Ainsi, à partir de ses spécifications technologiques, furent tour à tour dérivés une machine grandeur nature – souvent désignée sous les noms de *Big A.C.E.* ou de *Full Version A.C.E.* -, un système employé par la défense aérienne britannique, le M.O.S.A.I.C., et deux familles d'ordinateurs, le D.E.U.C.E. anglais et le *Bendix G-15* américain. La construction du *Big A.C.E.* débuta au *National Physical Laboratory* au cours de l'automne 1954. Cette machine à lignes retard acoustiques et à mémoire de masse magnétique devait être placée en opération au N.P.L. quatre ans plus tard, c'est-à-dire à la fin de l'année 1958. Le jour où on la présenta officiellement à la presse, A. M. Uttley déclara solennellement que « *le rêve de Turing était devenu réalité* ». Bien qu'il ait été en fait assez éloigné de la conception originelle de Turing, le *Big A.C.E.* n'en était pas moins un ordinateur affichant des performances tout à fait honorables¹⁰⁵⁴. Son architecture représentait qui plus est la seule alternative existante au modèle structurel omniprésent de von Neumann. Il s'agissait donc a priori d'un ordinateur très attrayant. Malheureusement, à la fin des années cinquante, les premiers systèmes informatiques à composants transistorisés et à mémoires à tores de ferrite produits en série commencèrent à faire leur apparition¹⁰⁵⁵. Plus performants en tous points, comparativement moins coûteux, mais aussi plus intégrés et fiables que ne l'avaient jamais été leurs illustres prédécesseurs, ces nouveaux instruments reléguèrent bientôt toutes les machines pionnières au rang de dispositifs techniquement déclassés. Le *Big A.C.E.* du N.P.L., lequel il est vrai arrivait très tardivement sur la scène informatique, ne fut bien entendu pas épargné par ce phénomène. Il ne devint ainsi jamais l'ordinateur révolutionnaire qu'il aurait pu être s'il avait été terminé dans les années 50-53...

Le M.O.S.A.I.C. (pour *Ministry of Supply Automatic Integrator and Computer*) fut fabriqué au *British General Post Office* par une équipe que dirigeait le Dr. Allen W. M. Coombs. Participèrent à la conception de cet ordinateur militaire le N.P.L., pour les aspects théoriques du projet, et l'entreprise *All-Power Transformer Corporation*, pour ses aspects techniques. Utilisé pour la traque et le suivi aérien, le M.O.S.A.I.C. fut certainement le plus grand ordinateur anglais de l'époque.

¹⁰⁵⁴ Comportant environ 7000 lampes à vide, cet ordinateur possédait une fréquence d'horloge interne de 1,5 Mhz, ce qui était extrêmement rapide.

¹⁰⁵⁵ Pour n'en citer que quelques-uns, on pourra par exemple évoquer l'UNIVAC *Solid State 80/90*, le R.C.A. 501, l'I.B.M. 7090 ou encore le N.C.R. 304.

L'histoire du D.E.U.C.E. (pour *Digital Electronic Universal Computing Engine*), a quant à elle commencée au *National Physical Laboratory*. A l'époque où fut conçue l'idée de l'A.C.E. *Pilot Model*, le Président de la firme d'équipement électrique et électronique *English Electric Company*, Sir George Nelson, siégeait au comité exécutif du N.P.L. Sir Nelson comprit rapidement tout l'intérêt que son entreprise pourrait tirer d'une participation à un tel projet et proposa donc à l'institut scientifique de conclure un accord de partenariat visant à lui confier la réalisation d'une version de série de l'A.C.E. *Pilot Model*., c'est-à-dire en définitive d'une version qui bénéficierait d'un travail d'ingénierie plus soigné que l'original. La livraison des premiers exemplaires de la série d'ordinateurs D.E.U.C.E. débuta en 1955. Une de ces machines alla comme il se doit au N.P.L. (en mars 1955), où elle remplaça peu à peu l'A.C.E. *Pilot Model*¹⁰⁵⁶... Dans l'ensemble, le D.E.U.C.E. ressemblait énormément à son modèle. Comprenant 1450 tubes à vide, il était cadencé par une horloge oscillant à la fréquence de 1Mhz. Sa mémoire était constituée de lignes retard acoustiques au mercure secondées, pour le stockage de masse, par un tambour magnétique. Ses périphériques d'entrée/sortie étaient des machines électromécaniques à cartes, de type *Hollerith*. Son architecture fut bien entendu calquée sur celle de l'A.C.E. *Pilot Model* mais afin d'accroître sa fiabilité et de rendre plus aisée sa maintenance, on procéda à un certain nombre de modifications structurelles. A la fin de l'année 1955, l'*English Electric Company* commença à proposer une version améliorée du D.E.U.C.E., le D.E.U.C.E. 2. En 1957, celui-ci bénéficia à son tour de quelques perfectionnements. Cela donna naissance au D.E.U.C.E. 2A. Au total, la firme anglaise fabriqua et vendit 32 exemplaires de D.E.U.C.E. (modèles 2 et 2A compris), entre 1955 et 1964. Pour la plupart, ceux-ci restèrent en service jusqu'au milieu des années soixante.

Enfin, la dernière machine informatique inspirée de l'*Automatic Computing Engine* de Turing fut le *Bendix G-15*. Imaginé par Harry D. Huskey¹⁰⁵⁷ et fabriqué par la *Computer Division* de l'entreprise américaine *Bendix Aviation Corporation*, cet ordinateur séquentiel destiné aux secteurs scientifiques et industriels fut officiellement introduit en 1956. Suivant en cela le principe essentiel de la philosophie informatique de Turing, son concepteur chercha à simplifier au maximum la structure matérielle du G-15. Il s'agissait en conséquence d'une

¹⁰⁵⁶ En 1956, le *National Physical Laboratory* fit don de l'A.C.E. *Pilot Model* au *London Science Museum*, où il peut toujours être admiré de nos jours.

¹⁰⁵⁷ Celui-ci travaillait désormais à l'*Electrical Engineering Department* de l'Université de Berkeley. On se souvient qu'Huskey avait non seulement pris part à l'épopée de l'E.N.I.A.C. mais qu'il avait également participé à celle de l'A.C.E. *Pilot Model* (en 1947 il avait passé une année sabbatique au N.P.L.). De 1948 à 1950, il fut aussi le principal maître d'œuvre du S.W.A.C. (pour *Standards Western Automatic Computer*), une machine à opération parallèle et à mémoire cathodique développée par le *National Bureau of Standards Institute for Numerical Analysis* à l'Université de Californie de Los Angeles.

machine dont la programmation n'était pas évidente¹⁰⁵⁸. Le design de la mémoire de l'A.C.E. *Pilot Model* fut repris par Huskey. Toutefois, dans ce cas précis, le scientifique l'implémenta non plus au moyen de lignes retard acoustiques mais grâce à un tambour magnétique dont les pistes étaient divisées en 2 catégories (une permettant d'émuler les lignes longues, l'autre les courtes). De façon évidente, le caractère proprement extraordinaire du *Bendix G-15* résidait tout d'abord dans ses dimensions à peine concevables pour l'époque. Composé de tubes à vide (450 unités) et de diodes au germanium (3000 unités) son volume, abstraction faite des périphériques d'entrée/sortie, était peu ou prou équivalent à celui d'un gros réfrigérateur (1,53 m x 0,93 m x 0,93 m pour une masse de 431 kg). Il doit être noté aussi que, toutes proportions gardées, sa consommation était faible: 3 KWh. Le G-15 n'en était pourtant pas moins aussi rapide que des systèmes informatiques atteignant plusieurs fois sa taille et consommant nettement plus d'énergie électrique. En outre, et cela aussi était exceptionnel, il pouvait être mis en œuvre par un seul opérateur. C'est ce qui a fait dire à certains que le *Bendix G-15* était le premier ordinateur personnel de l'histoire¹⁰⁵⁹. Autre atout considérable à l'époque : son prix. Sans systèmes périphériques, c'est-à-dire en configuration basique, l'ordinateur était vendu 49500 dollars. En ordre de marche, il revenait à environ 60000 dollars. *Bendix* louait aussi ses G-15 pour la somme mensuelle de 1485 dollars. Enfin la machine pouvait être raccordée à un clavier électromécanique, à un lecteur optique de bande papier à haute vitesse, à des lecteurs de bandes magnétiques (jusqu'à quatre unités connectables simultanément), à des lecteurs/perforateurs de cartes, à un traceur de courbes et à un analyseur différentiel digital (le *Bendix DA-1 Digital Differential Analyzer*). Cette diversité de l'offre en matière d'instruments périphériques, alliée encore une fois à une puissance de calcul et une capacité d'enregistrement basiques élevées, constituaient autant d'arguments séduisants à faire valoir auprès d'une gamme d'utilisateurs potentiels de plus en plus large et variée. En l'espace de quelques années, la firme *Bendix* vendit plus de 400 G-15 (en version A, C ou D), à travers le monde (par exemple au Canada et en Australie). Cependant cette réussite remarquable ne fut pas suffisante pour permettre à *Bendix* de devenir un acteur majeur de l'industrie informatique. En 1963, les activités informatiques de l'entreprise américaine furent cédées à la *Control Data Corporation* (C.D.C.), laquelle mit un terme progressif à la production des

¹⁰⁵⁸ En plus d'un langage machine, le G-15 était doté d'un système interprétatif baptisé « Intercom 1000 System » et d'un compilateur, le « Pogo ». En 1960, un langage compilé (« Algo », élaboré sur la base de l'ALGOL (pour ALGO*rithmic Language*), fut introduit pour cette machine.

¹⁰⁵⁹ La même chose fut dite par d'autres à propos du fameux PDP-8 de *Digital Equipment Corporation* (D.E.C.), et du L.I.N.C. (*Laboratory INSTRUMENT Computer*), un ordinateur mis au point en 1962 au *Lincoln Laboratory* du M.I.T.

systèmes G-15. Les derniers *Bendix* G-15 furent retirés du service au début des années soixante-dix.

Par la portée absolument essentielle et fondatrice des travaux qu'il réalisa avant-guerre dans le domaine de la logique mathématique, mais aussi par celle de ses accomplissements historiques en matière de lutte cryptanalytique, Alan Mathison Turing est reconnu par la communauté scientifique internationale comme un des plus éminents chercheurs du 20^{ème} siècle. Bien évidemment inséparables de son grand œuvre logique, ses apports aux champs d'une informatique et d'une intelligence artificielle qu'il contribua largement à fonder furent au moins aussi fondamentaux que celui-ci. Turing, par-dessus toute autre chose devant être portée à son crédit, est d'abord le logicien qui conceptualisa le modèle idéal de l'ordinateur. Qu'il soit contemporain ou plus ancien celui-ci donc doit être considéré pour ce qu'il est en essence : ni plus ni moins qu'une incarnation physique de cette machine universelle formelle et archétypale que Turing décrivit dans son article « Sur les nombres calculables... », en 1936. Mais le britannique n'était pas seulement le génial logicien que l'on sait. Il était aussi un électronicien et un expérimentateur confirmé. Ces dispositions peu communes à l'époque lui permirent d'imaginer et de fabriquer et/ou de prendre part à la création et à la fabrication d'équipements cryptographiques de différentes sortes tout au long de la deuxième guerre mondiale. Au sortir du conflit, il se lança dans la conception d'un système informatique – l'*Automatic Computing Engine* - dont le design devait certainement constituer une des expressions matérielles les plus pures et les plus fidèles qui puissent être imaginées de sa machine logique universelle. Démarré en 1946 au *National Physical Laboratory*, le projet A.C.E. ne prit effectivement fin qu'au terme de l'année 1958, avec la mise en opération du *Big A.C.E.* Bien sûr, la viabilité technique de l'approche développée par Turing avait déjà été vérifiée plusieurs années auparavant, notamment grâce à la mise en œuvre partielle ou totale de machines réalisées à échelle réduite et reprenant les principes qu'il avait édictés dans « Proposed Electronic Calculator ». Toutefois la volonté du directeur Sir Charles Darwin de privilégier une politique de collaboration interinstitutionnelle – dans le but alors revendiqué de produire un ordinateur national unique – au détriment de l'établissement immédiat d'une section électronique locale qui aurait pu dès le départ garantir au projet une autonomie technologique certes minimale mais néanmoins nécessaire, finit par coûter excessivement cher au N.P.L. Le manque d'investissement des équipes du *British Post Office* et du *Telecommunications Research Establishment* entraîna des retards successifs de plus en plus intolérables au point qu'en 1947, Turing, proprement excédé par cette accumulation de

difficultés techniques et administratives ainsi que par les tensions qui régnaient au sein de sa propre équipe, finit par se désengager complètement du projet A.C.E. Il rejoignit à ce moment l'Université de Manchester pour travailler avec M. H. A. Newman sur le *Mark I*. En définitive, et puisque les projets d'ordinateurs démarrés à Cambridge, à Manchester, à Dollis Hill et à Malvern avaient fait s'évaporer le rêve d'un ordinateur national unique, les instances dirigeantes du N.P.L. se résolurent enfin à mettre en place une unité domestique de recherche en électronique. Travaillant de pair avec le personnel de la *Mathematics Division*, l'équipe de cette nouvelle section parvint à produire assez rapidement un système opérationnel, l'A.C.E. *Pilot Model*. Des machines de série telles que le D.E.U.C.E. ou le G-15 purent en être dérivées et elles connurent un certain succès auprès des utilisateurs industriels ou gouvernementaux...

Décédé au mois de juin 1954, Turing ne vécut malheureusement pas assez longtemps pour voir la construction de l'A.C.E. *Full Version* commencer. Avec les unités commerciales produites sur la base de l'A.C.E. *Pilot Model* – 350 sortirent des lignes tout au plus - ce grand ordinateur fut l'un des seuls représentants de la classe des machines informatiques à « architecture de Turing ». Devenu opérationnel à la fin de l'année 1958, il fit également partie des derniers grands systèmes à tubes électroniques et à lignes retard acoustiques. Ainsi clôtura-t-il, dans une discrétion qu'on estimera avoir été trop grande, une ère épique qu'il aurait non seulement pu contribuer à inaugurer, mais aussi à bouleverser. Lorsque l'on en vient à considérer la formidable portée des accomplissements théoriques et pratiques d'Alan M. Turing, on est nécessairement conduit à penser que ce dernier mérite le titre de « père de l'ordinateur », peut-être plus que von Neumann ou Atanasoff eux-mêmes. Malheureusement une personnalité complexe, secrète – et pour cause ! - parfois peu amène, peu sociable, et de toute façon presque toujours indifférente aux règles administratives et autres contraintes protocolaires réglant la vie des institutions et des hommes qui y travaillent ne cessèrent de le desservir toute sa vie durant. Exception faite du génie mathématique, il était d'une certaine façon tout ce que John von Neumann n'était pas. L'histoire commune ne s'y est d'ailleurs pas trompée – ou plutôt si ! – elle qui a retenu le nom du second et finalement assez peu mis en valeur celui du premier.

1. 2. La scène américaine.

Nous allons à présent nous intéresser de façon détaillée au développement de quelques-uns des ordinateurs les plus emblématiques de l'époque pionnière de l'informatique américaine, c'est-à-dire celle couvrant globalement la période 1946-1950. Bien que nous estimions que tous sont à un titre ou à un autre parfaitement dignes de l'intérêt de l'historien de l'informatique, il ne nous sera évidemment pas possible ici de procéder à l'examen de l'ensemble des systèmes produits aux Etats-Unis pendant ces quelques années¹⁰⁶⁰. Dans ce qui va suivre, nous nous attacherons à montrer pourquoi, comment, dans quelles conditions et à quelles fins des ordinateurs tels que l'*Electronic Discrete VArIable Computer* (E.D.V.A.C.), le *Standards Electronic/Eastern Automatic Computer* (S.E.A.C.), le *Standards Western Automatic Computer* (S.W.A.C.), et le *Naval Ordnance Research Calculator* (N.O.R.C.) furent développés.

1.2.1. L'*Electronic Discrete VArIable Computer* ou l'ordinateur

« orphelin ».

Quant on s'intéresse aux moments premiers de l'informatique, il est une machine qui, immédiatement ou presque, s'impose à nous du fait même de ses origines historiques et géographiques. Il s'agit de l'E.D.V.A.C., de la *Moore School of Electrical Engineering*. Dans la deuxième partie de ce travail, nous nous sommes longuement intéressés à la façon dont l'idée du calculateur électronique à programme enregistré – toute en germe contenue dans les travaux de logique mathématique d'Alan M. Turing - s'était peu à peu dessinée dans les esprits de John P. Eckert, de John W. Mauchly, et de John von Neumann, au cours des années 1944-45. Dans cette même partie, nous avons également procédé à une étude détaillée du *First Draft of a Report on the EDVAC*, ce document récapitulant les idées des trois hommes mais paraphé par le seul von Neumann, que tous les spécialistes de l'histoire de l'informatique tiennent avec force justesse pour absolument crucial dans les processus liés de genèse et de diffusion de l'ordinateur à l'échelle de la planète. Dans les développements qui

¹⁰⁶⁰ Nombre d'éléments historiques, institutionnels et technologiques concernant les ordinateurs les plus importants de cette époque ont par ailleurs été précisés et analysés dans les parties antérieures de ce travail. Ainsi en a-t-il été par exemple de l'*Institute for Advanced Study Computer* (dans la section consacrée au développement du *Selectron*), du M.I.T. *Whirlwind* (dans celle dédiée aux mémoires à tores de ferrite), ou bien encore du B.I.N.A.C. de l'*Eckert-Mauchly Computer Corporation* (dans la partie traitant des bandes d'enregistrement magnétiques), etc....

vont suivre nous ne reviendrons pas sur ce faisceau de considérations. En retraçant les grandes étapes de la fabrication de l'E.D.V.A.C. (ou projet PY), nous nous attacherons plutôt à tenter de comprendre pour quelles raisons, à partir des années 1945-46, la *Moore School of Electrical Engineering* perdit graduellement son leadership mondial en matière de théorie et de conception des instruments de calcul digitaux électroniques alors qu'à la toute fin de la guerre, une équipe de scientifiques et d'ingénieurs qui n'avait certainement pas d'autre équivalent dans le monde à l'exception peut-être de celle qui officiait à la même période à *Bletchley Park*, s'y était constituée afin de travailler à la construction du grand calculateur militaire E.N.I.A.C. (*Electronic Numerical Integrator And Computer*, aussi appelé projet PX).

Entre la fin du mois de juin de l'année 1945 et celle du mois d'août 1946, deux évènements de portée internationale eurent pour point d'origine ou lieu de déroulement la *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie. Premièrement, mais est-il vraiment nécessaire de le rappeler encore, c'est en ce lieu que von Neumann rédigea le *First Draft of a Report on the EDVAC* (c'est également à partir de ce centre que les premières copies de ce document essentiel commencèrent à être diffusées). Secondement, à la demande pressante et croissante de tiers extérieurs issus des secteurs industriels, militaires ou universitaires, la *Moore School* organisa un cycle de conférences, d'ateliers et de discussions – la fameuse série d'interventions intitulée *Theory and Techniques for Design of Electronic Digital Computers* – qui se déroula dans les locaux de l'Université, du 8 juillet au 31 août 1946. L'influence qu'exerça directement et indirectement cet évènement académique sans précédents fut considérable puisque peu de temps après sa tenue, plusieurs grands projets d'ordinateurs furent démarrés simultanément aux Etats-Unis mais aussi en Grande-Bretagne (c'était le cas de l'E.D.S.A.C. et du *Manchester Baby* par exemple). Qu'on ne s'y trompe pas cependant. Si après la deuxième guerre mondiale l'Université de Pennsylvanie parvint à conserver quelques temps encore son double statut d'institut précurseur et prescripteur pour la conception et la construction d'instruments de calcul digitaux à composants électroniques, elle perdit définitivement celui-ci au sortir de l'été 1946¹⁰⁶¹.

Au cours de la période 1945-46, la situation pourtant favorable dans laquelle s'était trouvée jusque là la *Moore School of Electrical Engineering* n'avait pas cessé de se détériorer, essentiellement en raison des tensions internes qui étaient peu à peu apparues entre ses principaux chefs de file scientifiques. De façon assez paradoxale l'élément déclencheur de la profonde discorde qui coûta au final sa situation d'hégémonie technologique à l'école

¹⁰⁶¹ On rappellera ici que la construction de l'E.N.I.A.C. prit fin au cours du mois de février de cette même année.

d'ingénierie américaine ne fut rien d'autre que la publication du célèbre *First Draft of a Report on the EDVAC*.

L'attitude pour le moins équivoque de John von Neumann dans cette affaire eut pour conséquence logique et compréhensible de blesser et de mécontenter fortement John P. Eckert et John W. Mauchly, les deux acteurs historiques du projet E.N.I.A.C. La rédaction puis la diffusion relativement incontrôlée du *First Draft* apparurent ainsi comme une trahison aux yeux des deux hommes puisque ce document contenait des idées – en premier lieu bien sûr celle de calculateur digital électronique à programme enregistré – qu'ils avaient eues avant même que le célèbre mathématicien n'intègre le groupe de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens qui travaillait à la mise au point de l'E.N.I.A.C. Certes, ce dernier avait su mettre en forme et commenter ces concepts avec l'intelligence, la rigueur, l'originalité et la clarté exceptionnelles qui étaient les siennes. Quant à ses contributions effectives aux projets de la *Moore School*, qu'il s'agisse du reste de l'E.N.I.A.C. ou de l'E.D.V.A.C., elles étaient indéniables et ne pouvaient assurément pas être remises en cause. Cependant, von Neumann apparaissait aussi comme l'unique signataire du *First Draft*, ce qui tendait naturellement à laisser croire à tous ceux qui l'avaient entre les mains que tout ce qui y figurait était de son seul fait. Or ce n'était pas là la vérité... De manière à bien saisir la manière dont se déroulèrent ensuite les événements, il n'est pas superflu de rappeler à ce stade que l'E.N.I.A.C. était une machine destinée à équiper le *Ballistic Research Laboratory* de l'*Aberdeen Proving Ground* et qu'en conséquence, les sommes nécessaires à son financement étaient en grande partie issues des caisses de l'*U.S. Army Ordnance Department*. Tous les personnels de la *Moore School* qui, de près ou de loin, se trouvaient associés à la conception de ce calculateur ou bien à celle de son successeur, l'E.D.V.A.C., tombaient donc sous le coup de dispositions restrictives visant à protéger la confidentialité des deux projets militaires. Par le fait même, la diffusion d'informations les concernant leur était chose tout à fait interdite. Or aussi improbable et imprudent que cela puisse paraître aujourd'hui, von Neumann, parce qu'il était consultant extérieur et non pas membre à part entière de l'équipe de l'E.N.I.A.C., n'était pas tenu de se conformer à ces mesures de sécurité pourtant élémentaires. On peut alors facilement imaginer le surcroît de tension que cette différence de traitement évidemment perçue par Eckert et Mauchly comme une injustice supplémentaire faite à leur égard put ajouter à une situation que l'on savait être déjà passablement difficile.

Un article paru dans le *New York Times* du 11 janvier 1946¹⁰⁶² contribua à envenimer encore plus les choses. Sydney Shallet, l'envoyé spécial du fameux quotidien américain, y relatait ainsi une conférence qui avait eu lieu un jour plus tôt à Washington et qui avait rassemblé des représentants du *Weather Bureau*, de la *Navy* et de l'*Air Forces Weather Service*. Avaient également assisté à cette réunion le Dr. John von Neumann, présenté ici comme un « *mathématicien d'origine hongroise associé à l'Institute for Advanced Study de l'Université de Princeton* », et le Dr. Vladimir Kosma Zworykin « *scientifique d'origine russe et directeur associé des laboratoires de la Radio Corporation of America, à Princeton* ». Le journaliste entamait son récit en affirmant d'une part que les deux hommes :

« ...avaient développé des plans pour une nouvelle machine » - cette dernière se voyant tour à tour qualifiée de « *supercalculateur* » et de « *calculateur électronique* » - et d'autre part que la « *R.C.A. et Princeton avaient joué un rôle également déterminant dans la promotion de cette recherche, laquelle avait désormais atteint le stade où des plans pouvaient être soumis à des émissaires des services gouvernementaux* ».

Très curieusement il n'était nulle part fait mention de l'E.N.I.A.C. et de l'E.D.V.A.C. On ne parlait pas non plus de la *Moore School of Electrical Engineering* ou de l'Université de Pennsylvanie. Quant à J. P. Eckert et J. W. Mauchly, leurs noms n'étaient pas cités une seule fois. Sydney Shallet terminait son papier en prédisant le meilleur avenir à ce partenariat universitaire, militaire et industriel et à l'instrument aux « *possibilités illimitées* » qu'il avait pour ambition d'enfanter. Bien sûr il est parfaitement possible que ces quelques « omissions » aient été faites de manière tout à fait honnête puisque les travaux effectués alors à la *Moore School* sur les projets PX et PY - autrement dit l'E.N.I.A.C. et l'E.D.V.A.C. - étaient frappés du sceau du secret¹⁰⁶³. Pour le journaliste et les personnes disposant d'un droit de regard sur le contenu de ce qui allait être publié, le fait de ne citer rien ni personne ayant à voir avec l'E.D.V.A.C. – hormis von Neumann mais le contexte était autre - aurait alors correspondu à la simple application d'une mesure de sécurité... Il n'empêche. La nécessité de se plier au respect de cette procédure de protection, et aussi la façon dont était tourné le récit, faisaient

¹⁰⁶² Sydney Shallet, « Electronic to Aid Weather Figuring : Scientists Tell Weather Bureau, Army and Navy of Calculator Having Vast Possibilities », in *The New York Times*, 11 Janvier 1946, p. 12.

¹⁰⁶³ Nous n'étions plus ici dans la sphère du purement théorique, comme cela avait été le cas avec le *First Draft of a Report on the EDVAC*, mais dans celle de l'implémentation effective. Les choses concrètes liées à l'ingénierie de la machine devaient être soigneusement protégées. Quant à l'E.N.I.A.C. il ne devait être publiquement dévoilé qu'à la date du 14 février 1946, soit à peu de choses près un mois après la parution de l'article de S. Shallet.

immanquablement passer aux yeux du public von Neumann, Zworykin, l'I.A.S. et la R.C.A. pour les pionniers et leaders américains en matière de « calculateurs » électroniques digitaux. Or comme nous le savons, ce n'était pas le cas. J. P. Eckert et J. W. Mauchly ne pouvaient assurément pas accueillir ce nouveau coup d'éclat d'une manière très favorable.

Comme si cela ne suffisait pas, c'est également à cette période que les questions concernant la détention des brevets déposés sur des designs de l'E.N.I.A.C. et de l'E.D.V.A.C. commencèrent à se poser réellement à *Moore School*. La question centrale, ici, ne portait pas tant sur ce qu'il convenait ou non de breveter : un grand nombre de choses étaient susceptibles de l'être et en fait, l'avaient déjà été. Il s'agissait plutôt de savoir qui, des concepteurs de la machine ou bien de l'Université où celle-ci avait été construite, serait au final détenteur des droits d'exploitation de ces actes d'invention. Sans surprise le premier terme de cette alternative avait bien entendu la faveur inconditionnelle d'Eckert et de Mauchly tandis que le second devait recevoir celle – au demeurant tout aussi ferme – des instances dirigeantes de l'Université de Pennsylvanie. Il faut savoir que la politique générale pratiquée à la *Moore School* en matière de brevets avant et pendant la guerre consistait à ne pas autoriser ses employés à en déposer dès lors que leurs prétentions d'invention concernaient des recherches internes financées par l'institution. Mais dans le cas particulier de l'E.N.I.A.C., le Doyen Harold Pender avait cru possible et opportun d'accorder une dérogation à Eckert et Mauchly. Parce que le financement du calculateur électronique, dans son intégralité, était d'origine militaire et non pas universitaire, les deux hommes avaient été exceptionnellement autorisés à déposer des brevets à titre privé sur celui-ci. Après la guerre cependant, la demande technologique des forces armées baissa sensiblement et les militaires exigèrent que les universités et les centres de recherches désireux de continuer à travailler pour eux procèdent à une uniformisation de leur politique de brevetage. L'Université de Pennsylvanie s'efforça évidemment de mettre en place au plus vite les dispositions administratives et légales réclamées par l'armée. Ceci, nous allons le voir verrons peu, aboutit finalement à provoquer le départ d'Eckert et de Mauchly.

Si l'on y regarde d'un peu plus près on s'aperçoit qu'au fond, ce problème n'était pas si différent de celui qui s'était antérieurement posé avec la publication du *First Draft*. Von Neumann en effet n'avait jamais perdu de vue le fait que l'E.N.I.A.C. et l'E.D.V.A.C. étaient des projets militaires réalisés par une équipe de personnes travaillant pour le compte d'une université et qu'en tant que tels, leur conception, leur fabrication et les appointements de leurs concepteurs avaient été intégralement payés sur des fonds gouvernementaux. Rendre publiques les idées développées à la *Moore School* – qui plus est en usant d'une approche

synthétique et logique délaissant largement les aspects techniques inhérents au sujet – était alors certainement apparu au mathématicien comme un des moyens les plus sûrs et aussi les plus justes de permettre une diffusion à la fois rapide et efficace du concept d'ordinateur dans les milieux scientifique et militaire. Eckert et Mauchly ne pouvaient évidemment pas partager ces vues qu'on estimera peut-être généreuses, eux qui, à tort ou à raison, avaient le sentiment d'avoir été purement et simplement spoliés par von Neumann. De plus, à l'époque, les deux hommes nourrissaient déjà certaines ambitions commerciales quant à l'avenir du nouvel instrument, lesquelles étaient en définitive assez peu compatibles avec l'application du principe d'une libre circulation des idées issues d'une recherche scientifique financée par l'état.

Pour ce qui était du problème des brevets, il n'en allait donc pas autrement : étaient-ce les individus qui avaient travaillé à l'élaboration des machines ou bien l'institution publique qui avait rémunéré ces derniers à cette fin qui devaient en obtenir la jouissance ? Une fois encore, on constate que les intérêts académiques de l'Université de Pennsylvanie et ceux, professionnels et économiques, d'Eckert et Mauchly, ne pouvaient pas être aisément rapprochés... Pour ajouter encore au climat plutôt délétère qui régnait désormais à la *Moore School*, la fin du deuxième conflit mondial et les restrictions budgétaires qui en découlèrent contraignirent sa direction à prendre de nouvelles dispositions pour vérifier plus étroitement la manière dont on y effectuait les dépenses de recherche et de développement. C'est à Irven A. Travis, un officier supérieur parfaitement rompu à l'exercice puisque ancien responsable des contrats à l'U.S. *Naval Ordnance Laboratory* pendant la guerre, que revint cette mission. Le nouveau Directeur de la Recherche nommé par le Doyen Harold Pender était assurément un homme très compétent en matière d'administration. En outre il présentait l'avantage de posséder quelques connaissances en électronique ce qui lui permettait de comprendre la nature et l'importance réelles des travaux réalisés à l'école d'ingénierie¹⁰⁶⁴. Mais sa personnalité et ses manières expéditives n'étaient pas du goût de tous et rapidement, J. P. Eckert et J. W. Mauchly se trouvèrent en situation de conflit ouvert avec lui. Pour répondre à l'injection faite par les militaires de normaliser les politiques universitaires en matière de brevets, Travis avait en effet demandé à tous les personnels concernés d'accepter de renoncer à leurs droits sur l'ensemble des brevets déjà détenus ou qu'ils auraient éventuellement pu déposer dans le futur, au profit de la seule Université de Pennsylvanie. Ainsi que l'on pouvait

¹⁰⁶⁴ Il devait plus tard prendre la tête du département de recherche informatique de la firme américaine *Burroughs*.

s'y attendre, l'ingénieur en électronique et le physicien rejetèrent catégoriquement la requête d'Irven A. Travis.

Cet épisode représenta le dernier affront que tolérèrent Eckert et Mauchly. Peu de temps après ces événements et le dévoilement officiel de l'E.N.I.A.C., ils présentèrent ainsi leur démission¹⁰⁶⁵ à la direction de la *Moore School of Electrical Engineering* et quittèrent tout bonnement l'institution. On sait qu'après leur départ l'un et l'autre reçurent assez vite des propositions d'embauche, notamment de la part du géant industriel I.B.M. John P. Eckert se vit aussi proposer un poste de chef de projet à l'*Institut for Advanced Study* de Princeton par von Neumann lui-même mais il déclina l'offre¹⁰⁶⁶. L'esprit de recherche « ouverte » qui était encouragé là-bas, associé au fait d'avoir à collaborer avec le rédacteur du *First Draft* – lequel, au passage, avait emmené avec lui Hermann H. Goldstine et Arthur W. Burks – ne furent bien entendu pas étrangers à cette décision. En définitive, c'est Julian Bigelow qui hérita du poste. Quelques temps après être partis de la *Moore School*, Eckert et Mauchly s'associèrent et créèrent l'*Electronic Control Company*, une société à vocation commerciale successivement rebaptisée *Eckert-Mauchly Computer Corporation*¹⁰⁶⁷ puis *Univac Division of Remington Rand*¹⁰⁶⁸, qui produisit les systèmes informatiques BINAC (*BINARY Automatic Computer*) et UNIVAC (*Universal Automatic Computer*). Pour autant la question du *First Draft* et des brevets de l'E.N.I.A.C. et de l'E.D.V.A.C. n'était pas encore réglée et les principaux protagonistes de cette affaire, bien décidés qu'ils étaient à faire valoir ici ce qu'ils estimaient être leurs droits, eurent encore à faire directement les uns aux autres en deux occasions (au moins). La première fois bien sûr, ce fut pendant l'été 1946, lors des *Moore School Lectures on Theory and Techniques for Design of Electronic Digital Computers*, un cycle de conférences aux retombées internationales très importantes que financèrent concurremment l'*Army Ordnance Department* et le *Navy's Office of Naval Research*. La seconde rencontre, de nature certes moins académique que la première, eut lieu le 8 avril 1947 et rassembla Eckert, Mauchly, leurs défenseurs, ainsi que les représentants légaux de la *Moore School* et des militaires américains. Les avocats de l'*Army Ordnance Department* firent d'emblée valoir l'argument selon lequel une prise de brevet ne pouvait être envisagée ou tenue pour valable sur les idées contenues dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*, d'abord parce que ce

¹⁰⁶⁵ Celle-ci devint effective à la date du 31 mars 1946.

¹⁰⁶⁶ Malgré les différents qui pouvaient être les leurs, von Neumann connaissait parfaitement la valeur professionnelle immense d'Eckert. C'est pourquoi il lui proposa ce travail à l'I.A.S. L'offre resta valable pendant un laps de quelques mois mais l'intéressé ne donna pas suite. Le poste fut alors donné à Julian Bigelow.

¹⁰⁶⁷ En décembre 1948.

¹⁰⁶⁸ En février 1950, après le rachat de l'*Eckert-Mauchly Computer Corporation* par l'entreprise *Remington Rand*.

rapport représentait une publication au sens légal du terme, et ensuite parce qu'au moment précis où ils étaient en train de négocier, sa diffusion datait de toute façon de plus d'une année. Or la législation américaine interdisait que des concepts exposés dans un document ayant fait l'objet d'une publication puissent être brevetés un an après la date effective où celle-ci avait eu lieu¹⁰⁶⁹.

Les motifs pour lesquels les militaires agirent de la sorte n'ont à notre connaissance pas fait l'objet d'un éclaircissement officiel. Toutefois dans leurs ouvrages respectifs, Jérôme Ramunni et Michael R. Williams¹⁰⁷⁰ ont l'un et l'autre avancé une explication plausible pour rendre compte de cela. Ainsi l'année où eut lieu cette rencontre, c'est-à-dire 1947, l'armée avait déjà apporté son soutien à plusieurs projets d'ordinateurs démarrés en différents endroits des Etats-Unis. Il est alors évident que si des personnes privées ou encore une société s'étaient trouvées en mesure de revendiquer des droits de propriété sur les idées présentées dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*, alors toute université, toute firme industrielle, toute organisation gouvernementale ou militaire ambitionnant de construire une ou plusieurs machines appartenant au type décrit aurait été dans l'obligation de leur verser de solides royalties (à moins bien sûr de changer d'architecture logique, ce qui aurait bien entendu constitué une alternative compliquée, coûteuse et possiblement dissuasive). Pour Eckert et Mauchly, la chose représentait on s'en doute une opportunité économique formidable mais pour l'armée américaine, c'était justement tout le contraire. Ainsi la guerre froide connaissait ses premières heures et il restait encore à régler d'importants problèmes au sujet de la technologie des ordinateurs (comme le rappelle J. Ramunni celui de leur mémoire principale représentait incontestablement le plus urgent et le plus préoccupant). En conséquence aucun retard, aucune entrave au développement de ces machines ne pouvait raisonnablement être tolérés par l'armée. En ce début du mois d'avril, 1947 John P. Eckert et John W. Mauchly virent donc leurs prétentions à détenir des brevets sur les machines mises au point à la *Moore School* définitivement rejetées et leur rancœur à l'égard de John von Neumann et de la direction de la *Moore School Of Electrical Engineering* aggravée.

La démission d'Eckert et de Mauchly, en mars 1946, et le retour à temps plein de von Neumann - accompagné désormais de Goldstine et Burks – à l'*Institute for Advanced Study* de Princeton ne signèrent pas l'arrêt de mort de l'ordinateur de la *Moore School of Electrical*

¹⁰⁶⁹ Remarquons que l'E.N.I.A.C. était tout autant concerné par ce problème puisque légalement l'E.D.V.A.C. relevait d'une extension faite au contrat n°W-670-ORD-4926 (contrat n°W-36-034-ORD-7593 du 12 avril 1946), initialement passé pour le développement du grand calculateur électronique entre l'Université de Pennsylvanie et l'U.S. Army Ordnance Department.

¹⁰⁷⁰ In [Ramunni, 1989], p. 63 et [Williams, 1997], p. 346.

Engineering. Le 12 avril 1946, un contrat de développement d'une valeur initiale de 100000 dollars fut passé entre les représentants de l'*U.S. Army Ordnance Department* et les administrateurs de l'école d'ingénierie de l'Université de Pennsylvanie. Dans un premier temps il s'agissait ici pour la partie contractante civile de concevoir et de développer un modèle réduit de l'*Electronic Discrete Variable Automatic Computer* afin de démontrer la faisabilité de la construction de la machine à échelle réelle. Ce système informatique devait ainsi permettre de vérifier la possibilité technique d'un ordinateur disposant de certaines des caractéristiques les plus déterminantes présentées dans le *First Draft of a Report on the EDVAC* (et aussi dans un rapport préparatoire datant du début de l'année 1946 et intitulé *Automatic high-speed computing: a progress report on the EDVAC*). C'est Kite T. Sharpless, un des ingénieurs ayant travaillé autrefois sur l'E.N.I.A.C., que l'on plaça à la tête du nouveau projet de la *Moore School of Electrical Engineering*.

Rapidement, des rencontres préliminaires furent organisées entre les différentes parties concernées dans l'optique de déterminer avec exactitude quelles propriétés techniques devrait impérativement posséder cette petite machine de test. L'une de ces réunions eut notamment lieu le 9 octobre 1946 à l'*Aberdeen Proving Ground*. Y prirent évidemment part le Colonel Leslie E. Simon du *Ballistic Research Laboratory*, le Doyen Harold Pender et Irven A. Travis de la *Moore School*, quelques personnes chargées de représenter l'*Office of the Chief of Ordnance (U.S. Army)* et le *National Bureau of Standards*, mais également John von Neumann, de l'*Institute for Advanced Study*. A cette occasion les responsables de la *Moore School* présentèrent aux délégués des autres institutions trois pistes possibles pour l'élaboration du dispositif appelé à préfigurer l'E.D.V.A.C. La première de ces solutions, justement baptisée E.D.V.A.C. I, consistait à mettre au point un système informatique élémentaire travaillant en binaire et disposant en mode automatique des opérations de soustraction, de multiplication et d'addition. L'opération de division pouvait être réalisée aussi, mais il était nécessaire de passer ici par un travail de programmation spécifique. Ce système devait recevoir une mémoire centrale à même de stocker un millier de mots informatiques mais il n'était en revanche pas prévu qu'il comporte des capacités d'auto vérification automatisées.

La deuxième solution - E.D.V.A.C. II - retenait quant à elle le principe d'un ordinateur décimal à représentation binaire, capable d'exécuter automatiquement les quatre opérations fondamentales de l'arithmétique élémentaire et de s'auto vérifier. La capacité de la mémoire centrale de cette machine demeurait toutefois relativement faible puisqu'elle semblait devoir rester identique à celle arrêtée pour l'E.D.V.A.C. I. La dernière option envisagée par les gens

de la *Moore School* était beaucoup plus ambitieuse que les deux précédentes. Outre l'ensemble de propriétés techniques déjà évoquées (ainsi l'automatisation de la réalisation de toutes les opérations arithmétiques de base et l'auto vérification), les ingénieurs envisageaient de doter l'E.D.V.A.C. III d'une capacité de représentation automatique des nombres en virgule flottante et d'une mémoire centrale à même d'enregistrer 4000 mots informatiques. En fait de machine de test, on le voit bien, ce système ressemblait beaucoup à un ordinateur complet et puissant, c'est-à-dire à un instrument de traitement de l'information déjà élaboré, et donc fort éloigné du petit prototype qu'il était pourtant censé être. Au terme de cette première grande réunion, tous les participants se prononcèrent en faveur de la mise en chantier d'un dispositif en grande partie basé sur l'E.D.V.A.C. I. Cette future machine devait tout de même bénéficier de certaines améliorations notables. Il fut ainsi décidé qu'elle reprendrait quelques-unes des propriétés les plus intéressantes de l'E.D.V.A.C. II, à savoir la réalisation automatique de l'opération de division et la capacité de procéder à son auto vérification. De façon à refléter ce « croisement » des propriétés techniques de l'E.D.V.A.C. I et de l'E.D.V.A.C. II, le nouveau système reçut une appellation appropriée : E.D.V.A.C. 1.5.

Le travail de conception et de développement sur l'E.D.V.A.C. 1.5 débuta véritablement à partir du dernier trimestre de l'année 1946. Bien sûr, l'équipe dirigée par Kite T. Sharpless devait se heurter ici aux mêmes difficultés que rencontraient partout ailleurs dans le monde les groupes de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens engagés dans un processus de travail analogue. Tout, du design des circuits de l'unité arithmétique et logique de l'ordinateur aux éléments fondamentaux de sa mémoire centrale, en passant encore par son système d'évacuation de la chaleur ou bien ses interfaces de gestion de périphériques d'entrée/sortie, tout, donc, restait encore ici à penser et à fabriquer. Car contrairement à ce que l'on pourrait peut-être être tenté de penser, le fait qu'il se soit agi ici de l'E.D.V.A.C. ne changeait en définitive rien à l'affaire. Ainsi que nous l'avons vu, une des caractéristiques les plus essentielles du *First Draft of a Report on the EDVAC* était de proposer un modèle *logique* du successeur de l'E.N.I.A.C., et non pas un plan d'ingénieur pour bâtir celui-ci. Si dans son célèbre rapport von Neumann s'était livré à un examen circonstancié des différents types d'éléments physiques pouvant être éventuellement utilisés pour construire cette machine, il n'avait en revanche pas dit grand-chose quant à son implémentation matérielle effective. De ce point de vue, et même si elle pouvait compter sur la collaboration et le conseil de von Neumann, l'équipe de la *Moore School* ne paraissait donc pas être plus avantagée que les autres.

Au fur et à mesure que les travaux préliminaires sur l'E.D.V.A.C. 1.5. avançaient, des réunions supplémentaires furent organisées avec les représentants du *Ballistic Research Laboratory*, qui donnèrent lieu à la formulation de desiderata additionnels quant à ses capacités programmatiques et à ses caractéristiques matérielles. Compte tenu des besoins spécifiques qui étaient les leurs en matière de calcul automatisé, les militaires souhaitaient en effet voir le répertoire d'instructions de l'E.D.V.A.C. augmenté et la fiabilité de sa mémoire renforcée. Toutes ces modifications ne pouvant être accomplies sans qu'une grande partie de la circuiterie de la machine ne s'en trouve directement ou indirectement affectée, une nouvelle grande conférence destinée à faire l'état des lieux et à mesurer la possibilité et l'opportunité de ces changements fut programmée pour la fin du mois de mai 1947, à l'*Aberdeen Proving Ground*. Au cours de cette assemblée, deux projets de machines, l'un comme l'autre dérivés de la version 1.5 de l'E.D.V.A.C., furent présentés. Il s'agissait d'une part de l'E.D.V.A.C. 1.5.A et d'autre part de l'E.D.V.A.C. 1.5.B. Il était prévu que ces deux variantes de l'E.D.V.A.C. 1.5 intègrent les modifications matérielles demandées par les militaires en vue d'accroître la fiabilité de la mémoire principale du dispositif. Cependant seule la version 1.5B devait aussi bénéficier d'une extension du répertoire d'ordres de programmation. Afin de déterminer lequel de ces deux systèmes on devrait finalement construire, l'armée américaine chargea le Dr. Richard F. Clippinger¹⁰⁷¹ d'effectuer une étude circonstanciée. Le rapport qu'il rédigea à l'issue de celle-ci donna finalement la faveur à l'E.D.V.A.C. 1.5B. C'est donc à la réalisation de cette évolution de l'E.D.V.A.C. 1.5 – au fur et à mesure de la progression de son chantier cet ordinateur fit tout de même l'objet d'un certain nombre de modifications légères – que l'équipe de spécialistes de la *Moore School of Electrical Engineering* s'attacha à partir de la seconde moitié de l'année 1947.

Pendant un laps de temps relativement bref les choses se passèrent de manière tout à fait encourageante à l'école d'ingénierie. Ainsi l'ingénieur Hermann Lukoff, un ancien de la *Moore School* qui avait jadis travaillé sur l'E.N.I.A.C., réussit-il par exemple à mettre au point un système mémoire à lignes retard acoustiques fiable et opérationnel dans le courant du printemps 1947. L'appareil alors encore en phase expérimentale fut d'ailleurs présenté à un parterre de spécialistes lors d'une conférence qui eut lieu en mars 1947 à l'*Institute of Radio Engineers* de New York. Mais cette époque où tout paraissait aller ne perdura pas. Elle céda bien rapidement le pas à une période d'incertitudes et de défections qui eurent pour

¹⁰⁷¹ En 1947, le Dr. R. F. Clippinger devint Directeur du *Computer Laboratory* du B.R.L. C'est également lui qui fut le principal architecte de la transformation du calculateur E.N.I.A.C. en ordinateur (elle sera achevée en 1949).

conséquence de provoquer l'arrêt momentané du développement de la machine. En effet, devinant la possibilité d'un filon économique énorme, Kite T. Sharpless et quelques personnes de son groupe¹⁰⁷² démissionnèrent de la *Moore School* en avril ou en mai 1947 pour aller fonder leur propre entreprise de fabrication et de vente de composants électroniques, la *Technitrol Company Engineering Inc.*

Le départ du leader du projet E.D.V.A.C. et de ses deux collègues ne fut pas le seul et unique coup dur professionnel auquel l'équipe qui oeuvrait à la conception de cet ordinateur fut malheureusement confrontée. A peu près au même moment, Hermann Lukoff, le père de la mémoire de l'E.D.V.A.C. 1.5.B, quitta également la *Moore School* pour aller mettre ses talents d'électronicien au service de l'*Electronic Control Company*, l'entreprise de fabrication de dispositifs informatiques créée en 1946 par P. J. Eckert et J. W. Mauchly. Ce phénomène de démissions en cascade au sein du groupe chargé de la mise au point de l'E.D.V.A.C. présentait tous les aspects d'un processus de désagrégation graduelle extrêmement préoccupant puisqu'il semblait en réalité « capable » de s'auto entretenir. Lorsque certaines des figures principales du projet PY quittaient l'école d'ingénierie pour aller travailler ailleurs, il n'était en effet pas rare qu'elles proposent à leurs proches assistants de les suivre, ou bien encore que ceux-ci partent de leur propre chef en raison de la démission de leur supérieur hiérarchique. Les individus disposant des compétences nécessaires en calcul et en électronique numérique pour prétendre à pouvoir travailler sur l'E.D.V.A.C. n'étant pas foncièrement nombreux à une époque où qui plus est les mises en chantier d'ordinateurs se multipliaient aux Etats-Unis, le Directeur de la Recherche de la *Moore School*, Irven A. Travis, eut par conséquent fort à faire pour tenter de ramener la situation de son établissement à un équilibre à peu près normal. Indice particulièrement significatif des degrés de difficulté et de « pression concurrentielle » dans lesquels se trouvait alors le berceau de l'E.N.I.A.C., Travis finit lui-même par démissionner au cours de l'année 1948 afin d'aller créer une division de recherche informatique au sein de la société *Burroughs Corporation*¹⁰⁷³. C'est en définitive à Richard Lee Snyder Jr., un ingénieur en électricité ayant travaillé durant la guerre¹⁰⁷⁴ à la *Radio Corporation of America* aux côtés de Vladimir K. Zworykin et de Jan

¹⁰⁷² Il s'agissait en l'occurrence de Stuart E. Eichert Jr. et de John F. Koch Jr. Le quatrième membre fondateur de la *Technitrol Engineering Company*, à savoir Gordon Palmer Jr. était l'ancien Directeur Adjoint de la Recherche de l'*International Register Company*, une société établie à Philadelphie.

¹⁰⁷³ Plus tard Irven A. Travis prit la tête du *Burroughs Defense, Space, and Special Systems Group* de Paoli (banlieue de Philadelphie), avant d'accéder au poste de vice-président de cette entreprise.

¹⁰⁷⁴ R. L. Snyder Jr. travailla par la suite pour le compte de la R.C.A., de l'*U.S. Army Ordnance Department*, de même que pour la firme aéronautique *Hughes Aircraft*. C'est pendant le conflit mondial que Snyder conçut le tube *Radechon*, une variante de l'iconscope employée pour permettre la représentation graphique et la comparaison des informations captées par moyen radar.

Rajchman, que les décideurs de la *Moore School* et du *Ballistic Research Laboratory* décidèrent de confier les commandes du projet E.D.V.A.C. Richard L. Snyder Jr. devait les conserver jusqu'à l'entrée effective en service de cet ordinateur au B.R.L., au début de l'année 1952¹⁰⁷⁵.

Sans que cela atteigne non plus l'impressionnante somme de complications à laquelle purent être confrontés au même moment A. M. Turing et les membres du groupe A.C.E. au *British National Physical Laboratory*, force est tout de même faite de reconnaître qu'entre défection récurrente des cadres (et donc problèmes organisationnels répétitifs), accumulation de retards dans le travail de développement et difficultés techniques inédites, l'équipe de conception de l'E.D.V.A.C. n'eut en rien la partie facile. Si la signature du contrat marquant officiellement le démarrage de la construction de cet ordinateur se fit au cours de la première moitié d'avril 1946 – soit un an et deux mois après que von Neumann ait achevé l'écriture du *First Draft of a Report on the EDVAC* – il fut néanmoins nécessaire d'attendre six années à compter de cette date pour que la machine de l'Université de Pennsylvanie fonctionne enfin de manière totalement satisfaisante. Ironie du sort, l'achèvement de l'E.D.V.A.C. n'intervint qu'après celui de bien d'autres systèmes informatiques qu'il – ou plutôt que son architecture fondamentale – avait pourtant directement inspirés. D'importantes recherches étaient en effet conduites aux U.S.A. depuis la fin des années 40 qui avaient pour but de mettre au point des ordinateurs plus rapides, plus puissants, plus fiables et mieux intégrés que tous les dispositifs à tubes et à lignes qui les avaient précédés. Et de fait, deux ans après seulement que l'E.D.V.A.C. ait commencé à être employé de manière régulière à l'*Aberdeen Proving Ground*, les *Bell Laboratories* livrèrent à l'U.S. *Air Force* le *TRANSistorized DIGital Computer* (ou TRADIC), premier ordinateur intégralement transistorisé de l'histoire de l'informatique. Avec le *TRANSistor Automatic Computer* (ou TRANSAC) de la société *Philco Corporation*¹⁰⁷⁶, le TRADIC annonçait l'avènement imminent d'une classe de dispositifs informatiques à architecture von Neumann qui allaient être capables de performances jusqu'alors impossibles à atteindre. Autant dire donc qu'à l'instar de l'A.C.E. auquel nous faisons référence un peu plus haut, la technologie sur laquelle reposait l'E.D.V.A.C. était déjà quasiment obsolète au moment où les militaires du B.R.L. commencèrent à l'utiliser.

¹⁰⁷⁵ Il est vrai que la machine fut installée au B.R.L. en août 1949 mais elle ne devint véritablement opérationnelle que trois ans après cette date.

¹⁰⁷⁶ Datant lui aussi de l'année 1954, le TRANSAC était un système massivement équipé de transistors et doté d'une mémoire principale en tores de ferrite.

Nous avons déjà fait état des différents types de difficultés rencontrés par les membres de l'équipe de la *Moore School of Electrical Engineering* pendant les six années que dura la fabrication de l'E.D.V.A.C. Cependant les retards accumulés que nous avons eu l'occasion d'évoquer n'étaient pas tous imputables aux problèmes d'organisation ou de renouvellement des cadres qui survirent au cours de cette période. Comme nous allons le voir à présent, certaines des options technologiques retenues pour construire cette machine étaient exceptionnellement audacieuses et innovantes et en conséquence, leur développement nécessita beaucoup plus de temps que si elles avaient été d'une nature plus traditionnelle (si tant est bien sûr que l'on puisse parler de la sorte à propos des premiers ordinateurs jamais construits).

Comme tout ordinateur à architecture von Neumann – n'oublions pas que sur le plan de la structure logique il représentait dans l'absolu le parangon de cette catégorie d'instruments – l'E.D.V.A.C. comportait plusieurs organes primordiaux, à savoir 1°) une unité arithmétique et logique (ou A.L.U.) ; 2°) une unité de contrôle (ou U.C., sachant par ailleurs que l'A.L.U. et l'U.C. constituent le C.P.U. du système, c'est-à-dire son unité centrale de traitement); 3°) une mémoire principale ultrarapide (M); 4°) une unité périphérique permettant d'acquérir en entrée de la machine programme et données (I); 5°) une unité périphérique permettant de restituer en sortie du système les informations obtenues après traitement machine (O); 6°) une horloge interne (Cl) fonctionnant à la fréquence de un mégahertz. D'emblée il fut décidé par les maîtres d'œuvre de l'E.D.V.A.C. que ce dernier devrait surpasser l'E.N.I.A.C. en termes de puissance et de flexibilité mathématique, tout en offrant un moindre encombrement spatial et une vitesse de fonctionnement au minimum équivalente. Mis à part le fait évident que l'E.N.I.A.C. était un calculateur et non un ordinateur, le premier grand dispositif électronique de la *Moore School* possédait une caractéristique structurelle qui le discriminait tout à fait nettement de l'E.D.V.A.C.: son mode de fonctionnement était en effet parallèle – d'où sa rapidité - alors que celui du futur ordinateur de l'école d'ingénierie devait être sériel. Un travail de recherche et d'ingénierie très important devait donc être fourni ici pour permettre à l'E.D.V.A.C. d'atteindre les hautes performances qu'on désirait lui voir exhiber. Compte tenu de la complexité et du caractère critique des tâches que l'armée américaine entendait réaliser avec l'E.D.V.A.C., les développeurs de cette machine mirent essentiellement l'accent 1°) sur la nécessité de concevoir une mémoire principale robuste, ultrarapide et à grande capacité d'enregistrement ; 2°) sur l'égale nécessité de mettre au point des circuits électroniques alliant fiabilité et simplicité (c'est-à-dire finalement employant aussi peu de tubes à vide que possible) ; et 3°)

sur le fait qu'un moyen rapide d'acquisition et de restitution des informations (programmes, données, résultats traités), devrait être créé pour éviter que la machine ne se trouve trop ralentie par le fonctionnement intermittent de ses unités périphériques d'entrée et de sortie.

En ce qui concerne le type et les caractéristiques techniques de la mémoire principale de l'E.D.V.A.C., différentes pistes furent considérées mais à défaut de pouvoir disposer immédiatement d'autres solutions technologiques, les concepteurs de cette machine se prononcèrent en faveur d'un système existant à la robustesse déjà éprouvée, les lignes retard acoustiques au mercure. La capacité d'enregistrement de cette mémoire interne fit par ailleurs l'objet de discussions intenses. Eut égard à la longueur et à la complexité de certains problèmes en droit effectuels par des machines électroniques digitales à programme enregistrées, certains allaient jusqu'à défendre l'idée d'une capacité de 10000 mots informatiques... Plusieurs possibilités furent ici aussi envisagées et à la lumière des analyses préliminaires, il apparut en fait qu'une mémoire capable de stocker environ un millier de mots suffirait pour autoriser la résolution de très nombreux problèmes mathématiques dans des délais parfaitement raisonnables. On démontra en outre que la quantité de matériel nécessaire à la réalisation d'une telle mémoire serait peu ou prou équivalente à celle qui devrait être utilisée pour fabriquer le restant du système. Sachant cela, les spécialistes en électronique de la *Moore School* songèrent tour à tour à diviser cette valeur de référence par deux (on serait alors passé à environ 500 mots de capacité), et à la multiplier par le même chiffre (on serait donc passé à 2000 mots). Cependant ils se rendirent compte qu'une réduction de la capacité de la mémoire à 500 mots conduirait inmanquablement à un ralentissement important de la vitesse d'opération de la machine en n'offrant en tout et pour tout qu'une diminution de 25% de son encombrement matériel et de son coût de fabrication. A l'inverse une multiplication de cette même capacité de base par deux se serait traduite par un accroissement du volume de la mémoire de l'ordre de 50%, tandis que le coût de construction de cette dernière aurait subi une envolée à peu près similaire. Qui plus est la capacité de stockage ajoutée ici (toujours par rapport à la valeur de référence de 1000 mots), n'aurait été véritablement utile que dans un nombre très limité de problèmes...

La considération de ces différents facteurs quantitatifs détermina les concepteurs de l'E.D.V.A.C. à opter pour la mise au point d'une mémoire à lignes offrant une capacité d'enregistrement de 1024 mots informatiques. Compte tenu des différentes contraintes technologiques, mathématiques et économiques que ceux-ci s'étaient fixés pour bâtir la nouvelle machine électronique de la *Moore School*, cette valeur représentait assurément le meilleur des compromis envisageables entre les trois possibilités examinées. Au final la

mémoire principale de l'E.D.V.A.C. devait être composée de deux modules ou ensembles comportant chacun 64 lignes retard acoustiques – d'une longueur individuelle de 58 cm - pour une capacité globale de stockage de 1024 mots de 44 bits chacun¹⁰⁷⁷.

A côté de la mise au point d'une mémoire centrale vaste et robuste, une des préoccupations principales de l'équipe de la *Moore School* concernait nous l'avons dit la création de circuits électroniques simples, fiables et dans la mesure de ce qui était possible de faire à l'époque, standardisés. Pour parvenir à ce résultat, les ingénieurs s'efforcèrent de substituer dès qu'ils le purent des éléments de commutation à cristal de germanium, certes coûteux au départ mais extrêmement solides et performants, aux fragiles tubes à vides habituellement employés dans le domaine du calcul électronique. Certains circuits furent même réalisés sous la forme de modules intégrés enfichables, ce qui facilitait fortement leur maintenance ou leur remplacement en cas de panne. Une des conséquences les plus intéressantes et les plus surprenantes de cette volonté de parvenir à une fiabilisation optimale de la machine fut la décision de dupliquer son unité arithmétique et logique. Chaque opération logico-mathématique étant simultanément prise en charge par un jeu de circuits arithmétiques différents, elle était donc effectuée deux fois, ce qui au sortir du calcul permettait de comparer immédiatement les résultats obtenus selon un schème de juxtaposition préfixé afin de vérifier qu'aucune erreur n'avait été commise d'un côté ou de l'autre. D'autres mesures matérielles destinées à détecter les erreurs d'exécution, à déceler les fautes de codage ou encore à faciliter le débogage des programmes après coup furent encore prises par les développeurs de l'E.D.V.A.C. Ainsi, par exemple, un certain nombre de registres mémoire spéciaux à faible capacité furent intégrés dans le système qui permettaient de conserver la dernière et l'avant-dernière instructions exécutées de même que les identifiants numériques des emplacements mémoire à partir desquels celles-ci avaient été chargées.

Enfin, dernier point qui devait mériter toute l'attention de ceux qui travaillèrent à la construction de l'E.D.V.A.C. : le développement, à partir de l'année 1949, d'un dispositif d'entrée/sortie ultrarapide et extrêmement innovant. En lieu et place de recourir à des machines *Hollerith* à cartes ou à bandes perforées pour lire et écrire les données – comme le faisaient alors la très grande majorité des autres groupes engagés dans la fabrication d'un

¹⁰⁷⁷ En 1954 on adjoignit à l'E.D.V.A.C. un tambour magnétique d'une capacité de 4608 mots de 44 bits. Remarquons que le registre d'instructions de l'E.D.V.A.C. était peu étendu puisqu'il ne comptait que 12 ordres (sur 16 possibles). Chacun d'entre eux occupait un mot informatique. Les 44 bits ainsi disponibles étaient séparés en 5 champs distincts. Un premier emplacement de 4 bits était alloué au code de l'opération devant être réalisée tandis que les quatre champs restants de 10 bits étaient respectivement employés pour stocker les adresses de mémoire de ses deux opérands, l'adresse où devait être stocké le résultat, et l'adresse de la prochaine instruction à exécuter.

ordinateur – l'équipe de la *Moore School*, secondée ici par les gens du *National Bureau of Standards* et ceux de l'*Institute for Advanced Study*, se lança en effet dans la création d'un équipement périphérique à fil magnétique¹⁰⁷⁸ capable en droit de stocker quelques 20000 mots informatiques. En amont de toute opération, ou, si l'on préfère, hors-ligne, un convertisseur spécial équipé de deux télétypes - l'ensemble fut baptisé « *inscriber* » - devait permettre à des opérateurs de préparer le fil magnétique, c'est-à-dire d'y enregistrer le programme et les données devant être traitées ensuite par l'ordinateur sous la forme d'un code. Après que le système informatique ait travaillé, les données produites devaient être automatiquement enregistrées en sortie sur un périphérique à fil similaire à celui installé en entrée (cette dernière machine se nommait « *outscriber* »). Elles devaient ensuite être traduites par des moyens électromécaniques afin que les utilisateurs de l'ordinateur disposent d'une copie exploitable – autrement dit ici directement interprétable – des résultats finaux.

Si de très importantes difficultés techniques n'avaient pas empêché que le développement de cet instrument ne soit mené à terme, l'E.D.V.A.C. aurait certainement été doté des périphériques d'entrée/sortie les plus rapides de l'époque. En conséquence, et eut égard à des performances propres déjà élevées, il aurait peut-être été l'ordinateur le plus rapide de la période 1946-54. Malheureusement il n'en fut rien. Pour l'insertion des données l'équipe de la *Moore School of Electrical Engineering* dut donc se rabattre dans un premier temps sur un système à cartes très primitif puis, dans un deuxième temps, sur un lecteur de bandes perforées photoélectrique secondé par une machine à bande de marque IBM (capables respectivement de lire 1000 cartes par seconde et 100 cartes par minute). Quant aux sorties machines, elles devaient s'effectuer selon le cas sur une machine à ruban de papier, sur une imprimante télétype ou sur un perforateur de cartes IBM.

Bien qu'incomplet – mais quand même en mesure de fonctionner de façon rudimentaire – l'E.D.V.A.C. fut livré au *Ballistic Research Laboratory* de l'*Aberdeen Proving Ground* au mois d'août 1949. Différents problèmes techniques¹⁰⁷⁹ durent encore être résolus et certains perfectionnements apportés au système par les ingénieurs avant que celui-ci ne puisse être déclaré opérationnel. Ce fut enfin chose faite au début de l'année 1952. A ce moment, la charge de travail hebdomadaire de l'E.D.V.A.C. oscillait autour d'une vingtaine d'heure. Au fur et à mesure des années, celle-ci augmenta continûment. En 1960, soit huit ans après l'entrée en service officielle de l'ordinateur au B.R.L., celle-ci était ainsi passée à 145

¹⁰⁷⁸ Il s'agissait en l'occurrence d'un fil de bronze très résistant, recouvert d'une mince pellicule de nickel.

¹⁰⁷⁹ Par exemple, les circuits d'amplification des mémoires à lignes durent être revus. C'est aussi à cette époque que les travaux de développement sur les périphériques à fil *inscriber* et *outscriber* débutèrent.

heures (pour un délai moyen entre deux pannes d'environ huit heures). Comme tous les ordinateurs construits entre le milieu des années quarante et celui des années cinquante, l'E.D.V.A.C. était une machine aux dimensions et à la masse extrêmement imposantes. Elle pesait près de 8 tonnes, occupait une surface au sol légèrement supérieure à 44,5 m² et consommait environ 50 kW/h. Durant la journée, trois équipes composées de 30 personnes chacune étaient chargées de la faire fonctionner et d'assurer sa maintenance. Au total, la fabrication de l'E.D.V.A.C. nécessita l'emploi d'environ 30388 composants électriques ou électroniques répartis comme suit : 8000 diodes cristal, 3563 tubes à vide (de 19 types différents), 5500 condensateurs, 12000 résistances, et 1325 relais, transformateurs et bobinages électriques. Le coût du système basique, en dollars de l'époque, a été estimé à la somme de 467000 \$. Pour être tout à fait précis, il faudrait encore ajouter à cette évaluation les frais mensuels occasionnés par la location des machines électromécaniques IBM, lesquels s'élevaient à environ 159 \$. Au fur et à mesure que les années passèrent, l'E.D.V.A.C. fit l'objet de certaines améliorations technologiques. Nous avons déjà évoqué dans ce qui précède le rajout, en 1954, d'un tambour magnétique d'une capacité de 4608 mots informatiques. On pourrait également faire mention ici de l'adjonction d'une unité arithmétique spéciale dédiée à la réalisation des calculs en virgule flottante, en 1958.

Sans surprise, et dans la droite continuité de ce qu'ils avaient commencé à faire avec l'E.N.I.A.C., les scientifiques du *Ballistic Research Laboratory* employèrent l'E.D.V.A.C. pour réaliser essentiellement des travaux de nature militaire. Grâce à cette nouvelle machine électronique l'armée américaine se trouva en mesure de solutionner avec rapidité et précision des problèmes de balistique « extérieure » (calcul de trajectoires lunaires ou de trajectoires à très haute altitude, de tables de tir, de guidage d'engins sans pilote ou de missiles), des problèmes de balistique « intérieure » (étude du comportement dynamique des vecteurs continentaux ou intercontinentaux, des charges militaires offensives, du combustible des lanceurs, analyse des ondes de choc...), et encore des problèmes de balistique terminale (cinétique des explosions conventionnelles ou nucléaires avec étude des phénomènes de propagation ondulatoire et de fragmentation...). Elle utilisa aussi l'ordinateur de la *Moore School of Electrical Engineering* pour procéder à l'évaluation de systèmes d'armes sophistiqués (contre-mesures aériennes classiques et antimissiles), pour simuler des engagements guerriers à l'échelon tactique et stratégique (wargames), ou pour calculer les zones létales d'armes antipersonnel (mines) ou de missiles. Parmi la multitude de tâches qui furent confiées à l'E.D.V.A.C., on sait également que figuraient des calculs associés à l'optimisation des vols satellitaires.

Dans les années 1960-61, on se rendit compte que l'E.D.V.A.C. fonctionnait quasiment au maximum de ses capacités. Son temps de service restant semblait donc compté. Ceci était d'autant plus vrai qu'en 1957, le B.R.L. avait commencé à développer un ordinateur en partenariat avec le *National Bureau of Standards*, le B.R.L.E.S.C. (pour *Ballistic Research Laboratory's Electronic Scientific Computer*). Il avait alors été pronostiqué par les experts que ce nouveau système informatique deviendrait opérationnel dans le courant des années 1961-62. Quant ce fut chose faite l'E.D.V.A.C. demeura encore en service au moins une année, avant d'être déclassé.

1.2.2. Le *Standards Electronic/Eastern Automatic Computer* (S.E.A.C.) et le *Standards Western Automatic Computer* (S.W.A.C.).

L'importance sans précédent que prirent les mathématiques appliquées au cours de la deuxième guerre mondiale conduisit les responsables des principales organisations armées et scientifiques des Etats-Unis à prendre pleinement conscience du rôle essentiel qu'elles seraient désormais amenées à jouer dans la plupart des projets d'envergure nationale, que ceux-ci soient d'ailleurs de nature civile ou militaire. En 1947, sur la suggestion du Directeur de la Recherche Navale (*Naval Research*), un laboratoire national dédié aux mathématiques appliquées – le *National Applied Mathematics Laboratory* ou N.A.M.L. – fut donc créé au sein de l'U.S. *National Bureau of Standards*. Les domaines de compétences du *National Applied Mathematics Laboratory* étaient l'analyse statistique et l'analyse numérique. Le N.A.M.L. était divisé en grands quatre organismes principaux, lesquels étaient quasi indépendants les uns des autres. Le *Computation Laboratory*, le *Machine Development Laboratory* et le *Statistical Engineering Laboratory* étaient abrités dans les locaux du *National Bureau of Standards*, à Washington, tandis que l'*Institute for Numerical Analysis* était installé dans ceux de l'Université de Californie, à Los Angeles (U.C.L.A.).

Comme l'indiquent leurs désignations respectives, le *Standards Electronic/Eastern Automatic Computer* fut fabriqué sur la Côte Est des Etats-Unis, à Washington, tandis que le *Standards Western Automatic Computer* vit le jour sur la Côte Ouest, à Los Angeles. Etant donné le fait qu'ils furent construits l'un et l'autre à peu près au même moment par des laboratoires dépendant du *National Bureau of Standards*, on qualifie très fréquemment le S.E.A.C. et le S.W.A.C. « d'ordinateurs jumeaux ». Force est faite de reconnaître dans un premier temps que cette manière de considérer les choses n'est peut-être pas complètement inadaptée à la situation. De fait il existait entre les deux systèmes du N.B.S. un certain nombre

de ressemblances qui justifiaient sans nul doute que l'on procède à un pareil rapprochement. En insistant sur les similitudes, en soulignant les caractéristiques partagées et seulement celles-là, cette façon de faire a toutefois contribué à occulter les différences non négligeables - en tout cas nous apparaissent-elle comme telles - qui existaient également entre le S.E.A.C. et le S.W.A.C. Nous entendons à présent revenir sur l'histoire du développement de ces deux ordinateurs afin de montrer en quoi ils étaient effectivement proches l'un de l'autre, mais également en quoi ils se différençaient.

1.2.2.1. Le *Standards Electronic/Eastern Automatic Computer*, ou S.E.A.C.

A l'instar de l'E.D.S.A.C. en Grande-Bretagne, le S.E.A.C. fut le tout premier ordinateur à entrer en service opérationnel aux Etats-Unis. Cela se passait au mois de mai 1950¹⁰⁸⁰. Il n'est pas inutile de rappeler ici qu'à l'origine, et à la différence notable des grands centres de recherche universitaires américains comme le M.I.T., l'*Institute for Advanced Study* ou l'Université de Pennsylvanie, le *National Bureau of Standards* n'avait pas nécessairement vocation à construire des ordinateurs (même si par ailleurs il disposait d'une capacité d'expertise en électronique reconnue dans tout le pays). C'est un faisceau de circonstances somme toute assez complexe qui conduisit en réalité cet organisme d'état à s'engager dans cette voie pendant un certain temps.

Durant l'année 1947, l'U.S. *Bureau of Census*, en collaboration avec l'U.S. *Department of Army* et l'U.S. *Department of Air Force*, approcha l'*Eckert-Mauchly Computer Corporation* afin que la compagnie commerciale récemment fondée par les concepteurs de l'E.N.I.A.C. entreprenne la réalisation d'un ordinateur adapté à leurs exigences spécifiques¹⁰⁸¹. En ce qui concernait celles des forces aériennes, il s'agissait de mettre au point une machine digitale électronique pouvant être utilisée dans le cadre du projet S.C.O.O.P. (acronyme signifiant *Scientific COmputation of Optimum Problems*), un vaste programme de planification et d'optimisation logistique – ou de programmation linéaire si l'on préfère – initié à la suite des difficultés rencontrées pendant la deuxième guerre pour prendre en charge l'ensemble des opérations liées à l'acheminement des troupes et des matériels en direction des théâtres d'engagement. En raison de ses compétences, le N.B.S. reçut pour mission de contrôler et d'évaluer techniquement le contrat passé entre les différentes parties signataires. Cet accord commercial portait sur la fabrication de trois U.N.I.V.A.C., l'un devant être

¹⁰⁸⁰ Le S.E.A.C. fut complété un mois plus tôt, c'est-à-dire en avril 1950.

¹⁰⁸¹ Il devait en fait s'agir de l'U.N.I.V.A.C. I.

réceptionné par le *Census Bureau* et les deux autres par les armées. Assez rapidement toutefois d'importantes difficultés techniques se firent jour à l'E.M.C.C. qui eurent pour conséquence de ralentir notablement la construction de ces trois ordinateurs. Au regard des commanditaires militaires, de tels retards étaient évidemment insupportables.

Ils apparaissaient en tout cas tels aux yeux du Dr. George B. Dantzig, lequel œuvrait à cette époque en qualité de conseiller scientifique¹⁰⁸² à l'*Office of the Air Force Comptroller*. Pour Georges B. Dantzig, comme pour l'*U.S. Air Force* – une armée récente puisqu'elle fut créée rappelons-le au mois de juillet 1947 – disposer dans les délais les plus brefs d'un ordinateur comme l'U.N.I.V.A.C. faisait en effet figure de nécessité absolue. En raison de la nouvelle donne géostratégique, le maintien et l'approvisionnement en hommes et en matériels des multiples bases aériennes américaines disséminées sur la surface du globe représentaient un impératif absolu. Par son ampleur, sa complexité et son urgence, la tâche à présent dévolue aux logisticiens des forces armées américaines était il est vrai assez comparable à celle dont ils avaient eu à s'acquitter pendant la deuxième guerre mondiale. Toutefois des différences notables existaient par rapport à ce qui s'était passé à peine cinq ans auparavant. Ainsi les théâtres d'engagement potentiels commençaient-ils à s'étendre à l'intégralité de la planète alors même que la portée, les performances et le pouvoir destructeur des armements détenus par des nations adverses de plus en plus influentes sur le plan idéologique avaient ou bien étaient en train de faire l'objet de singuliers perfectionnements. Plus que jamais et à tous les niveaux, le temps jouait donc ici le rôle d'un facteur déterminant. Compte tenu de tout cela le traitement informatique des problèmes de recherche opérationnelle ne pouvait désormais plus être perçu autrement qu'à la manière d'un objectif absolument prioritaire par les militaires américains en général, et par les aviateurs en particulier. Or l'ordinateur représentait la précieuse et indispensable cheville ouvrière sans laquelle le programme S.C.O.O.P. et ses équivalents ne pouvaient commencer. En d'autres termes tout ralentissement enregistré pendant la phase de construction des deux U.N.I.V.A.C. destinés aux armées était susceptible d'avoir des répercussions non désirées, pour ne pas dire préjudiciables.

Dans le courant de l'année 1948, la situation était devenue à ce point incertaine à l'E.M.C.C. que G. B. Dantzig entreprit de convaincre les décideurs de l'armée de l'air américaine d'accorder un financement à l'*Applied Mathematics Laboratory* du N.B.S. pour

¹⁰⁸²Le Dr. Georges B. Dantzig est considéré comme l'un des principaux développeurs de la programmation linéaire. Il est par ailleurs le créateur de l'algorithme Simplexe, très souvent utilisé en recherche opérationnelle. C'est évidemment en tant que mathématicien spécialisé dans les questions d'optimisation de la prise de décision qu'il intervenait au sein de l'*Office of the Air Force Comptroller*.

que l'on y démarre au plus vite la fabrication d'un ordinateur intérimaire¹⁰⁸³ à architecture von Neumann. Ce système informatique devait en fait permettre aux gens de l'*Air Force*, de l'*Army*, et même du *Census Bureau* à commencer à travailler en attendant que la construction des U.N.I.V.A.C. soit enfin terminée. La perspective de développer et de pouvoir utiliser un ordinateur n'était pas non plus sans déplaire aux responsables du *National Bureau of Standards*, eux qui avaient tellement besoin d'une machine de ce type pour effectuer leurs propres recherches scientifiques. C'est pourquoi ils accueillirent la proposition (pressante) de G. B. Dantzig d'une façon extrêmement favorable. A l'origine l'ordinateur du N.B.S. reçut le nom de *National Bureau of Standards Interim Computer* (N.B.S.I.C.), mais par la suite cette appellation fut abandonnée et on lui préféra celle de *Standards Eastern Automatic Computer* (S.E.A.C.), très certainement en référence au S.W.A.C. dont la construction avait commencée à Los Angeles, en janvier 1949. Les principes directeurs qui présidèrent à l'élaboration du S.E.A.C. étaient peu nombreux, clairs, et en définitive assez élémentaires. Il s'agissait pour résumer de parvenir à concevoir un ordinateur simple et peu encombrant, de manière à pouvoir le terminer et le placer en opération dans les délais les plus brefs possibles. Contrairement à ce qui pouvait se passer partout ailleurs, ou presque, c'était donc l'efficacité qui était visée ici en priorité et non pas l'innovation technologique. Puisqu'on cherchait à s'en tenir toujours au strict minimum, tous les raccourcis théoriques, toutes les astuces techniques concevables et exploitables furent convoqués afin de répondre convenablement à cet objectif. L'adoption de ces règles entraîna pour le S.E.A.C. des conséquences aussi intéressantes qu'elles pouvaient être inattendues.

Ainsi par exemple, Samuel N. Alexander¹⁰⁸⁴ et son équipe de l'*Electronic Computer Laboratory* considéraient non sans raison que les tubes à vide étaient des commutateurs électroniques peu fiables, même quand ils étaient employés à des fréquences. Pour eux, il convenait de se dispenser de l'usage de ces dispositifs dès lors que la chose apparaissait possible. Entre la fin de la deuxième guerre mondiale et les derniers mois de l'année 1948, les progrès réalisés dans le domaine des composants électroniques – ou dans le secteur de la *Solid State Technology* pour reprendre l'expression américaine de l'époque - avaient été tels qu'Alexander et son groupe eurent la possibilité de recourir en masse à des composants très récemment mis au point : les diodes au germanium. En conséquence le nombre et l'utilisation que l'on fit des tubes à vide sur le S.E.A.C. furent limités – sur les quelques 2500 lampes

¹⁰⁸³ On employa effectivement ce terme à l'époque.

¹⁰⁸⁴ S. N. Alexander était le Directeur de l'*Electronic Computer Laboratory*, département du N.B.S. où le S.E.A.C. fut fabriqué.

effectivement présentes dans le système la majorité servirent de dispositifs amplificateurs – alors que l'on employa des diodes au germanium en très grande quantité. Une fois le S.E.A.C. achevé¹⁰⁸⁵, son unité arithmétique et logique et ses circuits régénérateurs d'impulsions ne comptaient en effet pas moins de 24000 diodes au germanium (contre 750 tubes à vide et 10000 diodes au tout début de sa mise en service). L'adoption et l'emploi massif de cette technologie firent du S.E.A.C. le premier ordinateur doté d'une logique entièrement à diodes. De façon à éviter toute prise de risque avec ces circuits, la fréquence de l'horloge interne du S.E.A.C. fut fixée à un mégahertz¹⁰⁸⁶.

Cependant et contrairement à ce qu'espéraient sans nul doute S. N. Alexander et ses collaborateurs, le fait de substituer en nombre les nouveaux éléments issus de la *Solid State Technology* aux fragiles lampes à vide n'élimina pas autant qu'ils l'auraient véritablement souhaité les problèmes de maintenance et de pannes intempestives qu'ils estimaient être inévitables avec les anciens composants radio. Alors certes il est vrai que les diodes ne « claquaient » pas sans prévenir, comme avaient fâcheusement tendance à le faire les lampes. Il est vrai aussi que l'ordinateur était quasiment utilisable dès qu'il était placé sous tension alors qu'avant de pouvoir commencer à programmer une machine composée de plusieurs milliers de tubes à vide il était toujours nécessaire de se livrer à la réalisation d'opérations contraignantes et/ou délicates, telle celle consistant à attendre avec patience que les lampes soient suffisamment montées en température... Malheureusement à cette époque les diodes, ou plutôt la manière dont elles étaient assemblées sous la forme de circuits, n'était pas non plus complètement exempte de défauts. Ainsi le S.E.A.C. ne souffrait-il pas de la fragilité de ses composants – au contraire ceux-ci étaient remarquablement résistants – mais de celles des soudures connectant ces derniers les uns aux autres... Dans un article paru en 1980 un des principaux collaborateurs de S. N. Alexander, Ralph J. Slutz, a décrit non sans une certaine forme d'humour les deux procédures de diagnostic quotidiennement appliquées par les opérateurs du S.E.A.C. avant que ceux-ci ne débutent toute computation avec leur ordinateur :

¹⁰⁸⁵ Les valeurs que nous avançons ici concernant le nombre de composants électroniques – lampes ou diodes – que comportait le S.E.A.C. sont celles rapportées par Martin H. Weik dans *A Survey of Domestic Electronic Digital Computing Systems*, rapport n° 971 édité en décembre 1955 par l'*Aberdeen Proving Ground Ballistic Research Laboratory*. Puisque cet ordinateur était officiellement entré en service en mai 1950, il avait depuis lors fait l'objet de constantes améliorations. Ceci explique qu'en fonction de l'année spécifiquement considérée, le nombre total de composants électronique du S.E.A.C. puisse varier.

¹⁰⁸⁶ Il eut pourtant été possible d'accroître assez sensiblement cette fréquence puisque l'immense majorité des composants du S.E.A.C. était composée de diodes et que celles-ci étaient tout à fait capables d'opérer à des vitesses plus élevées. Dans l'optique de limiter l'éventuelle survenue de problèmes liés à la surchauffe des composants, on choisit toutefois de maintenir cette fréquence à un mégahertz (à la façon de ce que l'on faisait avec les tubes à vide).

« *Nous avons en fait bien plus de problèmes avec les soudures défectueuses [des circuits à diodes] que nous n'en avons jamais eu avec les tubes, les diodes [elles-mêmes] ou les lignes retard. Je me souviens très bien que nous avons établis deux techniques standard de débogage. Après avoir réalisé les deux heures quotidiennes de maintenance préventive, nous lançons un petit programme de test [...] puis nous nous emparions d'un objet semblable à une cuillère de bois et commençons à faire le tour de l'ordinateur en tapant sur tout ce qui était visible. Si le programme de test s'interrompait, c'est que nous avons découvert quelque chose. Lorsque ce test était enfin passé, nous appliquons le « saut standard » du National Bureau of Standards. Nous nous trouvions dans un immeuble aux planchers en bois qui n'étaient pas très difficiles à ébranler, par conséquent le saut standard consistait à sauter en l'air à une hauteur d'environ 15 cm et à retomber sur le sol aussi lourdement que possible. Si le test était passé, la machine était prête à s'attaquer à un programme computationnel...¹⁰⁸⁷ ».*

La philosophie initialement adoptée au N.B.S. pour le développement du S.E.A.C. et qui consistait à produire cet ordinateur à la manière d'une machine simple vouée à devenir rapidement opérationnelle et à être tout aussi vite remplacée, détermina également la façon dont on façonna son jeu d'instructions. On ne chercha donc pas à la pourvoir d'ordres sophistiqués. Seules sept opérations de base furent ainsi implémentées: la multiplication, la soustraction, la division, l'addition (en virgule fixe), l'opérateur de comparaison, et les instructions d'entrée et de sortie. Au tout début on opta pour la solution consistant à structurer chaque instruction en cinq champs distincts. Ces différents emplacement logiques devaient permettre de recevoir 1°) le code de l'opération courante ; 2°) et 3°) les adresses de ses deux opérands ; 4°) l'adresse où le résultat de l'opération en cours de réalisation devait être stockée et 5°) l'adresse de la prochaine instruction à exécuter. Pour des raisons d'ordre techniques – celles-ci avaient en effet à voir avec la capacité d'enregistrement de la mémoire principale du S.E.A.C. et aussi avec les difficultés qu'auraient été contraints d'affronter les usagers de la machine dans le cadre de la préparation des bandes supportant leurs programmes – cette structure d'instruction voisine de celle du *Pilot A.C.E.* dut au final subir quelques aménagements *ad hoc*. On adjoint ainsi au système un module électronique spécial comportant dix commutateurs dont la fonction consistait à réaliser la bascule entre le schéma

¹⁰⁸⁷ R. J. Slutz, « Memories of the Bureau of Standards SEAC », in *A History of Computing in the Twentieth Century: A Collection of Papers from Los Alamos International Research Conference on the History of Computing*, Ed. Metropolis, Howlett et Rota, Academic Press, New York, 1980. Par ailleurs on sait aussi que les opérateurs du S.E.A.C. avaient connecté un amplificateur et des hauts parleurs sur un des principaux registres de la machine de sorte à être immédiatement alertés par une modification du flux sonore usuel si d'aventure quelque chose d'inhabituel se produisait.

d'instruction standard de la machine – soit un code opération plus quatre adresses – et un mode plus simple puisqu'il ne comportait plus que trois adresses. Cette disposition matérielle était doublement avantageuse: d'une part elle permettait de simplifier notablement la tâche des programmeurs de la machine et d'autre part, étant aisément supprimable, elle n'empêchait pas que l'on revienne à une utilisation systématique du schéma d'instruction ordinaire dans l'hypothèse où la capacité de la mémoire interne du S.E.A.C. se trouverait augmentée. A l'instar de tout le reste, cette dernière avait aussi été élaborée en fonction de la logique « minimaliste » qui avait prévalu pendant l'ensemble du processus de conception du système. Composée de 64 lignes retard acoustiques au mercure capables de stocker individuellement 8 mots informatiques de 45 bits chacun, sa capacité globale d'enregistrement culminait donc seulement à 512 mots (soit 23040 bits). A titre de rappel celle de l'E.D.V.A.C., son modèle architectural, était de 1024 mots de 44 bits, ce qui équivalait à deux fois plus.

Comme nous l'indiquons en ouvrant cette section consacrée aux premiers ordinateurs du *National Bureau of Standards*, le *Standards Electronic/Eastern Automatic Computer* fut présenté pour la première fois en avril 1950, c'est-à-dire un mois avant qu'il n'entre officiellement en fonction. Pendant les 14 années où il demeura effectivement en service, le S.E.A.C. fit l'objet d'améliorations techniques incessantes. La capacité de sa mémoire centrale fut progressivement augmentée – elle alla jusqu'à atteindre 2×1024 mots grâce à l'adjonction de lignes retard additionnelles et de tubes cathodiques – et peu à peu il reçut une chaîne de périphériques d'entrée/sortie intégrant un clavier de saisie, des lecteurs et des perforateurs de bandes papier de même que des lecteurs/enregistreurs de fil et de bandes magnétiques mono et multicanaux¹⁰⁸⁸.

Son accès étant strictement réservé aux personnels du N.B.S., aux membres d'autres agences gouvernementales, ou encore aux personnes accréditées issues de laboratoires universitaires travaillant pour le compte de l'état, le S.E.A.C. fut utilisé dans le cadre d'applications extrêmement variées – liées au domaine des mathématiques bien sûr, mais aussi à ceux de la physique, de la chimie et de l'ingénierie - et parfois fort novatrices. Parmi les nombreuses catégories de problèmes que l'on traita grâce à lui, on peut notamment citer le calcul de méthodes de Monte-Carlo pour la résolution de systèmes d'équations différentielles, la reconnaissance de patterns chimiques, le calcul des fonctions d'onde des atomes d'hélium

¹⁰⁸⁸ Les performances dont étaient capables ces différents dispositifs d'acquisition et de restitution de l'information étaient différentes les unes des autres. Alors que les lecteurs/perforateurs de bandes papier, en fonction de leur marque et de leur type, pouvaient lire et écrire entre 10 et 600 caractères par seconde (avec un pic maximal de 250 caractères par seconde en écriture), les instruments à bande dont certains étaient équipés de systèmes de préservation de l'information magnétique extrêmement sophistiqués, pouvaient traiter entre 65 et 4500 mots informatiques à la seconde.

et de lithium, la réalisation de computations liées à la conception d'un synchrotron ou celle regardant la fabrication de lentilles optiques de haute technicité, et de la programmation linéaire pour l'U.S. *Air Force*. On sait par ailleurs que Kenneth W. Ford, John A. Wheeler et John S. Toll, alors tous trois jeunes chercheurs au *Los Alamos National Laboratory*, rédigèrent en 1951 un programme informatique destiné à évaluer la puissance en mégatonnes de « Mike Shot », c'est-à-dire de l'explosion de la première bombe thermonucléaire américaine de l'histoire¹⁰⁸⁹, au moyen du S.E.A.C. A l'occasion, on se servit également de la machine du N.B.S. pour assurer la formation de nouveaux programmeurs.

Parmi les utilisations nouvelles qui furent faites du S.E.A.C. au cours de ses 14 années de service on peut entre autres choses possibles mentionner le développement, par les gens du N.B.S. *Electronic Computers Laboratory*, de nouveaux composants électroniques ainsi que des recherches en ingénierie effectuées dans le but de perfectionner le hardware de l'ordinateur lui-même. Mais ces deux réalisations dont l'intérêt est déjà en soi tout à fait remarquable sont en vérité fort loin d'épuiser la liste des « hauts faits d'arme » effectivement attribuables au S.E.A.C. Le statut spécifique du N.B.S. – celui d'une agence gouvernementale affranchie de toute contrainte commerciale et disposant de financements étatiques conséquents – permit aux scientifiques qui y travaillaient de s'engager dans des voies de recherche totalement novatrices à l'époque, et donc de concevoir des applications informatiques inédites. Outre le fait qu'après l'année 1956, le S.E.A.C. servit à réaliser des recherches en intelligence artificielle, en exploration d'espace des états ou bien en traitement automatique du langage, il représenta aussi une plateforme d'investigation technologique toute particulièrement mise à contribution.

Peu après avril 1954, mois correspondant à l'entrée en opération du D.Y.S.E.A.C.¹⁰⁹⁰, les gens du N.B.S. connectèrent ainsi le S.E.A.C. à la nouvelle machine qu'ils avaient mise au point à la demande des militaires américains. Capable de générer et de transmettre des instructions d'interruption temporaire de calcul, le S.E.A.C. pouvait envoyer au cours de ces

¹⁰⁸⁹ Ainsi que l'a récemment rapporté l'ancien directeur de l'*American Institute of Physics* Kenneth W. Ford dans un article tiré d'une conférence prononcée à Albuquerque le 15 octobre 2004, « *Working (and Not Working) on Weapons* ».

¹⁰⁹⁰ Financé et utilisé par l'U.S. *Army Signal Corps* mais construit au sein des laboratoires du N.B.S., le D.Y.S.E.A.C. (*Second Standards Electronic Automatic Computer* est le développement donné en général à cet acronyme), était un ordinateur comportant 900 tubes à vide, 24500 diodes et une mémoire à ligne retard d'une capacité de 512 mots de 45. Pesant une vingtaine de tonnes, cette machine militaire possédait une particularité absolument étonnante et inédite : il fut en effet installé à demeure dans un grand camion militaire. En dépit de sa masse proprement colossale, ceci fait très certainement du D.Y.S.E.A.C. le premier ordinateur portable de l'histoire. Ne manquons pas de préciser que le S.E.A.C. et le D.Y.S.E.A.C. furent branchés l'un à l'autre *avant* que les militaires ne prennent possession de ce dernier. Etant un ordinateur terrestre embarqué, donc mobile, la capacité du D.Y.S.E.A.C. à être mis en réseau avec d'autres instruments électroniques fut bien entendu exploitée par les militaires.

brefs intervalles commandés des fichiers en direction du D.Y.S.E.A.C. sans pour autant risquer de perturber les calculs que celui-ci était en train de réaliser, quelques millisecondes avant réception de l'ordre de cessation momentanée. Une fois la transmission de données achevée et le signal électronique de relance d'opération réceptionné, le D.Y.S.E.A.C. pouvait reprendre les calculs exactement là où il les avait arrêtés. Cette expérience constitue à notre connaissance une des toute premières tentatives de mise en réseau d'ordinateurs et par voie de conséquence d'opération informatique en temps partagé. Un autre exemple d'emploi très novateur du S.E.A.C. est assurément celui qu'en firent Russell A. Kirsch et son groupe de recherche du *National Bureau of Standards*, en 1957. Avec la machine du N.B.S. ceux-ci inaugurèrent et explorèrent les nouveaux domaines de la reconnaissance optique. Une des toutes premières images scannées de l'histoire de l'informatique fut à cette occasion réalisée au moyen d'un prototype de scanner équipé d'un tambour rotatif et d'un dispositif photomultiplicateur, que l'on avait relié au S.E.A.C. Pour l'anecdote cette image du reste assez connue consistait en fait en un portrait du fils nouveau-né de R.A. Kirsch. On se rendit ensuite assez rapidement compte que les données graphiques acquises numériquement (que celles-ci aient par ailleurs consisté en caractères alphanumériques, en représentations picturales ou photographiques ou bien encore en diagrammes formalisés de patterns moléculaires), pouvaient par la suite faire l'objet de multiples sortes de traitement automatisé (filtration, déformation, colorisation, etc.). Etant numérisées, c'est-à-dire réduites en dernier lieu à des séries de nombres binaires plus ou moins grandes, elles pouvaient être manipulées – et donc être modifiées, stockées ou identifiées – à l'instar de n'importe quelle autre suite numérique grâce à des algorithmes de transformation adéquats, le tout bien sûr aux vitesses exceptionnelles permises par l'électronique de l'ordinateur.

Une dernière avancée intéressante également faite dans le cadre de ces expériences précoces dans le secteur naissant de l'imagerie numérique, est assurément le dispositif de visualisation externe que Kirsch et son groupe conçurent et connectèrent à la mémoire à lignes retard du S.E.A.C. Composé, entre autres éléments, d'un staticizer¹⁰⁹¹ et d'un oscilloscope à tube cathodique, cet instrument permettait aux chercheurs du N.B.S. de se représenter directement ce que l'ordinateur, en quelque sorte, « voyait à l'intérieur ». Présentant aux programmeurs ce qui se passait au cœur même de la mémoire de la machine cet affichage graphique très rudimentaire (en tout cas à l'aune de ce que nous connaissons et utilisons au quotidien), devait autoriser les scientifiques à modifier leur approche et à

¹⁰⁹¹ Un staticizer est un convertisseur électronique permettant de passer d'un mode de stockage ou de représentation sériel à un mode parallèle.

perfectionner leurs algorithmes de traitement infographique puisqu'ils se trouvaient en mesure de vérifier directement les résultats des changements qu'ils apportaient à leurs procédures. Au cours de la fin des années cinquante et du début des années soixante, ce champ de recherche dont le S.E.A.C. constitua bel et bien l'outil essentiel connu encore d'autres ouvertures et d'autres avancées spectaculaires au *National Bureau of Standards*. Pour illustrer cela et clore cette section consacrée au S.E.A.C., on mentionnera le Dr. Georges A. Moore, de la N.B.S. *Metallurgy Division*, qui fut à l'origine des travaux fondateurs de la métallographie quantitative ainsi que les chercheurs Joseph Wegstein, Raymond T. Moore et John F. Rafferty, qui, eux, mirent au point des algorithmes de reconnaissance structurels dans la perspective de l'informatisation future des procédures d'identification d'empreintes au *Federal Bureau of Investigation*.

Initialement mis en chantier au *National Bureau of Standards* afin de combler une période de déficit en moyens informatiques censée durer jusqu'à la livraison des nouveaux systèmes produits par la *Remington Rand's UNIVAC Division*¹⁰⁹², construit en si peu de temps qu'il devint le premier ordinateur opérationnel aux Etats-Unis, composé pour l'essentiel de diodes électroniques et non plus de tubes à vides – chose qui représentait également une première mondiale - le *Standards Electronic/Eastern Automatic Computer* connut en définitive une carrière exceptionnellement longue et proluxe (14 ans !). En fait de machine intérimaire et rudimentaire, ce qu'elle était effectivement au départ, c'est un des systèmes les plus importants et les plus intéressants qui aient jamais vu le jour aux Etats-Unis, et ce tant à cause des innovations technologiques dont il fut le siège qu'en raison des avancées qu'il permit de réaliser dans le domaine de certaines applications informatiques (e.g. l'imagerie numérique et la reconnaissance optique). Assez fréquemment mentionné dans les écrits consacrés aux débuts de l'informatique, ce système et son histoire demeurent en eux-mêmes assez mal connus. A tort nous semble-t-il, pour l'ensemble de motifs qui ont été exposés dans ce qui précède. Une autre machine, présentée la plupart du temps et sans que cela soit véritablement fondé comme le système informatique jumeau du S.E.A.C., va maintenant occuper notre réflexion. Il s'agit du S.W.A.C., le deuxième ordinateur fabriqué au N.B.S.

¹⁰⁹² *Remington Rand* acquit l'*Eckert-Mauchly Computer Corporation* en 1950. C'est donc la nouvelle division U.N.I.V.A.C. de *Remington Rand* qui fabriqua l'ordinateur imaginé par J. P. Eckert et J.W. Mauchly.

1.2.2.2. Le *Standards Western Automatic Computer*, ou S.W.A.C.

Tout comme le S.E.A.C., son « frère jumeau » de la côte Est, la construction du S.W.A.C. fut décidée dans une certaine urgence afin de pallier au manque (alors préoccupant mais par le fait même tout à fait normal à cette époque), de machines informatiques puissantes qui frappait les sphères scientifiques et militaires. Le développement de cet ordinateur de taille intermédiaire qui un temps porta le nom de « Zéphyr » fut l'œuvre du *National Bureau of Standards Institute for Numerical Analysis* de l'Université de Californie, à Los Angeles (U.C.L.A.). Les lignes du projet S.W.A.C., un ordinateur de substitution construit à l'origine pour le compte de l'U.S. Navy¹⁰⁹³, se virent définies dans leur généralité en octobre 1948. Officiellement, les premiers travaux de fabrication concernant cette machine démarrèrent au mois de janvier de l'année suivante. L'intervalle de temps qui s'écoula entre la décision de construire le S.W.A.C. et la mise en chantier effective de ce dernier est à peu près équivalent à un trimestre. Cela est extraordinairement peu, surtout si l'on rapporte cette donnée aux longues périodes qui, pour des raisons diverses et souvent imprévisibles, furent nécessaires à la réalisation de l'E.D.V.A.C. ou du *Pilot A.C.E.*

A l'instar de ce qui était en train de se passer au même moment sur la côte Est, avec le S.E.A.C., la ligne directrice générale adoptée pour la conception du S.W.A.C. devait privilégier des solutions techniques simples. A nouveau, il s'agissait de mettre au point dans un laps de temps réduit et un contexte géostratégique incertain un ordinateur alliant simplicité et efficacité, c'est-à-dire un système informatique fiable, capable d'opérer de façon satisfaisante pendant une durée que l'on savait être a priori brève et limitée à quelques années. Là aussi donc, et dans un premier temps au moins, on ne devait réserver que fort peu de place à l'innovation technologique. Compte tenu de la logique sous-jacente qui commandait le projet S.W.A.C., les hommes du N.B.S. ne pouvaient guère se permettre d'opter en faveur de choix techniques audacieux. Ces derniers pouvaient bien paraître intéressants et prometteurs à plus ou moins long terme, il n'en demeurait pas moins qu'ils accroissaient en proportion le risque de voir survenir de façon imprévisible des ralentissements de toutes sortes. Or aucune espèce de retard ne pouvait être tolérée dans la fabrication d'une machine dont la création avait précisément été décidée afin de remplacer un ordinateur dont le processus de construction souffrait lui-même de ce mal. Reconnaissons-le, ç'eut été un comble s'il en avait

¹⁰⁹³ La Marine Américaine attendait alors impatiemment que la construction du *Raytheon Digital Automatic Computer* soit achevée. Cet ordinateur fabriqué par l'industriel *Raytheon* devait équiper le *Naval Air Missile Test Center* de Point Mugu, en Californie. Le S.W.A.C. fut co-financé par l'U.S. *Office of Naval Research* et l'U.S. *Office of Ordnance Research*.

été autrement. Le S.W.A.C. présentait quelques propriétés, dont certaines ayant à voir avec son architecture qui, loin d'en faire la copie conforme du S.E.A.C., ainsi que l'on semble trop souvent le croire, le différenciaient non seulement de l'autre ordinateur du N.B.S., mais également de la plupart des autres machines en cours d'élaboration sur le territoire nord-américain. A l'inverse du S.E.A.C. en effet, le S.W.A.C. ne fonctionnait pas en mode sériel mais en mode parallèle (une différence de taille qui à elle seule justifie que l'on ne présente pas cette machine comme la « jumelle » du S.E.A.C.).

Le choix d'une architecture parallèle pour le S.W.A.C. est pour l'essentiel imputable à l'homme qui reçut pour mission de diriger ce projet, Harry D. Huskey. Celui-ci avait jadis travaillé sur l'E.N.I.A.C. – un calculateur électronique à opération parallèle – aux côtés de J. P. Eckert, de J. W. Mauchly et de J. Von Neumann puis avait intégré le N.B.S. *Institute for Numerical Analysis* au mois de décembre 1948, après avoir passé une année en Grande-Bretagne (1947) à travailler à la construction du *Pilot A.C.E.*, variante simplifiée de l'ordinateur qu'Alan M. Turing avait imaginé pour le *National Physical Laboratory*. L'*Automatic Computing Engine* n'était pas à proprement parler un ordinateur parallèle mais son design impliquant une distribution des fonctions logico-mathématiques via un ensemble de « chemins » connectant sources, lignes retard de petite capacité, et destinations l'en rapprochait fortement. Fortement influencé par ses expériences passées à la *Moore School of Electrical Engineering* et au *National Physical Laboratory*, et appuyé dans son dessein par le directoire du N.B.S. qui ne souhaitait pas tout miser sur un seul et unique modèle logique (en l'occurrence celui de Von Neumann), H. D. Huskey préféra donc doter le S.W.A.C. d'une architecture parallèle. D'après le concepteur du S.W.A.T. : « *Le projet consistait ici à fabriquer un ordinateur en effectuant le minimum de développement possible au niveau de sa circuiterie. Ainsi les circuits de son unité arithmétique étaient dérivés de ceux du Whirlwind, et le développement des circuits de sa mémoire principale dépendaient fortement des travaux publiés par F.C. Williams, de l'Université de Manchester* ¹⁰⁹⁴ ».

¹⁰⁹⁴ Harry D. Huskey, "The National Bureau of Standards Western Automatic Computer (SWAC)," in *A History of Computing in the Twentieth Century: A Collection of Papers from Los Alamos International Research Conference on the History of Computing*, Ed. Metropolis, Howlett et Rota, Academic Press, New York, 1980. Démarré initialement au M.I.T. sous nom d'A.S.C.A. (*Aircraft Stability and Control Analyzer*) sous le couvert d'un contrat passé entre le *Servomechanisms Laboratory* du célèbre institut technologique américain et l'U.S. Navy, le projet *Whirlwind* naquit véritablement en avril 1946 lorsque l'on se rendit compte qu'un ordinateur digital électronique serait de loin préférable à un analyseur différentiel comme cœur de ce système de simulation aérienne. Financé par la *Special Devices Division of the Office of Research and Inventions* de l'U.S. Navy et conçu par Jay Forrester, le *Whirlwind*, ordinateur à fonctionnement parallèle et à mémoire à tubes Williams (jusqu'en 1953, année où on l'équipa d'une mémoire à tores de ferrite), fut pour la fois présenté en situation d'opération le 20 avril 1951.

En soi la décision de construire la mémoire principale du S.W.A.C. au moyen de tubes cathodiques Williams allait quelque peu à l'encontre de la philosophie précautionneuse qui guidait l'exécution des deux projets d'ordinateurs du N.B.S. En effet certains résultats afférents aux travaux de F.C. Williams concernant le stockage d'informations sur médium électrostatique avaient beau avoir été déjà publiés depuis un certain temps¹⁰⁹⁵, l'expérience qui avait démontré la validité de ce nouveau principe d'enregistrement informatique n'avait eu lieu que le 21 juin 1948, lorsque la *Manchester Baby*, machine spécialement conçue dans le but de tester les tubes Williams, avait exécuté avec succès son premier (petit) programme. Entre cette date et celle où l'on décida de la construction du S.W.A.C., il ne s'écoula environ que cinq mois, ce qui en réalité est fort peu. Dans de pareilles circonstances choisir de recourir à des tubes électrostatiques pour concevoir la mémoire centrale du S.W.A.C. représentait une solution technologique attrayante – notamment en raison des performances élevées que l'on pouvait attendre d'une mémoire à tubes cathodiques – mais également une prise de risque certaine (en raison de leur nouveauté et de la quasi absence de données concernant leur emploi en tant qu'instruments informatiques de stockage). Parfaitement conscients de ce problème mais tout autant désireux de voir le S.W.A.C. équipé d'une mémoire aussi novatrice et prometteuse que pouvait l'être un dispositif à C.R.T., les décideurs du *National Bureau of Standards* proposèrent donc de fabriquer cet ordinateur en le dotant de tous les circuits nécessaires pour l'équiper d'une mémoire principale à tambour magnétique dans le cas où le système d'enregistrement à C.R.T. ne donnerait pas entière satisfaction. Il s'agissait là d'une mesure préventive sage ne compliquant pas exagérément le design de l'ordinateur, qui garantissait que celui-ci pourrait être exploité quoiqu'il advienne.

Au mois de janvier 1949 les quatre techniciens et six ingénieurs formant l'équipe¹⁰⁹⁶ d'Harry D. Huskey commencèrent à œuvrer à l'élaboration du châssis du S.W.A.C. alors même que son design logique n'était pas encore terminé. L'expérience qu'Huskey avait accumulée en étudiant aux côtés des plus grands pionniers de l'informatique américains et britanniques se révéla payante puisque le travail qu'il réalisa sur l'architecture logique du S.W.A.C. n'eut pas à subir de révisions majeures pendant la construction de l'ordinateur. Il est vrai aussi que la petitesse du groupe de travail de l'*Institute for Numerical Analysis* et sa totale absence de compartimentation favorisaient considérablement les échanges entre ses

¹⁰⁹⁵ F. C. Williams déposa le premier brevet en rapport avec le principe du stockage d'informations binaires sur tube cathodique le mercredi 11 décembre 1946.

¹⁰⁹⁶ Outre H.D. Huskey, son leader, ce groupe de travail était notamment composé de H.T. Larson, R. Thorensen, M. Melkanoff, D. Lehmer, B. F. Ambrosio et E. G. Yowell.

membres¹⁰⁹⁷. Autant de choses, donc, qui contribuaient à diminuer le risque de voir apparaître des retards - évidemment fort indésirables - dans la conduite du projet. Hormis bien entendu le choix d'une architecture parallèle, une des choses les plus intéressantes concernant le S.W.A.C. fut l'adoption, pour l'élaboration de certains secteurs de sa circuiterie, de petites unités modulaires enfichables composées chacune d'une dizaine de lampes à vide. Il est sans aucun doute permis d'interpréter cette décision technique assez innovante pour la période comme une conséquence logique de ce qu'Huskey avait eu l'occasion de voir lorsqu'il était à la *Moore School of Electrical Engineering*. Quant une panne survenait sur l'E.N.I.A.C. réussir à en localiser l'origine - c'est-à-dire souvent détecter le tube électronique qui parmi des milliers d'autres avait failli - représentait en effet à chaque fois un véritable casse-tête et une perte de temps considérable. Huskey ne souhaitant tout simplement pas voir ce type de situations se reproduire avec le S.W.A.C., il décida par conséquent d'employer de petites unités intégrées facilement démontables, remplaçables et réparables. En plus de rendre plus aisée la maintenance de l'ordinateur, le recours à ces modules possédait cet avantage énorme d'aider grandement à la localisation des pannes car dans l'hypothèse où une seule lampe venait à faire brusquement défaut, c'est le module électronique dans son ensemble qui cessait de fonctionner. Or une unité composite amovible soudainement déficiente pouvait en général être découverte, démontée et remplacée en très peu de temps. Sa réparation pouvait être différée, sans que cela ne pénalise en aucune manière l'ordinateur. Une fois remis en état de fonctionnement l'élément retiré pouvait à son tour être utilisé en tant que pièce détachée. Le nombre de tubes qui composait le système informatique du N.B.S. avait beau paraître dérisoire au regard de celui que comptait l'E.N.I.A.C. - 2500 tubes d'un côté contre 17468 de l'autre ! - aucune précaution technique jugée digne de pouvoir jouer un rôle actif véritable dans la fiabilisation d'un ordinateur conçu en d'aussi brefs délais ne fut écartée par ses concepteurs. Au final et ainsi que nous venons de le noter, le S.W.A.C. devait être composé de 2500 lampes radio, auxquelles il convient encore d'ajouter 4000 diodes cristal.

Une autre décision obéissant à ces mêmes impératifs de rapidité de réalisation et de fiabilisation fut également prise concernant la mémoire du S.W.A.C. Initialement l'idée d'une mémoire parallèle à tubes électrostatiques dotée d'une capacité d'enregistrement de 1024 mots de 37 bits fut évoquée mais, face aux importantes difficultés techniques rencontrées lors de sa fabrication, on la révisa largement à la baisse. En lieu et place de 1024 mots on dut en effet se contenter d'une mémoire capable de stocker une quantité quatre fois moins importante

¹⁰⁹⁷ En ceci aussi, il semble qu'Harry D. Huskey ait parfaitement retenu la leçon apprise au *National Physical Laboratory*.

d'information. La raison de ce changement radical tient essentiellement au fait qu'au moment de se prononcer quant au type de tubes cathodiques qu'il conviendrait d'employer pour construire la mémoire du S.W.A.C., on préféra utiliser des dispositifs fabriqués en série, c'est-à-dire des tubes présentant l'avantage indéniable d'être déjà disponibles dans le commerce, plutôt que de prendre le risque il est vrai tout à fait réel de se lancer dans le développement potentiellement long et dispendieux de dispositifs électrostatiques fabriqués sur mesure. Malheureusement, cette façon de faire précautionneuse engendra au final bien plus de désagréments qu'elle ne se révéla apte à remplir sa fonction *a priori* vertueuse. En effet si l'on pouvait se procurer des C.R.T. du commerce très rapidement et à moindres frais (toutes proportions gardées cela va de soi), il n'était pas rare que la qualité de leur fabrication laisse à désirer. Les problèmes techniques sérieux auxquels furent confrontés les membres de l'équipe de Huskey lorsqu'ils créèrent la mémoire du S.W.A.C. tenaient ainsi à la présence de microparticules de tissu ouaté carbonisées, prises accidentellement dans la couche de phosphore de l'écran des C.R.T. lors de leur fabrication. Afin de s'assurer qu'ils n'étaient pas pollués par ces impuretés, il fallut donc tester systématiquement les tubes Williams que l'on désirait intégrer à la mémoire du système. Comme si cela n'était déjà pas suffisant, une autre difficulté majeure, toujours liée à l'utilisation de *Cathode Ray Tubes*, se fit aussi jour ici. Cette fois-ci, la complication n'était pas liée à la qualité du processus de production des tubes, mais à leur principe même de fonctionnement. La chose en cause était le *read-around problem*, un phénomène connu que nous avons examiné plus haut, dans la section consacrée aux mémoires informatiques. Pour rappel, le *read-around problem* avait tendance à se manifester quand le faisceau électronique du C.R.T. était trop longuement ou trop fréquemment orienté en un point singulier de l'écran et que les électrons qu'il y « laissait » se répandaient et s'accumulaient peu à peu dans les zones adjacentes à cette position. Or si F.C. Williams et son équipe étaient parvenus à surmonter ce problème (sans cependant l'éradiquer totalement), la solution qu'ils avaient mise au point pour l'ordinateur *Manchester Baby* n'était pas valide dans le cas du S.W.A.C., la mémoire de cette machine étant parallèle. Ces deux difficultés combinées ainsi que les délais draconiens auxquels les chercheurs du N.B.S. étaient de fait astreints les forcèrent à reconsidérer leurs ambitions initiales au sujet de la mémoire parallèle du S.W.A.C. La capacité d'enregistrement de cette dernière fut finalement ramenée à 256 mots. C'était évidemment très faible, y compris à l'aune des standards de l'époque (1024 mots informatiques étant la valeur que l'on rencontrait en général partout ailleurs). On mesure donc à quel point les commanditaires du projet S.W.A.C. s'étaient montrés avisés lorsqu'ils avaient exigé, à titre préventif, que ce système informatique soit dès le départ

équipé de toutes les ressources électroniques nécessaires au rajout hypothétique d'une mémoire principale à tambour magnétique.

Quant on acheva de le construire, en juillet 1950, le *Standards Western Automatic Computer* était le premier ordinateur à architecture parallèle et mémoire à tubes Williams à entrer en opération aux Etats-Unis. Avant que l'*Institute for Advanced Study Computer* ne le détrône, un an plus tard, le S.W.A.C. était également le système informatique le plus rapide du continent Nord-Américain. Son extraordinaire vitesse tenait évidemment à son architecture. Là où les ordinateurs de type Von Neumann effectuaient les transferts numériques nécessaires à telle ou telle computation sous la forme d'un train d'impulsions – c'est-à-dire de manière sérielle – le S.W.A.C., grâce à son parallélisme, déplaçait les données en un seul bloc. En incluant le temps d'accès au médium de stockage, il ne fallait au S.W.A.C. que 64 microsecondes pour réaliser une addition. Quant à la multiplication elle ne réclamait que 368 ms. Comparativement, et en prenant toujours en compte le temps d'accès à la mémoire principale de l'ordinateur, il fallait en moyenne à l'E.D.V.A.C. 864 ms pour faire une addition et 2880 ms pour une multiplication... L'écart séparant les performances de ces machines contemporaines était donc tout à fait net, au bénéfice de la moins célèbre des deux.

Comme avec le S.E.A.C., les contraintes de temps qui pesaient sur le développement du S.W.A.C. poussèrent ses concepteurs à opter pour un jeu d'ordres informatiques réduit ainsi que pour un schéma d'instructions simple. Seules huit opérations élémentaires furent implémentées dans la machine: l'addition, la soustraction, la multiplication en simple et double précision (sur un ou deux mots de la mémoire donc), la comparaison, l'extraction de données, et les ordres d'entrée et de sortie. Quant aux instructions, elles comprenaient quatre champs, ceux-ci correspondant aux emplacements prévus pour recevoir le code opérationnel de l'ordre courant, les adresses mémoire des opérands, etc. Etant donné la faible capacité de sa mémoire à tubes Williams et la longueur de ses instructions (37 bits), la complexité des programmes écrits pour le S.W.A.C. au cours de ses trois premières années de service fut limitée. Cependant on solutionna ce problème en 1953, en adjoignant à l'ordinateur un tambour magnétique alliant rapidité et grande capacité (8192 mots de 37 bits, soit 303104 bits). Plus tard, lorsque la technologie fut enfin au point, on substitua même une mémoire à tores de ferrite aux anciens C.R.T.

Le S.W.A.C. resta opérationnel jusqu'en 1967, époque où, comme on le sait, les ordinateurs entièrement transistorisés étaient devenus une chose courante. Au cours de ses 17 années de service – assurément un record de longévité technologique pour un *one-kind computer* dont les coûts de développement ont été évalués à 400000 dollars – le second

ordinateur du N.B.S. subit de nombreuses transformations matérielles, toutes évidemment destinées à augmenter sa vitesse d'opération et sa puissance de calcul. Hormis l'ajout d'un tambour magnétique et d'une mémoire à tores¹⁰⁹⁸, le système, au fil du temps, reçut des périphériques d'acquisition et d'impression électromécaniques I.B.M. (par exemple un tabulateur de type 402). Entre septembre 1959 et juin 60, à la faveur d'un transfert de l'installation informatique dans un autre bâtiment du campus d'U.C.L.A. l'unité d'alimentation du S.W.A.C et sa console furent modernisées. A cette occasion on procéda aussi à la rénovation de son tambour magnétique et l'on remplaça son bloc de refroidissement. Le genre d'applications réalisé avec le S.W.A.C. recouvrait largement le champ des différents travaux scientifiques effectués au N.B.S. *Institute for Numerical Analysis*. Il était alors ici essentiellement question de calculs mathématiques ou physiques de portée générale, ainsi que de recherches en méthodes d'analyse numérique. A la différence de ce qui se pratiquait parfois sur la côte Est avec le S.E.A.C.¹⁰⁹⁹, les usages faits du S.W.A.C. étaient donc tout entier tournés vers la sphère théorique. Parmi ceux-là on pourrait citer par exemple l'étude de problèmes à variables discrètes, l'analyse de la structure cristalline de la vitamine B12, la dynamique de croissance des gouttes de pluie, la simulation de trafic ou bien encore la détermination de nombres premiers de Mersenne (à l'aide du S.W.A.C., le mathématicien américain Raphael Robinson découvrit cinq de ces nombres en 1952). A la suite du démantèlement de l'*Institute for Numerical Analysis*, en 1954, le S.W.A.C. fut récupéré par l'Université de Californie de Los Angeles où on le maintint encore en opération pendant 13 années supplémentaires. Là, on s'en servit pour former les étudiants assistant aux classes d'informatique de l'Université. On l'utilisa également comme ordinateur secondaire, afin d'effectuer de la traduction de données pour l'I.B.M. 709 du *Western Data Processing Center* de l'U.C.L.A. *Department of Business Administration*.

¹⁰⁹⁸ Il n'est pas non plus exclu que le S.W.A.C. ait été équipé de deux lecteurs/enregistreurs de bandes magnétiques entre 1955 et 1960. Cette option était à l'étude au cours de la première moitié des années cinquante. Ce projet de rattachement est d'ailleurs mentionné dans le rapport n°971 du *Ballistic Research Laboratory*, publié au mois de décembre 1955 (page 165). A notre connaissance cependant, aucune preuve n'existe indiquant que ce fut effectivement le cas.

¹⁰⁹⁹ Rappelons que le S.E.A.C. fut par exemple employé afin de mettre à l'épreuve la fiabilité de nouveaux composants électroniques.

1.2.3. Le *Semi Automatic Ground Environment* : un réseau informatique de surveillance militaire intégré.

A la grande différence de l'ensemble des systèmes étudiés dans les sections précédentes, le *Semi Automatic Ground Environment* (souvent appelé S.A.G.E. *Air Defense System* ou plus simplement encore S.A.G.E.), *n'était pas* un ordinateur. C'était un réseau d'alerte aérienne intégrant à l'échelle du territoire des Etats-Unis de très importants moyens informatiques, radars, téléphoniques et militaires. Cette dernière catégorie de ressources comprenait d'ailleurs aussi bien des dispositifs matériels que des opérateurs appartenant à l'U.S. *Air Force*. C'est du reste à cette présence de l'humain dans la boucle de traitement de l'information et à son interaction permanente avec la machine que le terme « *semi automatic* », dans *Semi Automatic Ground Environment*, faisait explicitement référence. Les origines du S.A.G.E., ou plutôt des 26 paires d'ordinateurs I.B.M. AN/FSQ-7 *Combat Direction Central* et AN/FSQ-8 *Combat Control Central* qui formaient à la fois l'épine dorsale et les centres nerveux de ce gigantesque réseau de défense anti-aérienne, remontent aux deux dernières années de la deuxième guerre mondiale. A la fin de l'année 1943, les représentants de la *Special Devices Division of the U.S. Bureau of Aeronautics* avaient signé un contrat avec ceux du *Massachusetts Institute of Technology Servomechanisms Laboratory*. Cet accord concernait une étude de faisabilité, celle de la réalisation d'un simulateur de vol universel (*universal flight trainer*). A cette époque, le M.I.T. *Servomechanisms Laboratory* était incontestablement le centre de recherche leader en matière de développement d'équipements militaires de pointe. Créé en 1941, il ne comptait pas moins d'une centaine de personnes travaillant au développement de systèmes électromécaniques de calcul et de contrôle destinés à la conduite de tir (D.C.A., bombardement) ou à l'assistance au pilotage d'aéroplanes de combat (stabilisateurs de vol automatiques). C'est Jay W. Forrester qui hérita du projet de simulateur de vol et qui effectua la majeure partie de la réalisation de l'étude commandée par la *Special Devices Division* (S.D.D.). Au mois de mai 1945, alors que la guerre n'était pas encore terminée et que l'étude de Forrester avait été favorablement accueillie par la S.D.D., le M.I.T. proposa que le développement du simulateur de vol soit pris en charge par le *Servomechanisms Laboratory*. Compte tenu du contexte de guerre, cette proposition fut promptement acceptée par les militaires, lesquels confièrent aussitôt une enveloppe de 875000 dollars à Forrester pour qu'il puisse commencer à travailler sur le projet A.S.C.A. (pour *Airplane Stability and Control Analyzer*). C'est à ce moment qu'il réunit les membres de son

équipe, parmi lesquels son assistant et bras droit, le futur président de la MITRE *Corporation*, Robert E. Everett. Au fur et à mesure que le travail sur le simulateur de vol progressait, une difficulté majeure commença à se faire jour qui n'avait rien à voir avec la cellule aéronautique proprement dite, mais avec son dispositif analogique de contrôle et de calcul. En effet toutes les computations et les réponses motrices du système devaient être effectuées ici en temps réel, sans temps de latence perceptible, de façon à ne pas fausser les sensations du pilote. Or il apparut rapidement à Forrester et à son équipe que de telles performances ne pourraient jamais être atteintes en employant un calculateur analogique électromécanique. Conscient du nœud gordien que représentait cette question et du fait que seule sa résolution permettrait de continuer à progresser, le scientifique américain se mit alors en quête d'un moyen de calcul alternatif.

C'est un jeune étudiant diplômé du M.I.T., Perry Crawford, qui, le premier, attira l'attention de J. W. Forrester sur la possibilité d'utiliser un ordinateur digital en guise de système de contrôle et de calcul en temps réel pour son simulateur de vol militaire. Nous étions alors en 1945 et aucune machine de ce genre n'avait encore été construite. Les choses commencèrent à s'accélérer à partir de ce moment précis. Au mois d'octobre le *National Defense Research Committee* (N.D.R.C.) organisa une conférence au M.I.T. sur le thème des techniques de calcul avancées (*Advanced Computational Techniques*). Les deux hommes y assistèrent et c'est à cette occasion qu'ils se commencèrent à se familiariser avec la technologie de l'E.N.I.A.C. et du projet E.D.V.A.C., deux instruments de calcul digitaux révolutionnaires imaginés et/ou conçus par les chercheurs et les techniciens de la *Moore School of Electrical Engineering*. Au cours de l'été suivant, R.E. Everett et P. Crawford participèrent aux *Moore School Lectures on Theory and Techniques for Design of Electronic Digital Computers*, le premier en tant qu'étudiant, le second comme conférencier. L'intitulé de l'intervention de Crawford – la 32^{ème} sur l'ensemble des 48 exposés que comptait le cycle estival – était « Application of Digital Computation Involving Continuous Input and Output Variables ». L'application de méthodes de calcul digitales à des problèmes à variables d'entrée et de sortie *continues* dont il était question ici avait évidemment à voir avec l'emploi de machines à calculer numériques dans le cadre de la réalisation d'applications opérant en temps réel. Quatre mois avant la tenue de cet événement séminal de portée internationale, J. W. Forrester avait déjà fait parvenir à la *Special Devices Division of the U.S. Bureau of Aeronautics* une proposition qui demandait à ce que le contrat liant cette organisation au *Servomechanisms Laboratory* fasse l'objet d'une révision. L'accord devait désormais permettre le développement d'un calculateur digital électronique universel en lieu et place de

celui d'un instrument analogique. Selon Forrester l'ordinateur était beaucoup mieux adapté, en termes de puissance et de vitesse, pour servir de centre de calcul et de contrôle en temps réel au simulateur que ne l'était le dispositif électromécanique initialement envisagé. La demande de Forrester fut encore une fois reçue favorablement par la S.D.D. et le projet *Whirlwind* put ainsi officiellement démarrer quelques temps après, fort d'un budget initial s'élevant à 1,9 million dollars (une somme quatre fois plus importante que celle allouée au développement du simulateur de vol lui-même !). Nous avons déjà largement évoqué l'épopée du *Whirlwind* de même que les nombreuses péripéties qui émaillèrent, voire qui mirent lourdement en péril son existence, dans la section dédiée à l'invention et au perfectionnement des mémoires à tores de ferrite. Nous n'aurons donc pas besoin ici de revenir sur le détail de ces faits et nous pourrions nous contenter d'en rappeler seulement les grandes lignes.

L'ordinateur qu'entendait construire Jay W. Forrester devait être un véritable Léviathan d'acier et verre – y compris en cette époque où tous les systèmes informatiques étaient titanesques - capable d'effectuer quelques 50000 opérations élémentaires par seconde. Ce nombre, aujourd'hui, ne signifie peut-être plus grand-chose pour nous mais en 1947-48, il faut se souvenir que la fourchette de performances dans laquelle se situait la totalité des ordinateurs en cours de réalisation allait de 1000 à 10000 opérations de base par seconde. L'ambition de Forrester, entièrement commandée par l'impératif consistant à concevoir un système capable de travailler en temps réel, était par conséquent de disposer d'un ordinateur 50 fois plus rapide que les machines les moins performantes du moment... En outre, et puisque que l'objectif poursuivi ici était le contrôle d'un système dynamique en temps réel, la machine se devait d'être d'une exceptionnelle fiabilité. Les conséquences d'une panne informatique soudaine dans ce type d'applications pouvaient en effet être bien plus contrariantes que celles entraînées par la rupture d'un élément électronique lors de la réalisation d'une « simple » tâche mathématique. Compte tenu du caractère déterminant de ces contraintes, l'architecture Von Neumann et les matériels employés presque partout ailleurs pour élaborer la mémoire centrale des systèmes informatiques (*i.e.* les lignes retard acoustiques), ne pouvaient pas faire l'affaire ici. S'il on l'avait bâti selon ces lignes technologiques « classiques », le *Whirlwind* aurait en effet été beaucoup trop lent et insuffisamment fiable pour remplir correctement la mission spécifique qu'on lui avait assignée. Une architecture parallèle fut donc choisie tandis que l'on décidait de recourir à des tubes électrostatiques spéciaux pour fabriquer sa mémoire principale. En 1946-47 cette idée était encore neuve et par conséquent, de gros efforts de développement et de mise au point restaient à faire. Tout cela évidemment devait coûter très très cher : le groupe qui travaillait à

la conception du *Whirlwind* comptait ainsi une centaine de personnes et chaque mois, il absorbait approximativement la somme de 100000 dollars.

Pour Forrester et les membres de son équipe du M.I.T., l'année 1947 se termina de façon nettement moins encourageante qu'elle n'avait débutée. Le processus de réorganisation institutionnelle qui s'était amorcé aux Etats-Unis au terme de la seconde guerre mondiale avait en effet fini par toucher les organismes bailleurs de fonds de la recherche militaire, ce qui, compte tenu des sommes colossales engagées ici, ne laissait rien augurer de bon pour le *Servomechanisms Laboratory*. Jusqu'alors placé sous la responsabilité exclusive de la *Special Devices Division of the U.S. Bureau of Aeronautics*, le financement du projet *Whirlwind* allait désormais dépendre de plus en plus de l'*Office of Naval Research* (O.N.R.). En soi ce remaniement et les passages de relais inter organisationnels que de fait il occasionnait n'étaient pas forcément dérangeants. Ce qui en revanche était véritablement préoccupant pour l'ensemble des structures universitaires ou industrielles bénéficiant des largesses financières des commanditaires militaires, c'est qu'il s'accompagnait de coupes franches radicales dans les budgets alloués¹¹⁰⁰. La politique qui avait prévalu pendant le conflit mondial et qui avait consisté à financer en masse et à hauteur de centaine de milliers, voire de millions de dollars, des programmes de recherche liés au secteur de la défense n'avait désormais plus de raison d'être. La guerre finie, les « crash projects » n'étaient plus à l'ordre du jour et les habituels bailleurs de fonds militaires entendaient à présent se montrer beaucoup plus regardants qu'autrefois quant à la destination, l'importance et l'usage fait des budgets qu'ils avaient tout pouvoir d'attribuer ou de proroger. L'*Office of Naval Research*, organisme promoteur et financeur des programmes scientifiques et technologiques de l'*U.S. Navy* et de l'*U.S. Marine Corps*, avait intégré cette nouvelle règle de fonctionnement et cherchait maintenant à l'appliquer.

En 1948 il n'existait encore aucun ordinateur en état d'opérer sur le territoire des Etats-Unis. Les projets de machines étaient certes nombreux, au moins autant que les acteurs institutionnels, industriels ou militaires impliqués à un degré ou à un autre dans leur réalisation. Ce que l'on savait néanmoins avec certitude, c'était que les coûts de recherche et de développement liés aux travaux de conception de cette catégorie d'instruments étaient très élevés (ainsi que l'E.N.I.A.C., qui n'était pourtant qu'un calculateur électronique, l'avait clairement illustré). Cependant, comme aucune machine n'avait encore été terminée, il demeurait difficile de se faire une idée précise des sommes d'argent effectivement nécessaires

¹¹⁰⁰ Ainsi le budget de la *Special Devices Division* chuta-t-il à 5 millions de dollars pour l'année fiscale 1948 alors qu'il était de 11 millions l'année précédente.

à la fabrication complète d'un tel instrument de calcul. Ce manque relatif d'éléments de comparaison ne devait toutefois pas empêcher les responsables de l'O.N.R. de prendre très rapidement conscience du caractère exorbitant des dépenses liées au développement du *Whirlwind*. Des études effectuées par des représentants de l'O.N.R. firent ainsi apparaître que l'ordinateur que Forrester et son équipe étaient en train de concevoir au M.I.T. *Servomechanisms Laboratory* engloutissait à lui seul un dixième de son budget consacré aux contrats de recherche. Or en 1948-49, le *Whirlwind* était loin d'être le seul système informatique à bénéficier de l'appui financier de la marine de guerre américaine¹¹⁰¹. L'O.N.R. sponsorisait également le CALDIC (*California Digital Computer*, avec l'Université de Californie), le NAREC (*Naval Research Electronic Computer*, avec le *Naval Research Laboratory*), et le N.O.R.C. (*Naval Ordnance Research Calculator*, en partenariat avec I.B.M.). Enfin, *last but not least*, l'O.N.R. était aussi associé à la réalisation de l'ordinateur de l'*Institute for Advanced Study*, machine informatique dont le principal maître d'œuvre n'était autre que l'illustre John Von Neumann. Or aucun de ces projets, pas même l'ambitieux I.A.S.C. de Princeton, ne coûtait aussi cher que le *Whirlwind*. Dans la majorité des cas les budgets de fonctionnement constatés étaient inférieurs à un demi million de dollars – à vrai dire ils s'échelonnaient quasiment tous entre 300 et 600000 dollars - tandis que les effectifs composants les équipes de développement dépassaient rarement la trentaine d'individus. Il y avait là une disproportion manifeste que ni la sophistication du *Whirlwind* ni l'usage que l'on entendait finalement en faire ne pouvaient continuer à justifier (ceci étant tout spécialement vrai en raison du fait que la question se posait à présent en temps de paix).

Graduellement le soutien apporté par l'O.N.R. au *Whirlwind* se réduisit en peau de chagrin, au point même qu'à la fin de l'année 1948, les sommes attribuées à ce projet furent menacées de subir une amputation de près de 40%. Les talents de négociateur et la combativité exemplaire de Forrester permirent toutefois d'éviter momentanément la débâcle. Usant d'un argument dans le fond assez similaire à celui qu'avait employé le Dr. R. V. Southwell quelques années avant, lorsqu'il s'était agi pour lui de défendre l'idée de l'A.C.E. devant les membres du Comité Exécutif du N.P.L, Forrester présenta le *Whirlwind* aux décideurs de l'O.N.R. non plus comme l'onéreux élément de contrôle de simulateur aérien qu'il était pourtant censé être, mais plutôt comme un système de contrôle de tir et la possible pierre angulaire d'un futur système défensif d'envergure nationale.

¹¹⁰¹ L'O.N.R. finançait en fait le développement d'une douzaine de machines à travers le pays.

Coauteur en 1947, d'un rapport intitulé « Information Systems of Inter-connected Digital Computers¹¹⁰² », J. W. Forrester avait en effet peu à peu cessé de voir le *Whirlwind* à la manière d'un « simple » composant de simulateur et il le considérait à présent comme l'hypothétique centre nerveux d'un vaste réseau informationnel militaire. Puisqu'il était démontré et admis qu'un système informatique digital opérant en temps réel pouvait être substitué à un instrument analogique dans le cadre du contrôle d'une application hautement dynamique – ici une simulation de vol – rien en droit ne s'opposait à ce que la même chose fut faite partout ailleurs où l'effectuation *en direct* du même type d'opérations était requise. Ce qui était valable pour l'A.S.C.A. semblait donc valoir virtuellement pour n'importe quel autre système militaire intégrant un ou plusieurs éléments de conduite automatisée. Et bien entendu, dans les forces armées, ce type de dispositifs ne manquait pas. On en trouvait dans l'artillerie (aide mécanisée au pointage des cibles), l'aviation (simulation, assistance au bombardement), dans le domaine des missiles (guidage à distance), ou encore dans celui de la lutte anti-sous-marine. Suivant en cela certaines des idées visionnaires de P. Crawford, Forrester affirmait encore que des ordinateurs tels que le *Whirlwind* pourraient dans l'avenir constituer le cœur de grands systèmes militaires de contrôle intégrant aussi bien des capacités offensives que défensives¹¹⁰³.

A court, moyen et long terme la poursuite du financement du projet *Whirlwind* apparaissait donc comme une nécessité d'intérêt national aux yeux de ceux qui avaient directement en charge sa réalisation. A leurs yeux et à leurs yeux surtout car à l'*Office of Naval Research*, cette façon d'envisager les choses était bien loin de faire l'unanimité. Certains, au sein de cette institution, tendaient ainsi à penser que le *Whirlwind* n'était au fond rien de plus que ce qu'il était effectivement, c'est-à-dire un calculateur digital universel. Qu'il se soit agi d'un système ultrasophistiqué alliant une architecture parallèle à des composants fondamentaux extrêmement fiables dans leur majorité ne changeait en définitive rien à l'affaire. Pas plus du reste que sa capacité inédite à traiter en temps réel d'importantes

¹¹⁰² *Project Whirlwind Report L2*, J. W. Forrester, R. E. Everett, P. Crawford, to *Director of Special Devices Center*, « Information Systems of Interconnected Digital Computers », 15 Octobre 1947. Ce document fut précédé deux semaines auparavant par un premier rapport rédigé par Forrester et Everett. Dans celui-ci était abordée la question du possible emploi d'ordinateurs dans le cadre de la lutte anti-sous-marine (*Project Whirlwind Report L1*, J. W. Forrester, R. E. Everett to *Director of Special Devices Center*, « *Digital Computation for Anti-submarine Problem* », 1er octobre 1947).

¹¹⁰³ Jay W. Forrester et ses collaborateurs eurent tout le loisir de présenter leurs vues et de défendre leurs positions dans un document sur l'avenir des ordinateurs au sein des armées que le Directeur du M.I.T., Karl Compton, leur demanda de rédiger fin 1948 (Jay W. Forrester et Al. « A Plan for Digital Information-Handling Equipment in the Military Establishment », *Project DIC 6345*, MIT *Servomechanisms Laboratory*, 14 Septembre 1948). Ce document présentait entre autres choses un projet de vaste réseau de surveillance informatisé travaillant en temps réel. Le coût de sa construction, (étalée sur une période d'une quinzaine d'années), était estimé au bas mot à 2 milliards de dollars.

quantités de données... Parmi les cadres décisionnaires de l'O.N.R., nombreux en effet étaient ceux qui possédaient une formation de mathématicien. Et si ceux-là reconnaissaient sans problème aucun tout le bénéfice que l'on pouvait attendre de l'utilisation d'ordinateurs dans le cadre d'applications mathématiques, ils peinaient en revanche à percevoir la valeur que ces mêmes dispositifs étaient susceptibles d'avoir pour les opérations de contrôle. Pour les membres de la direction de l'O.N.R. le *Whirlwind* apparaissait donc de plus en plus comme un système informatique « normal », c'est-à-dire comme une machine digitale tout à fait semblable aux autres ordinateurs alors en chantier. Ce qui, pensaient-ils, le différençiaient vraiment de toutes les autres machines, c'était seulement son coût de construction faramineux. Au départ, il est vrai que le *Whirlwind* avait été spécialement conçu pour servir de plateforme de contrôle digitale à l'*Airplane Stability and Control Analyzer*. Progressivement toutefois les deux projets s'étaient découplés au point que maintenant, l'A.S.C.A. se trouvait délaissé au profit quasi exclusif du *Whirlwind*. Mais cette désolidarisation ou, si l'on préfère, cette autonomisation du projet *Whirlwind* possédait tout de même un revers de taille. Placé en dehors du système intégré dont il ne représentait au fond qu'un des constituants clefs, le *Whirlwind* apparaissait pour ainsi dire dans toute sa « nudité technologique ». En d'autres termes et pour les gens de l'*Office of Naval Research*, il s'agissait d'un ordinateur dont la principale caractéristique distinctive – à savoir la capacité à travailler en temps réel – ne pouvait désormais plus être tenue comme l'argument technique spécial justifiant à lui seul son coût exorbitant. Cela était d'autant plus vrai que les grandes difficultés techniques rencontrées dans le cadre de la mise au point de la mémoire électrostatique de l'ordinateur avaient contraint Forrester à réviser à la baisse ses prétentions de départ quant à la vitesse d'opération de la machine et à sa capacité de stockage. En lieu et place d'être capable d'effectuer 50000 opérations par seconde, le concepteur du *Whirlwind* espérait maintenant que celui-ci pourrait en réaliser 20000. Quant à la mémoire à tubes cathodiques, elle ne pouvait assurer le stockage que de 256 mots de 16 bits, ce qui représentait une très faible quantité de données, y compris au regard des standards de l'époque. Dans ces conditions on le comprend, la perspective de continuer à payer autant pour la mise au point d'une machine dont on savait que des spécimens étaient conçus en d'autres lieux pour 7 ou 8 fois moins cher¹¹⁰⁴, leur devenait de plus en plus intolérable. Cette situation délicate atteignit son point culminant au début de l'année 1950. Alors que Forrester, insatisfait du comportement par trop incertain de la mémoire à tubes électrostatiques du *Whirlwind*, s'était lancé dans de nouvelles (et onéreuses)

¹¹⁰⁴ Le coût final du *Whirlwind* a été estimé à 5 millions de dollars.

recherches sur le possible emploi informatique de matériaux ferromagnétiques – des travaux qui fort heureusement devaient déboucher sur la mise au point des premières mémoires à tores de ferrite – l'O.N.R. poursuivit et acheva le processus de désengagement qu'il avait initié deux ans auparavant vis-à-vis de l'ordinateur du M.I.T. Indice indubitable du caractère consommé de cette désaffection, si Forrester avait un moment suggéré à l'O.N.R. la somme de 1,15 million de dollars comme montant du budget de développement du *Whirlwind* pour l'année fiscale 1951, il n'obtint en tout et pour tout que 250000 dollars de la part de l'institution militaire... Le signal était on ne peut plus clair : le scientifique ne pouvait désormais plus compter sur le soutien financier de l'*Office of Naval Research*. A moins que la machine de soit amenée à la phase opérationnelle à plus ou moins brève échéance, le projet *Whirlwind* était par conséquent en train de vivre ses derniers mois.

Par un hasard que d'aucuns se hasarderont peut-être à qualifier d'heureux ce qui faillit coûter son existence au *Whirlwind* – très grande consommatrice de ressources financières et technologiques sa capacité à travailler en temps réel était bien sûr cause de tout – fut cela même qui, en définitive, non seulement le sauva, mais contribua également à en faire une véritable icône de l'histoire de l'informatique. Rendre véritablement compte de ce surprenant revirement de situation impliquerait que nous revenions ici de façon très détaillée sur le contexte géostratégique alarmant qui régnait la fin des années quarante. Cela nous entraînerait évidemment beaucoup trop loin. Nous nous contenterons par conséquent de rappeler brièvement deux ou trois faits historiques essentiels qui suffisent, par leur seule évocation, à entrevoir pourquoi le *Whirlwind* survécut à son abandon par l'O.N.R. Au mois d'août 1949, l'U.R.S.S. fit exploser sa première bombe nucléaire. Dans le même temps les services de renseignement américains acquirent la certitude que les soviétiques disposaient de vecteurs aériens conventionnels – notamment des bombardiers lourds Tupolev - capables de délivrer l'arme atomique en n'importe quel point du Etats-Unis, à commencer par leur région Nord. Craignant de plus en plus l'éventualité d'un assaut de grande envergure mené par la voie des airs et à basse altitude, les américains prirent conscience de la nécessité qui leur était faite de se doter au plus vite de réseaux de surveillance aérienne et de vecteurs d'interception performants. En décembre 1949 l'U.S. *Air Force* forma donc un comité spécial, l'*Air Defense System Engineering Committee* (A.D.S.E.C.), à la tête duquel elle nomma Georges E. Valley Jr., un Professeur de physique exerçant au M.I.T.

Le Comité Valley avait pour missions d'évaluer les spécificités de la menace soviétique et de recenser les mesures susceptibles d'être employées pour la contrecarrer. Il devait également proposer un plan général pour la réalisation future d'un réseau de défense

antiaérien moderne en Amérique du Nord¹¹⁰⁵. Un premier rapport fut rendu au cours de l'année 1950. Dans ce document l'A.D.S.E.C. faisait état de la totale inadaptation des moyens de surveillance existants face à la nature du danger actuel. Hérités du réseau défensif mis en place au cours de la deuxième guerre mondiale, ils comportaient en effet de nombreuses imperfections que la menace représentée par les bombardiers soviétiques rendait à présent totalement intolérables¹¹⁰⁶. D'autre part, et comme conséquence première de cet inquiétant constat de départ, l'A.D.S.E.C. prônait la mise en place d'un nouveau dispositif défensif intégrant des systèmes radars modernisés, des missiles air-sol à courte et moyenne portée, des intercepteurs rapides et des batteries de D.C.A. Tous ces moyens de veille et d'interdiction aérienne devaient être disséminés sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis. Enfin, et c'était là à notre sens la chose de loin la plus importante, ils devaient être interconnectés par liaison radio et téléphonique et commandés et coordonnés depuis des centres de contrôle *informatisés*. Compte tenu de la spécificité des opérations à réaliser (localisation, identification et suivi automatisés de cibles, mise en alerte et synchronisation des moyens de lutte antiaérienne, assistance à la suppression, etc.), la question, pour les membres du Comité Valley, consistait désormais à savoir quel ordinateur on pourrait envisager de placer au cœur de ces centres pour leur en confier une grande partie du contrôle.

C'est un collègue Professeur au *Massachusetts Institute of Technology* qui attira l'attention de G. E. Valley sur le projet *Whirlwind*. En tant qu'enseignant au M.I.T., le Président de l'A.D.S.E.C. avait bien évidemment déjà entendu parler du travail que Jay W. Forrester et ses collaborateurs réalisaient depuis la fin de la guerre au *Servomechanisms Laboratory*. Cependant, et d'après ce qu'il rapporta ultérieurement, Valley ignorait encore en 1949-50 que le projet initial de Forrester, à savoir un simulateur de vol militaire flanqué d'un instrument de contrôle analogique, s'était progressivement transformé en un système informatique digital indépendant. Les renseignements, rapports et autres échos auxquels Valley put avoir accès à ce moment au sujet de l'ordinateur *Whirlwind* avaient ceci en commun qu'ils se distinguaient tous par leur teneur plus ou moins négative. Souvent accusée d'être inutilement et exagérément sophistiquée, toujours critiquée en raison de ses coûts de développement astronomiques, c'est peu de chose d'affirmer ici que la machine conçue par

¹¹⁰⁵ A terme cela ne devait pas seulement concerner les Etats-Unis mais aussi le Canada (comme en témoigne précisément la structure de commandement double du *North American Aerospace Defense Command*, ou N.O.R.A.D.).

¹¹⁰⁶ Ce dispositif consistait pour l'essentiel en stations d'observation radar où l'information, une fois recueillie, était traitée manuellement avant d'être relayée en direction d'un centre de contrôle et de commandement. Ses deux principales faiblesses résidaient dans le fait 1°) que les stations étant éparpillées, le vaste secteur qu'elles étaient censées couvrir comportaient de nombreuses zones aveugles ; 2°) que le traitement manuel des données tactiques rendait leur exploitation opérationnelle en des délais acceptables extrêmement difficile.

Forrester ne bénéficiait pas d'une très grande popularité auprès des observateurs civils et du domaine. G. E. Valley, en dépit de cette majorité de commentaires et d'avis défavorables, décida de juger par lui-même et prit contact directement avec Forrester afin de convenir d'un rendez-vous. Ce dernier accepta de rencontrer le Professeur de physique, lequel put, par un hasard fort bienvenu, voir le *Whirlwind* en train de fonctionner puisque l'on commençait tout juste à le tester avec de petits programmes expérimentaux. Lors de cette première entrevue Forrester présenta également à Valley les deux rapports L1 et L2 qu'il avait signés avec ses deux principaux collaborateurs en octobre 1947 – nous faisons référence ici à « Digital Computation for Anti-submarine Problem » et à « Information Systems of Interconnected Digital Computers » - et qui concernaient des possibilités d'utilisation de machines digitales à des fins de contrôle en milieu militaire. Ceci, plus le fait que le *Whirlwind* se trouvait effectivement sur le point d'atteindre le statut opérationnel, convainquit G. E. Valley qu'il tenait très vraisemblablement avec le système du M.I.T. le cœur du futur réseau de veille et de lutte anti-aérienne américain. Le 6 mars 1950, le Président de l'A.D.S.E.C. prit donc part à une réunion de l'*Office of Naval Research* et profita cette occasion pour informer les représentants de la Marine que l'U.S. *Air Force* était prête à investir la somme d'un demi million de dollars dans le projet *Whirlwind* pour l'année fiscale 1951. Cet intérêt soudain mais bien réel manifesté par l'armée de l'air à l'égard d'un ordinateur auquel l'O.N.R. était en train de retirer son soutien financier fut à l'origine d'un changement d'attitude radical chez les membres de cette organisation. Alors que l'argent recommençait peu à peu à affluer dans les caisses du *Servomechanisms Laboratory*, les autorités militaires américaines mirent en place plusieurs commissions chargées, à l'instar du comité Valley, de compléter et de parfaire l'évaluation de l'efficacité des défenses anti-aériennes du pays et de réfléchir à de possibles solutions pour les améliorer ou les remplacer. Un de ces « think tank¹¹⁰⁷ », le M.I.T. *Project Charles*, travailla sur ces perspectives stratégiques tout au long du premier trimestre 1951. En guise de principale conclusion, il devait préconiser l'établissement, au *Massachusetts Institute of Technology*, d'un laboratoire de défense nationale appelé à travailler conjointement pour l'armée de terre, l'armée de l'air, et la marine de guerre. C'est de ce faisceau de réflexions que naquit le *Lincoln Transition System*, ambitieux programme technologique mené par le M.I.T. *Lincoln Laboratory* (anciennement *Lincoln Project*). L'objectif visait ici à réaliser d'importants travaux de recherche et de développement dans la perspective du prochain

¹¹⁰⁷ On pourrait également citer l'*Office of the Secretary of Defense Weapons Systems Evaluation Group*, qui oeuvra au début de l'année 1950 et encore l'*East River Study*, menée par des experts de l'U.S. *Air Force* et du *National Security Resources Board*, pendant l'été 1951.

déploiement d'un vaste réseau de lutte anti-aérienne *informatisé*. Le *Whirlwind*, seul ordinateur de l'époque capable d'opérer en temps réel, allait en former l'élément central. Le développement de ce système d'alerte et de défense informatisé à l'échelle continentale connut trois grandes phases. La première et la deuxième phase devaient correspondre respectivement au déploiement des deux systèmes dits de Cape Code (Massachusetts) en 1953 et en 1954, et la troisième à celui de l'*Experimental Semi Automatic Ground Environment Subsector*, en 1955 (l'appellation S.A.G.E. ayant été adoptée au cours de l'année 1954).

Le centre de commandement (*Direction Center*) de Cape Code fut mis en place en 1953. Il était composé du M.I.T. *Whirlwind* et de divers instruments interconnectés parmi lesquels des moyens radars, radiophoniques et téléphoniques, des convertisseurs de signaux analogique/digital et une trentaine de tubes cathodiques destinés à représenter en temps réel et sous une forme graphique rapidement interprétable les données réceptionnées depuis les différents systèmes de détection esclaves. Ses raisons d'être étaient 1°) de permettre le rassemblement d'informations préliminaires sur le fonctionnement général du dispositif intégré ; 2°) d'autoriser le repérage, l'identification et l'éventuelle correction de pannes ou de problèmes techniques. De manière à ce que l'ordinateur puisse continuer à travailler alors même qu'il était en train de recevoir des flux de données en provenance de ses antennes radars, on l'équipa d'un tambour magnétique spécial, une sorte de grosse mémoire tampon magnétique, chargé d'enregistrer les informations entrantes en attente de traitement. Cette solution se révéla si efficace qu'on la conserva par la suite. Il est à noter également qu'un programme expérimental comprenant environ 35000 instructions – un nombre tout à fait impressionnant pour l'époque - fut spécialement écrit par les ingénieurs de la *RAND Corporation* pour faire fonctionner le système de Cape Code.

Toujours construite autour du même ordinateur *Whirlwind*, la seconde version du système de Cape Code commença à opérer en 1954 ; elle différait essentiellement de la première installation en ceci que son réseau de suivi radar et ses dispositifs de mappage avaient fait l'objet de changements techniques permettant d'améliorer leurs performances. L'objectif poursuivi en premier lieu avec ce système revu et corrigé consistait à recueillir des données statistiques sur ses capacités opérationnelles et sa précision instrumentale. Les programmes ayant pour objet de faire fonctionner cet ensemble firent eux aussi l'objet d'importantes révisions. Enfin la construction d'un dernier centre de ce genre fut achevée en 1955, non loin de la ville de Lexington, dans le Massachusetts. Architecturé autour d'un

ordinateur I.B.M. AN/FSQ-7 C.D.C.¹¹⁰⁸, ce système défensif baptisé *Experimental S.A.G.E. Subsector* préfigurait par ses capacités avancées et ses équipements perfectionnés ce que seraient effectivement les nœuds de contrôle du *Semi Automatic Ground Environment* quelques années plus tard. Chargé de tester des programmes informatiques militaires, d'homologuer des procédures opérationnelles et de vérifier la fiabilité des instruments électroniques – bref de valider les processus et les technologies employées ici - cet ensemble voisin du système de base final intégrait notamment un dispositif d'acquisition et de suivi de cibles par ondes radar fournissant à l'ordinateur central des entrées identiques en nombre et en genre à celles normalement recueillies en conditions réelles d'exercice. Il comprenait également un appareil expérimental permettant d'assurer une liaison sol-air en temps réel entre le centre de décision informatisé et un appareil d'interception spécialement équipé pour cette occasion. Les informations collectées lors de cette ultime phase de test permirent d'apporter aux appareillages, logiciels et procédures opérationnelles concernés toutes les modifications que l'on estimait nécessaires avant le déploiement progressif des nœuds du S.A.G.E. sur le sol nord-américain.

L'ordinateur, ou plutôt les ordinateurs placés en opération au cœur des 23 centres de contrôle et 3 centres de combat formant le réseau militaire S.A.G.E. étaient des AN/FSQ-7 *Combat Direction Central* et des AN/FSQ-8 *Combat Control Central*. Qu'il s'agisse des AN/FSQ-7 CDC ou des AN/FSQ-8 CCC, il n'était pas rare que les spécialistes se réfèrent à ces systèmes informatiques en les appelant *Whirlwind II Intercept Computers* ou plus simplement *Whirlwind II*. Les AN/FSQ étaient en effet de quasi répliques du *Whirlwind*, l'ordinateur que Jay W. Forrester et ses collègues avaient conçu au M.I.T. Une fois l'épineuse question du financement du développement du *Whirlwind* réglée –celui-ci relevait à présent de la compétence de l'U.S. *Air Force* – Forrester eut toute latitude pour amener la machine jusqu'au stade opérationnel. Ce fut chose faite au printemps de l'année 1951. Le *Whirlwind* fonctionnait de manière globalement satisfaisante, c'était là un fait indéniable, mais il existait toujours une difficulté centrale sur laquelle les ingénieurs du M.I.T. ne cessaient d'achopper. Ainsi, non content de faire montre d'une fiabilité laissant à désirer, la mémoire à tubes cathodiques de cet ordinateur offrait une capacité d'enregistrement beaucoup trop limitée pour le type de tâche dont l'armée entendait lui confier l'exécution. Nous avons amplement commenté le contexte et les conditions d'apparition des matrices à tores de ferrite dans la

¹¹⁰⁸ AN/FSQ (pour *Army Navy / Fixed Special Equipment*), était le sigle générique que l'U.S. *Air Force* employait pour désigner la version de production du *Whirlwind*, ou *Whirlwind II*. Le sigle XD-N était quelquefois apposé à la suite de cette abréviation afin d'indiquer la version de l'ordinateur à laquelle on avait affaire. C.D.C. signifiait *Combat Direction Center*.

section que nous avons consacrée plus avant à l'évolution des mémoires informatiques. Rappelons seulement ici qu'entre 1947 et les années 1952-53, plusieurs chercheurs – Jay W. Forrester et William N. Papian au M.I.T., Jan Rajchman et Dudley Buch à la *Radio Corporation of America*, An Wang à l'Université d'Harvard et Frederick Viehe, inventeur indépendant travaillant au *Los Angeles Department of Public Works* – conçurent indépendamment l'idée des mémoires informatiques à tores de ferrite.

Si le *Harvard Mark IV* d'Howard Aiken fut le premier ordinateur à recevoir ce type de composants ferromagnétiques comme éléments de mémoire principale, en 1952, c'est bien le *Whirlwind* qui est resté dans les esprits tant le dispositif de stockage à matrices à tores tridimensionnelles imaginé par J. W. Forrester, W. N. Papian et K. H. Olsen¹¹⁰⁹ était capable de performances inhabituelles pour son temps. Le temps d'accès moyen à n'importe quel point de stockage offert par cette nouvelle mémoire à accès aléatoire de 32768 bits ou 2048 mots de capacité oscillait en effet entre 8 et 9 microsecondes ! Quant à sa fiabilité, elle était tout bonnement exemplaire. Autant dire qu'avec une mémoire principale affichant de telles caractéristiques, les objectifs de performances initialement planifiés par Forrester pour le *Whirlwind* – notamment l'exécution de 50000 opérations par seconde – pouvaient tout à fait être remis à l'ordre du jour. A l'été 1953, le *Whirlwind* fut modifié de sorte à pouvoir recevoir la nouvelle mémoire ferromagnétique. La mise à jour technologique de son dispositif d'enregistrement principal contribua assurément à faire de l'ordinateur du M.I.T. une nouvelle machine. Désormais, le *Whirlwind* pouvait être considéré comme suffisamment rapide et fiable pour que l'on commence en à produire les dizaines de répliques destinées au *Semi Automatic Ground Environment*.

Plusieurs grands groupes industriels américains furent alors contactés dans cette optique. Les représentants du *Lincoln Laboratory* visitèrent et évaluèrent tour à tour des sites de production appartenant à *Raytheon*, à la *Remington Rand*, à la *Radio Corporation of America*, à la *Bell Telephone Laboratories*, et à I.B.M. Peu intéressés, les *Bell Labs*, *Raytheon* et la R.C.A. déclinèrent l'offre qui leur était faite. Quant à la firme *Remington Rand*, après avoir racheté successivement l'*Engineering Research Associates* et l'*Eckert Mauchly Computer Company*, elle connaissait à ce moment précis une phase de profonde restructuration. La plus élémentaire des sagesses incitait donc à considérer ce réaménagement et les conséquences qu'il était susceptible d'entraîner pour l'ensemble de la ligne de

¹¹⁰⁹ Après avoir quitté le M.I.T., Ken H. Olsen a fondé la firme *Digital Equipment Corporation*, en 1957. Sa contribution aux matrices de Forrester consista surtout en la mise au point d'un circuit électronique permettant de réduire drastiquement la quantité d'électricité nécessaire pour les actionner.

fabrication comme bien peu compatibles avec l'urgence avérée de la situation. Après tout il s'agissait de produire des ordinateurs afin d'équiper les multiples nœuds d'un réseau d'alerte et de défense capable en droit de déjouer toute tentative d'agression soviétique par la voie des airs. Nul retard ne pouvait par conséquent être toléré dans sa mise en place, a fortiori de la part de l'industriel en charge de la production des copies du *Whirlwind*. Pour ces motifs, la *Remington Rand* se vit écartée du projet S.A.G.E. *Air Defense System* et c'est le géant I.B.M. qui fut choisi. En 1954, année où le contrat portant sur la fabrication des ordinateurs S.A.G.E. AN/FSQ-7 et AN/FSQ-8 fut signé, la firme présidée par Thomas Watson Sr. possédait déjà une solide expérience dans le domaine de la fabrication des systèmes informatiques. L'entreprise avait ainsi à son actif la production des I.B.M. modèles 701 (anciennement *Defense Calculator*), 702 (*Electronic Data Processing Machine* ou E.D.P.M.), et 650 (*Magnetic Drum Calculator*). Elle était par ailleurs en train de travailler à la mise au point du *Naval Ordnance Research Calculator* (N.O.R.C.) et à celle de l'*Electronic Data Processing Machine* 705, le successeur de l'E.D.P.M. 702. La mainmise durable et quasi incontestée d'I.B.M. sur le marché international du traitement de l'information, de même que sa puissance économique sans cesse grandissante, constituaient les indices les plus sûrs de son organisation sans faille et de ses capacités de réaction et d'adaptabilité. Elles traduisaient également la grande compétence de ceux qu'elle employait, qu'ils soient scientifiques, techniciens, administrateurs ou vendeurs (une fonction assurément déterminante dans une Amérique alors en voie d'informatisation). Progressivement un transfert de technologie fut donc opéré entre le M.I.T. *Lincoln Laboratory* et I.B.M. et les deux premiers exemplaires d'AN/FSQ-7, les systèmes XD-1 et XD-2, sortirent des chaînes d'assemblage de la gigantesque usine de Poughkeepsie. Une des deux machines devait être expédiée au M.I.T. tandis que la seconde allait rester sur place, à des fins de tests.

Les ordinateurs I.B.M. AN/FSQ-7 et AN/FSQ-8 - étaient des systèmes possédant des dimensions proprement gigantesques. A vrai dire, les experts s'accordent à dire qu'ils ont été les ordinateurs les plus gros jamais construits et mis en service au cours de ces soixante dernières années... Les descendants directs du *Whirlwind* opéraient qui plus est en mode duplex. Pour des raisons de sécurité évidentes et bien qu'en moyenne, les AN/FSQ ne soient tombés en panne qu'à peu près douze heures par an, chacun des 23 *Direction Centers* et 3 *Combat Centers* que comptait le *Semi Automatic Ground Environment* intégrait ainsi deux systèmes informatiques parfaitement identiques. Le caractère militaire des tâches informatiques réalisées ici exigeait une telle redondance. Tandis que la première machine traitait les informations en provenance de ses multiples antennes radar ou des autres centres

du S.A.G.E. auxquels elle était reliée, la seconde était placée en veille, toujours prête à prendre immédiatement le relais dans le cas où un dysfonctionnement ou une panne grave du système actif se produirait.

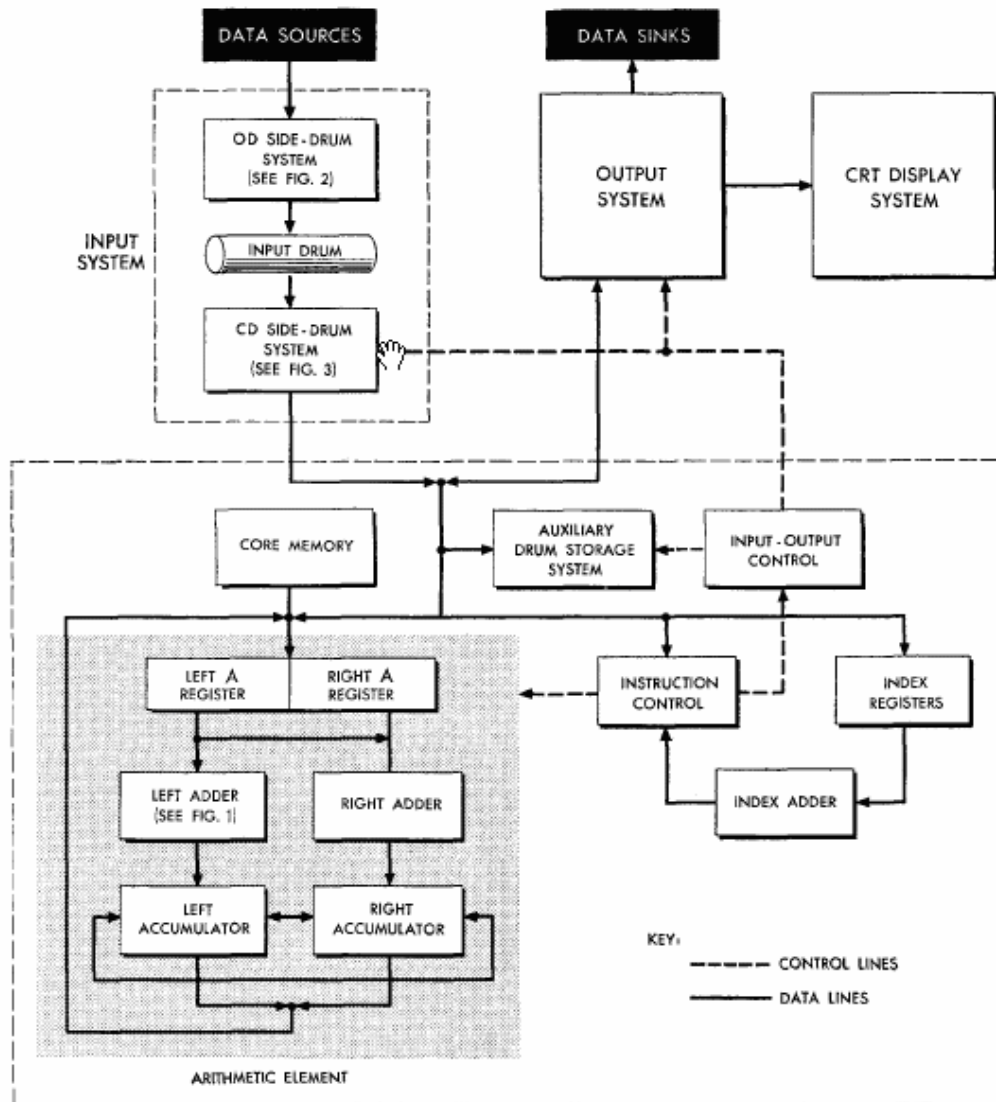


Fig. 5: diagramme de l'architecture logique des ordinateurs IBM AN/FSQ-7 et AN/FSQ-8. Illustration tirée de *Logical Design of the Digital Computer for the SAGE System*, IBM Journal, janvier 1957, page 82.

Chaque installation possédait donc deux ordinateurs, dont un de secours. Sachant que leurs multiples sous-systèmes étaient répartis dans les pièces d'immeubles ou de complexes souterrains comprenant plusieurs étages, ils occupaient au total une surface équivalente à 3600 mètres carrés. La masse totale du dispositif était de 275 tonnes, et sa consommation électrique atteignait 3000 kW. Le nombre impressionnant de composants électroniques ou magnétiques fondamentaux qui entraient dans la composition de chacune des paires

d'ordinateurs AN/FSQ permet également de se faire une idée du gigantisme qui était celui de ces machines: il y avait là environ 50000 tubes à vide, 170000 diodes, près de 700 transistors, et 4603904 tores de ferrite. Rappelons simplement que l'E.N.I.A.C., qui passait déjà pour un géant en son temps, n'était constitué « que » de 17468 lampes à vide...A l'instar du *Whirlwind*, leur archétype, les systèmes AN/FSQ fonctionnaient en *parallèle*. La longueur des mots informatiques qu'ils manipulaient était cependant deux fois plus importante que celle de la machine originellement créée par J. W. Forrester (soit 32 bits, plus un bit de signe). Ce format étendu, multiple de 2, autorisait un traitement plus rapide de l'information, une chose forcément profitable dès lors que l'on est amené à devoir traiter de nombreuses données en temps réel ou très légèrement différé.

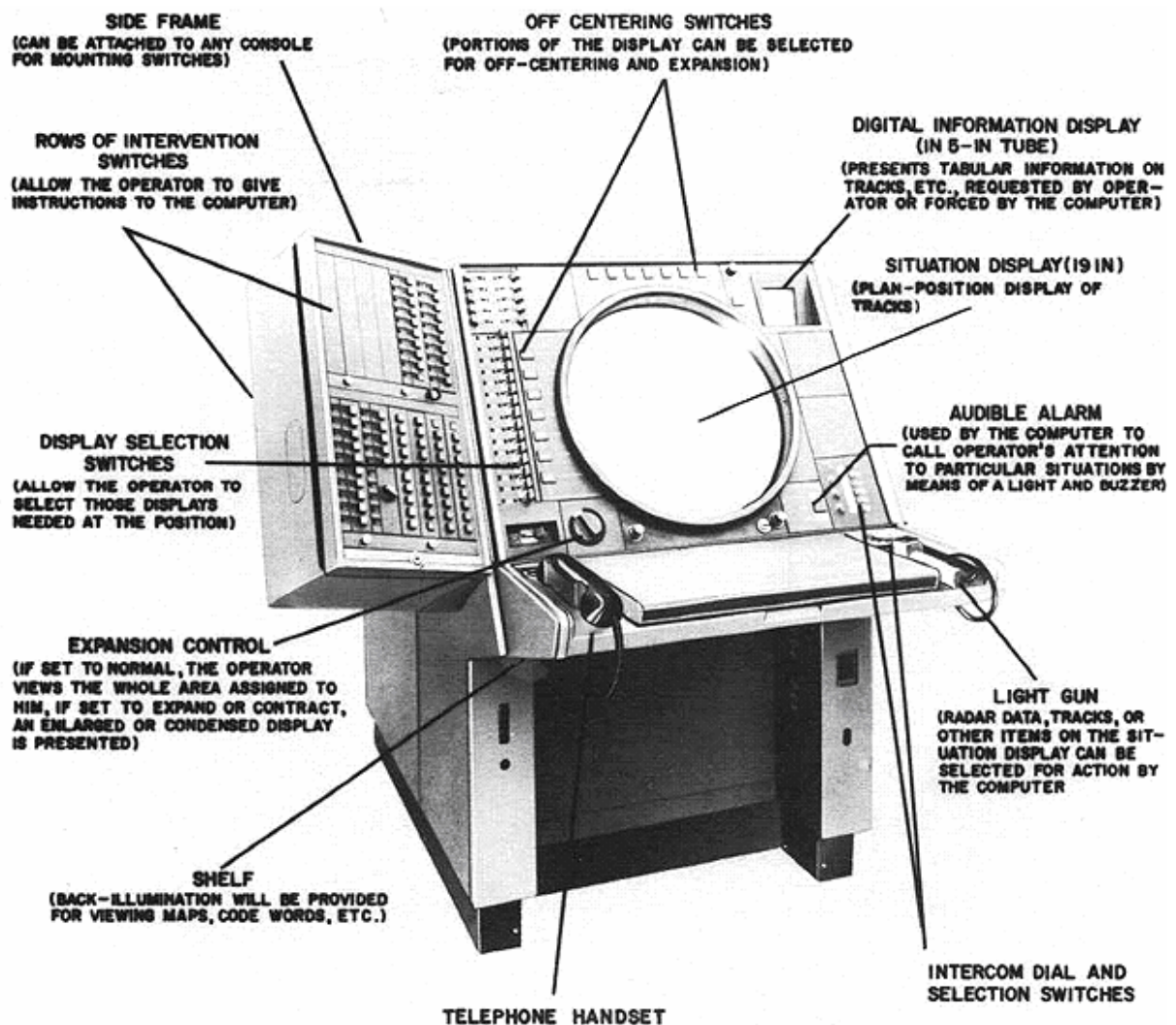


Fig. 6: équipement typique d'une *Situation Display Console* d'ordinateur AN/FSQ-7 du réseau S.A.G.E. Document graphique extrait de *Introduction to AN/FSQ-7 Combat Direction Central Central and AN/FSQ-8 Combat Control*, IBM Military Products Division, Kingston, New York, 1er janvier 1959 -15 mars 1965, chapitre 3, page 19. Ce document peut être téléchargé dans son intégralité à l'adresse suivante: <http://ed-thelen.org/SageIntro.html>.

Les ordinateurs du S.A.G.E. disposaient d'une mémoire à tores de ferrite ultrarapide – son temps d'accès moyen en cycle de lecture/écriture était en effet de 6 millisecondes - pouvant stocker 69632 mots de 33 bits, et de douze tambours magnétiques additionnels capables d'enregistrer au total 147456 mots de 33 bits. Ils étaient équipés de lecteurs de bandes magnétiques (il était possible de connecter jusqu'à 8 périphériques de ce type à l'ordinateur), offrant un taux de transfert assez remarquable puisqu'il était de 18750 caractères par seconde. Ils disposaient aussi de périphériques électromécaniques d'entrée/sortie tels que des lecteurs et des perforateurs de cartes, des télétypes et des imprimantes (notamment des modèles I.B.M. 717 et 720A). Chaque système informatique pouvait en plus de cela supporter jusqu'à 100 consoles équipées de tubes cathodiques de 19 et 5 pouces. Ces périphériques, dont nous présentons une illustration ci-dessus, comprenaient de très nombreux boutons et interrupteurs spéciaux. En plus d'être équipés d'un combiné téléphonique et d'une alarme sonore individuels, ils étaient également dotés en série d'un petit appareil de pointage optique tout à fait inédit baptisé à l'époque « pistolet lumineux » (*light gun* en anglais). Les AN/FSQ affichaient en temps réel sur ces dispositifs graphiques de surveillance les positions et les paramètres principaux (tels la vitesse, l'altitude, le numéro de plan de vol, etc.), de tous les engins volants localisés dans le secteur géographique placé sous leur surveillance. Les personnes placées derrière ces consoles avaient en permanence la possibilité d'utiliser leur *light gun* pour sélectionner la représentation graphique – en général un simple trait flanqué d'un identifiant numérique – d'un objet considéré (ou non) comme potentiellement suspect. Cette action, normalement, permettait de déterminer avec une plus grande précision la catégorie d'aéroplanes à laquelle appartenait ledit objet. La totalité des informations disponibles concernant ce dernier se voyait alors affichée sur le C.R.T. de l'opérateur requérant. Lorsque cette sorte d'évènements se produisait, l'ordinateur avait la possibilité de fournir automatiquement aux servants du système une aide à la décision, laquelle prenait usuellement la forme de suggestions de procédures de vérification et d'interception correspondant au type et à l'ampleur de la menace éventuellement détectée. Un seul centre informatique disposait des ressources humaines et technologiques suffisantes pour réaliser le suivi simultané de 300 vols et, le cas échéant, assurer la neutralisation voire la destruction de tout ou partie des appareils ainsi traqués. Tout envoi, de la part des forces aériennes soviétiques, d'une flotte de vecteurs stratégiques en direction de la région nord des Etats-Unis – une zone d'offensive quasi obligée en raison de l'autonomie limitée des bombardiers d'alors – afin d'y réaliser des frappes nucléaires aurait donc très certainement été détecté bien avant que les appareils agresseurs ne se trouvent en vue des territoires canadien et américain. Dans

la perspective d'un scénario aussi catastrophique, le réseau informatisé S.A.G.E. offrait aux américains une capacité de détection, d'identification et de réponse armée particulièrement avancée. A l'aide de ce formidable système de veille informatisé ils se trouvaient en effet à même d'organiser et de coordonner de façon extrêmement rapide une contre-offensive ciblée laquelle, dans un premier temps au moins, aurait vraisemblablement consistée à annihiler des avions lents, peu discrets et agiles, et, surtout, totalement dépourvus de protection aérienne rapprochée¹¹¹⁰.

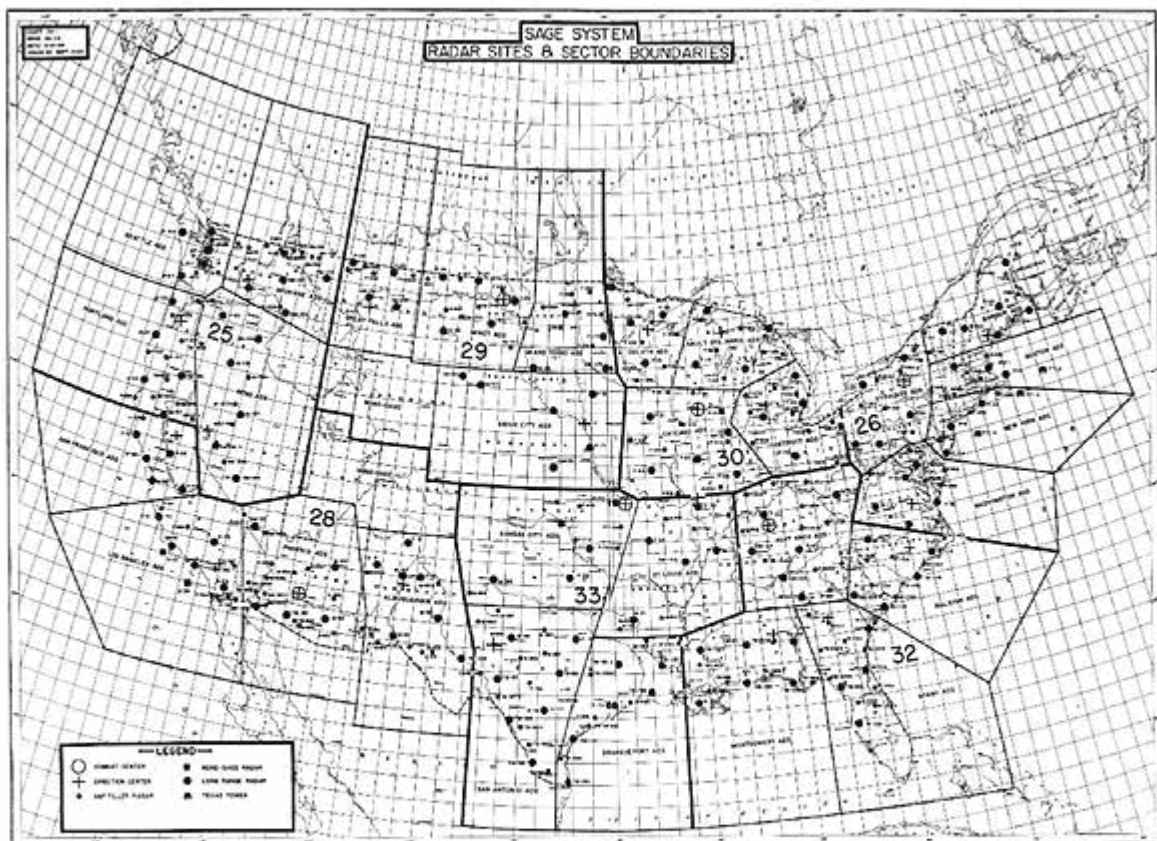


Fig. 7: ce document datant de 1958 présente le réseau S.A.G.E. tel qu'il devait être déployé à l'origine. Toutefois, pour des motifs d'ordre budgétaire, nombreux furent les centres de contrôle et de combat, ainsi que les sites radars, qui finalement n'entrèrent jamais en fonction.

Courtesy of Radomes, Inc. (<http://www.radomes.org/museum/>)

Voyons bien que la réussite d'une telle offensive reposait essentiellement sur deux choses: d'une part l'emploi simultané d'un grand nombre d'appareils emportant des armes dévastatrices afin de frapper les centres névralgiques du pays ennemi en une seule vague (d'où une réduction à néant de toute capacité de réplique sérieuse de la part de l'agressé), et,

¹¹¹⁰ L'éloignement géographique des cibles américaines et l'autonomie limitée des chasseurs soviétiques empêchaient ceux-ci de protéger les bombardiers. Une fois détectés, ces derniers étaient par conséquent très vulnérables.

d'autre part, l'indispensable élément de surprise. En réduisant considérablement, si ce n'est en annulant ce dernier atout dont on sait parfaitement combien il peut s'avérer déterminant sur le champ de bataille, le *Semi Automatic Ground Environment* conférait aux forces armées américaines un avantage militaire considérable. En même temps, il est évident qu'il jouait un rôle dissuasif éminent sur le plan stratégique. Lancer une offensive aérienne de grande ampleur sur les Etats-Unis – seule façon rapide et efficace pour annihiler la plupart des moyens offensifs et défensifs de ce pays – c'était désormais courir un risque élevé de voir sa flotte de bombardiers repérée et anéantie par des intercepteurs et des fusées à courte et moyenne portée *avant* même qu'elle n'ait pu commencer à lancer son attaque. Or à une époque où les missiles balistiques intercontinentaux n'existaient pas encore, perdre en une seule fois ou presque la totalité de ses vecteurs d'attaque aériens stratégiques, c'était nécessairement se condamner à adopter par la suite une posture principalement défensive face à un ennemi qui avait la maîtrise du feu atomique et qui ne tarderait certainement pas à avoir celle du ciel, et donc de la terre... Comme tout un chacun le sait, bien minces sont les chances de survie du duelliste qui décide de prendre l'initiative au combat mais qui manque son adversaire de sa seule et unique balle. Bien qu'en définitive son degré de déploiement ait été restreint par rapport à ce que les politiques et les militaires américains avaient initialement programmé (voir carte ci-dessus), le *Semi Automatic Ground Environment* devait couvrir une grande partie des Etats-Unis. Vaste trame invisible, serrée et protectrice, il maillait ainsi le territoire américain en garantissant que toute tentative d'intrusion par la voie des airs serait immanquablement décelée et éventuellement neutralisée avant qu'elle n'ait eue le temps de se transformer en menace réelle.

Plusieurs centaines de postes d'écoute et de surveillance antiaérienne, certains aménagés en surface ou dans des abris bétonnés profondément enfouis, d'autres encore embarqués à bord d'engins militaires roulants, volants ou navigants, approvisionnaient continuellement en données les ordinateurs I.B.M AN/FSQ-7 et AN/FSQ-8 placés au cœur des centres de décision et de combat de ce formidable instrument de veille. Comme on peut le constater en examinant l'illustration présentée ci-dessous, le réseau S.A.G.E. intégrait aussi différents systèmes d'armes terrestres, aériens et maritimes. Les centres de contrôle et de combat constituant les points névralgiques du réseau avaient la possibilité de placer en état d'alerte l'ensemble des moyens d'intervention militaires auxquels ils étaient connectés.

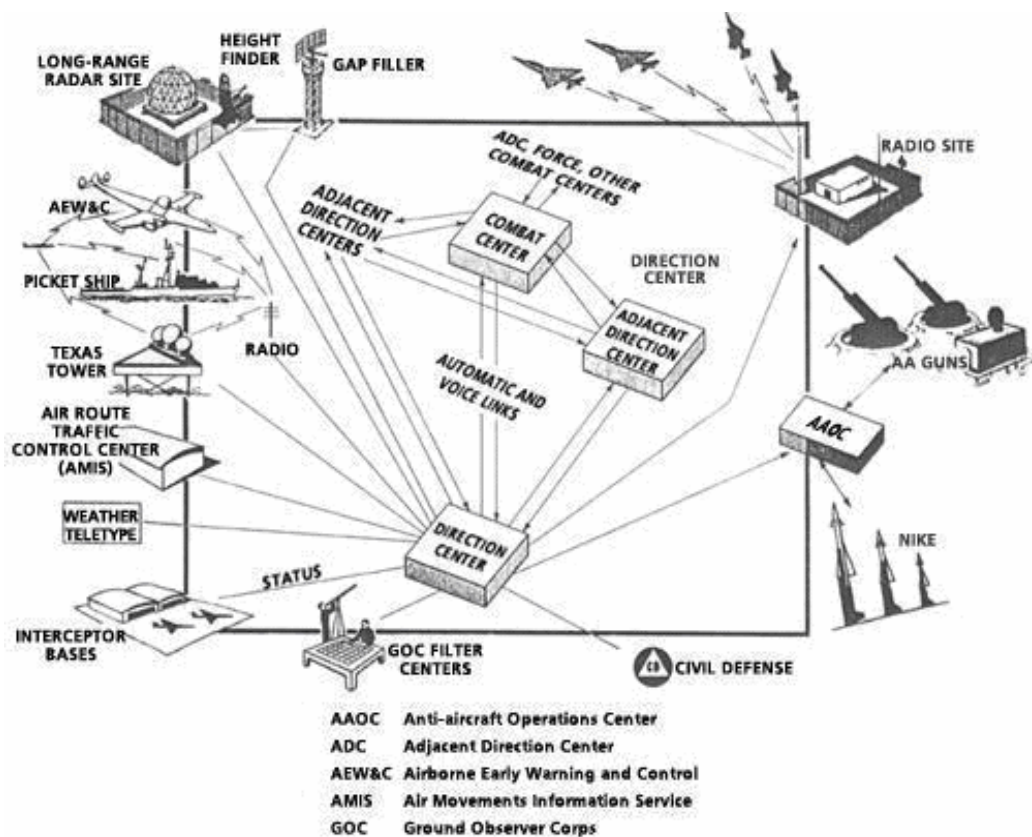


Fig. 8 : diagramme simplifié présentant le schéma de base des liaisons existantes entre les nœuds informatisés du réseau S.A.G.E., et les très nombreux moyens de détection et d'intervention possédés par la défense anti-aérienne américaine.

Picture (Ref. RB-p4) used with the permission of The MITRE Corporation.
Copyright © The MITRE Corporation. All Rights Reserved

Ils étaient ensuite capables de prendre en charge la planification et la coordination de leur utilisation. Chacun de ces pôles, comme il convient ordinairement aux nœuds d'un graphe, était relié à plusieurs de ses voisins. Il se trouvait ainsi en mesure d'échanger avec eux, en temps réel et en mode continu, des informations tactiques au sujet de l'évolution de l'état des secteurs placés sous surveillance. A la fin des années cinquante le réseau de surveillance informatisée S.A.G.E. semblait donc promis à devenir une plateforme défensive quasi imparable. De par sa sophistication, l'ampleur de son implantation géographique et son « imperméabilité » supposée, il était censé garantir aux Etats-Unis sinon une totale invincibilité, du moins un certain degré d'invulnérabilité aux attaques effectuées au moyen d'appareils volants conventionnels. Nous l'avons déjà dit, il s'agissait là a priori d'un argument de poids à faire valoir dans la balance géostratégique de l'époque.

Les coûts liés au développement et à la mise en œuvre des matériels et infrastructures composant le *Semi Automatic Ground Environment* n'ont jamais été révélés officiellement. En dollars constants de 1964, ils ont néanmoins été estimés à une somme comprise entre 8 et

12 milliards¹¹¹¹. Sur les plans financier, scientifique, technologique et militaire, le S.A.G.E., avec le Projet Manhattan, est donc une des entreprises les plus coûteuses et plus ambitieuses jamais engagées par l'homme. Le *Semi Automatic Ground Environment*, bien entendu, n'eut jamais à être employé en situation de conflit réel. On ne dispose donc à ce jour d'aucun moyen sûr et certain pour affirmer si, oui ou non, il aurait vraiment été à la hauteur des investissements et des espoirs phénoménaux que ses commanditaires et ses concepteurs avaient placés en lui. Une fois le déploiement du S.A.G.E. achevé, en 1963, un certain nombre de questions commencèrent toutefois à poindre dans les états-majors au sujet de son efficacité réelle. On sait ainsi qu'à au moins une reprise – c'était lors d'un exercice d'infiltration – une ou plusieurs escadrilles appartenant à l'U.S. *Strategic Air Command* purent déjouer le réseau et ses défenses et pénétrer ainsi dans l'espace aérien nord américain. A l'inverse, il arrivait que de fausses alertes soient déclenchées par des nuées d'oiseaux. Les opérateurs du réseau tendaient tout simplement à confondre la signature radar de ces objets volants de grandes dimensions avec celle de bombardiers stratégiques. Mais à dire vrai ces ratées opérationnelles, ces erreurs d'appréciation tactiques, étaient alors bien loin de constituer la chose la plus préoccupante pour les autorités politiques et militaires américaines. En effet, le 20 janvier 1960, le missile R-7A 8K74 – une version modernisée du lanceur spatial multi étages R7 8K71 PS qui avait placée le Spoutnik en orbite le 4 octobre 1957 - entra officiellement en service au sein de l'Armée Rouge. La version militaire du R-7 (SS-6 dans la nomenclature O.T.A.N.), fut le premier I.C.B.M soviétique de l'histoire. En configuration de combat optimale, cet engin long de 31 mètres était capable de franchir 8800 kilomètres en emportant une charge thermonucléaire d'une puissance de 5 mégatonnes. Il va de soi que l'entrée en service du vecteur intercontinental SS-6 bouleversa profondément la donne géostratégique et l'équilibre des forces qui existaient entre les deux grands adversaires idéologiques.

Pour le réseau S.A.G.E., l'arrivée de ces I.C.B.M. entraîna aussi des conséquences de grande ampleur. Pour commencer, et parce qu'il avait été spécifiquement conçu pour détecter et assurer l'interception d'avions plus ou moins lents et volumineux, le *Semi Automatic Ground Environment* était technologiquement incapable de prendre en charge – c'est-à-dire de détecter et de gérer en temps réel l'interception - des nouveaux missiles intercontinentaux soviétiques. Leurs caractéristiques et leurs performances tout à fait hors du commun (faible signature radar, altitude et vitesse particulièrement élevées), faisaient que ces derniers lui

¹¹¹¹ A titre de comparaison, le coût total du Projet Manhattan a été évalué à 20 milliards de dollars (en dollars constants de 1996).

échappaient. Ensuite, les profondes mutations de doctrine militaire entraînées au début des années 60 par l'introduction des I.C.B.M. amenèrent les stratèges des deux blocs à considérer désormais l'envoi massif de bombardiers stratégiques au dessus du territoire ennemi comme une option offensive de second plan. A tous points de vue en effet, les missiles intercontinentaux se révélaient plus performants et plus avantageux que les grands avions de combat. Si à partir de ce moment précis le S.A.G.E. ne devint pas à proprement parler inutile, son importance en tant qu'outil défensif continental se trouva passablement amoindrie. Jusqu'à la toute fin des années 70, les américains continuèrent néanmoins à entretenir et à assurer l'actualisation technologique de leur coûteux réseau de veille antiaérienne pour la simple et bonne raison que même s'il se trouve relégué en queue de liste des menaces militaires potentielles, un risque de frappe nucléaire par moyens conventionnels demeure un danger ne devant surtout pas être pris à la légère. En 1983, soit 27 ans après l'installation du premier système informatique I.B.M. AN/FSQ-7 sur la base aérienne américaine de McGuire, dans le New Jersey, le dernier ordinateur du réseau S.A.G.E., celui du centre de surveillance de North Bay, a été retiré de la circulation.

L'histoire du *Whirlwind* et du *Semi Automatic Ground Environment* est à n'en point douter l'une des plus longues et des plus riches qui se puisse trouver dans toute l'histoire de l'informatique mondiale. Elle débuta au sortir de la deuxième guerre mondiale, au M.I.T., et s'acheva en très grande partie en 1979, année où l'U.R.S.S. envahit l'Afghanistan. L'observateur non averti se posera sans doute la question de savoir si ces deux formidables et indissociables projets – le *Whirlwind* et le S.A.G.E. – valaient véritablement la peine d'être entrepris. Après tout l'ordinateur du M.I.T. engloutit une véritable fortune en dollars là où d'autres machines universelles à programme enregistré furent mises au point pour des sommes nettement moins élevées. Son parallélisme et sa capacité à opérer en temps réel – deux propriétés tout à fait inédites pour l'époque – faillirent comme nous l'avons vu le précipiter dans l'abîme en raison des dépenses outrancières que leur développement nécessita. Par un concours de circonstances propice, ce sont toutefois ces mêmes caractéristiques – vitesse de fonctionnement remarquable et traitement quasi instantané de l'information - qui lui épargnèrent une déroute autrement inévitable. L'armée de l'air américaine avait en effet besoin d'un système informatique tel que le *Whirlwind* pour l'intégrer aux nœuds de son futur réseau de veille antiaérienne semi automatisé. A l'inverse de la *Navy*, qui tendait de plus en plus à se désengager financièrement vis-à-vis du projet, l'U.S. *Air Force* était prête ici à payer le prix fort pour pouvoir disposer de cet ordinateur cher, mais exceptionnel. En 1955, la

collaboration initiée quelques années auparavant entre l'U.S. *Air Force*, le M.I.T. *Lincoln Laboratory* et I.B.M. déboucha sur la mise au point d'une version militaire du *Whirlwind*: le système informatique AN/FSQ. Les phases de déploiement partiel du S.A.G.E., qui avaient débuté deux ans auparavant, prirent fin la même année et s'avérèrent concluantes. En 1958 la production en série des ordinateurs AN/FSQ put commencer, tout comme le déploiement du réseau S.A.G.E. Au moment où celui-ci fut déclaré totalement opérationnel – c'est-à-dire 1963 - la nature de la menace qu'il était censé prévenir s'était toutefois transformée de manière radicale. Les missiles intercontinentaux à têtes thermonucléaires représentaient désormais le danger principal et contre celui-ci, le S.A.G.E. était impuissant. Pour les motifs énoncés ci-dessus, les militaires américains le maintinrent quand même en opération jusqu'à l'orée des années 80. A partir de l'exposé de cet ensemble de données, nous nous trouvons à présent en position de nous interroger sur les aspects positifs, c'est-à-dire en fin de compte sur la valeur intrinsèque véritable, du projet S.A.G.E. Militairement, c'est un fait indéniable, les éléments de défense passifs et actifs du réseau étaient totalement inadaptés à la menace que les I.C.B.M. soviétiques commencèrent à représenter pour les Etats-Unis à compter de 1960. Dans l'hypothèse très improbable mais toujours possible d'un assaut nucléaire mené au moyen de bombardiers stratégiques, le S.A.G.E. continua à être employé par l'armée de l'air américaine comme un système très perfectionné – mais jamais éprouvé en conditions de guerre - de contrôle de l'espace aérien. En conséquence, et si objectivement on veut dresser le bilan du projet S.A.G.E., alors ses points positifs, son utilité véritable, bref ses apports majeurs doivent par la force des choses être recherchés *en dehors* de la sphère de l'efficacité militaire pure.

C'est en fait en reconsidérant l'épopée du *Whirlwind*, en recensant les innovations technologiques formidables et les grandes synergies interinstitutionnelles et économiques que sa mise au point puis son intégration à un réseau militaire d'échelle continentale exigèrent, que l'on pourra réellement prendre toute la mesure de sa contribution, ou plutôt de ses contributions, à l'informatique et à son histoire. Sur le plan technologique, le développement du système informatique du M.I.T. et de ses versions AN/FSQ déboucha en effet sur un nombre impressionnant de nouveautés, de « premières », toutes aussi déterminantes les unes que les autres pour l'avenir de l'ordinateur et de son industrie. Afin d'appréhender ceci on pourra procéder à l'énumération de celles qui nous semblent avoir compté par les plus décisives:

- 1) Mise au point de techniques permettant l'affichage des données informatiques sur un terminal graphique et leur manipulation, grâce à un pistolet lumineux, par les opérateurs du système. En rendant plus intuitif et donc plus aisé l'emploi de l'ordinateur, celles-ci finiront par transformer radicalement le rapport des utilisateurs à leurs machines.
- 2) Développement de matériels et de techniques destinés à l'effectuation de calculs en mode parallèle synchrone.
- 3) Mise au point d'un langage de programmation algébrique élaboré et conception de logiciels longs et complexes.
- 4) Ecriture de programmes variés dont certains ayant pour fonction l'aide à la décision et le contrôle de systèmes d'armes.
- 5) Mise au point de techniques informatiques de duplexage pour assurer la continuité des opérations de surveillance en cas de défaillance d'un ordinateur.
- 6) Conception de protocoles d'interaction permettant à des opérateurs – une centaine au total - de communiquer avec l'ordinateur central à partir de télétypes « éloignés ».
- 7) Mise au point et emploi de techniques et d'équipements de conversion de signal analogique/digital et digital/analogique.
- 8) Transmission de données digitales par l'intermédiaire de lignes téléphoniques.
- 9) Développement des technologies logicielles et des équipements nécessaires à la mise en réseau d'ordinateurs.
- 10) Simulation (systèmes informatiques, évaluations de tactiques et de stratégies militaires offensives et défensives).
- 11) Mise au point des mémoires à tores ferromagnétiques.

Chacun des points qui viennent d'être énumérés mériterait assurément à lui seul un très long commentaire. Certains d'entre eux, tels le rôle absolument central que joua le S.A.G.E. dans la montée en puissance des langages de programmation évolués et du logiciel pendant les années 60 et 70, ou bien encore dans la place croissante que les concepteurs de systèmes commencèrent à accorder au même moment aux interfaces homme/machine et à leur ergonomie, devront ultérieurement faire l'objet d'une analyse poussée. Il s'agit là en effet d'évènements technologiques décisifs qui, si on les convoque dans le discours, permettent de jeter un éclairage particulièrement révélateur sur l'évolution générale des matériels et des techniques de l'informatique à compter de la première partie des années 60. Tout aussi essentiels pour le devenir technico-économique de l'informatique furent les accords de coopération que l'armée américaine, le *Massachusetts Institute of Technology* et un certain nombre de grandes sociétés industrielles conclurent dans le but de réaliser tous les travaux de recherche, de développement, et de mise en place infrastructurelle rattachés d'une manière ou d'une autre au *Semi Automatic Ground Environment*. Parmi les très nombreuses entreprises qui, dans tel ou tel secteur technologique, jouèrent un rôle de première importance au sein de ce classique triptyque armée/université/industrie – on pourra évoquer *Burroughs*, la *Western Electric Company*, la *General Electric Company*, la *Systems Development Corporation*¹¹¹², les *Bell Telephone Laboratories*, *Raytheon*, la *Remington Rand*, et la *Radio Corporation of America* – c'est incontestablement le groupe I.B.M. qui tira le mieux son épingle du jeu. Emerson W. Pugh¹¹¹³ rapporte ainsi qu'en 1952, les revenus liés au développement du S.A.G.E. représentaient un peu moins de 4% du total des rentrées financières réalisées par la firme de Th. J. Watson Sr. sur le territoire américain. Trois ans plus tard, ils constituaient 80% des gains de sa branche informatique. Au total on estime à plus d'un demi-milliard de dollars (558 millions sans doute) le montant de la somme que le géant américain engrangea grâce aux précontrats et contrats signés avec l'armée américaine et le M.I.T. pour la fabrication des ordinateurs centraux du *Semi Automatic Ground Environment*. Cette prodigieuse manne financière permit à une société I.B.M. déjà dominante sur le marché des machines électroniques de bureau et des « petites » installations informatiques, de ravir définitivement sa place de leader à la *Remington Rand* sur le celui des grands ordinateurs. De l'aveu même

¹¹¹² A l'origine, la *Systems Development Corporation* était le groupe d'ingénierie logicielle que la R.A.N.D. *Corporation*, organisation gouvernementale américaine à but non lucratif créée en 1945 par l'U.S. *Air Force* et liée à la *Douglas Aircraft Company*, avait mis sur pied afin d'assurer le développement du logiciel du *Semi Automatic Ground Environment*. Après avoir été affranchie de la tutelle de la R.A.N.D., en 1957, la S.D.C. devint une entreprise commerciale à part entière en 1969. La S.D.C. a été sinon la première, du moins l'une des premières et des plus importantes compagnies de software de la planète.

¹¹¹³ In [Pugh, 1995], p.219.

de Thomas J. Watson Jr, son ancien Président, « *c'est la Guerre Froide qui a permis à I.B.M. de se hisser au rang de roi de l'industrie informatique*¹¹¹⁴ ». Mais le bénéfice le plus essentiel et le plus durable qu'I.B.M. retirera de sa participation au projet S.A.G.E. devait concerner le domaine de l'expertise technologique. Au moment où le projet S.A.G.E. atteint son apogée, c'est-à-dire en 1957-58, I.B.M. lui avait déjà affecté un peu plus de 7000 employés, un nombre extrêmement élevé qui représentait environ un cinquième de ses effectifs globaux. Parmi toutes ces personnes certaines, en raison de leur spécialité professionnelle, de leur niveau de responsabilité et des missions qui leur avaient été confiées, furent amenées à collaborer directement avec les chercheurs et les ingénieurs de l'armée ainsi qu'avec ceux du M.I.T. *Lincoln Laboratory*. Comme le remarque Jérôme Ramunni, grâce à leur contact prolongé avec les experts du M.I.T., tous ces personnels purent être ainsi formés « *à des techniques qui étaient encore au stade de la recherche*¹¹¹⁵ ». Ces échanges entre le M.I.T. et I.B.M. permirent ainsi aux savants et aux techniciens employés par la firme de New York d'étendre et de renforcer considérablement leurs connaissances fondamentales dans les secteurs de l'électronique et de l'informatique, tout en perfectionnant grandement leurs compétences technologiques dans ces deux mêmes domaines clefs. Sur le plan de la productique, le fait d'avoir à construire des systèmes informatiques militaires d'une très grande complexité et à vérifier ensuite le bon fonctionnement de ces derniers exigea d'une part qu'I.B.M. améliore ses capacités de production en série, et d'autre part qu'il perfectionne ses routines de test. Ces modifications de fond apportées à l'organisation de la ligne de production et aux procédures de contrôle de la qualité furent ensuite conservées par I.B.M. Inutile bien entendu de préciser qu'elles devaient bénéficier grandement à toute sa production ultérieure.

Une autre chose toute aussi fondamentale était le niveau d'expertise élevé que les personnels d'I.B.M. se trouvèrent en mesure d'atteindre durant la première moitié des années 50 en ce qui concerne la fabrication de mémoires matricielles à tores de ferrite. Ainsi qu'il a déjà été précisé dans la section que nous avons dédiée à la création de cette catégorie de supports informatiques, Munro K. Haynes, l'expert maison, avait commencé à travailler sur

¹¹¹⁴ In [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], pp. 168-169. Le S.A.G.E. ne fut bien entendu pas le seul contrat qu'I.B.M. remplit pour le compte de la défense nationale durant la période de la guerre froide (pensons par exemple au *Defense Calculator*, construit et achevé pendant la guerre de Corée ou encore au *Naval Ordnance Research Calculator*, le superordinateur de l'U.S. Navy). Mais à tous points de vue, ce projet est très certainement celui qui a eu le plus d'impact sur l'entreprise en termes théoriques, technologiques, financiers, et organisationnels.

¹¹¹⁵ In [Ramunni, 1989], p.121.

les mémoires à tores¹¹¹⁶ avant même de rejoindre les rangs d'I.B.M., en 1950. En 1952, usant de composants spécialement fabriqués à la demande d'I.B.M. par la société américaine *General Ceramics*, il avait conçu et testé avec succès un prototype de matrice ferromagnétique de 960 bits de capacité. Afin de pouvoir répondre aux besoins matériels colossaux - en quantité et en qualité - bientôt générés par le projet S.A.G.E., I.B.M. prit appui sur cette capacité d'expertise déjà existante et la fit progresser grâce à de conséquents investissements réalisés dans le domaine de la recherche et du développement. D'abord approvisionnée en tores par des sociétés sous-traitantes, l'entreprise se dota peu à peu de l'ensemble des équipements nécessaires à leur fabrication et organisa leur production, si bien qu'à la fin de l'année 1954, 95% des éléments ferromagnétiques consommés par le projet S.A.G.E. étaient produits par « *Big Blue* ».

Tous ces apports en matière de théorie, de technologie et d'ingénierie, tous ces investissements humains, financiers et infrastructurels réalisés plusieurs années durant dans le domaine de la recherche, du développement et de la production à l'échelon industrielle – bref tous les savoir et savoir-faire acquis dans le cadre du projet S.A.G.E. - I.B.M. ne devait bien entendu pas tarder à les réinvestir et à les rentabiliser avec force réussite en les intégrant dans ses nouvelles machines informatiques (notamment certains systèmes de la série 700). C'est un euphémisme d'affirmer que la société de Thomas J. Watson Sr. sortie grandie et renforcée du projet S.A.G.E. La participation d'I.B.M. à l'élaboration de cette merveille technologique et l'ensemble des bénéfices qu'elle put et sut en tirer à tous les niveaux contribuèrent tout simplement à mettre en place et à assurer l'emprise presque absolue que cette entreprise exerça sur l'industrie informatique jusqu'à l'invention du *Personal Computer*.

1.3. Conclusion : la première informatique.

Au travers de l'étude détaillée de quelques prototypes d'ordinateurs britanniques et américains nous nous sommes efforcés ici de mettre en lumière les faisceaux de contraintes spécifiques, les problématiques logiques et technologiques originales ainsi que les circonstances historiques qui ont présidé à l'élaboration de la première informatique, au sortir de la deuxième guerre mondiale. Sur fond de guerre froide naissante, des dynamiques complexes se sont vues initiées entre trois pôles fondamentaux, à savoir le monde de la recherche, l'armée, et le secteur industriel. Des interactions multiples occurrant entre ces trois

¹¹¹⁶ Rappelons ici le titre de la thèse de doctorat en ingénierie électrique que M. K. Haynes soutint à la fin des années quarante à l'Université de l'Illinois : « *Magnetic Cores as Elements of Digital Computing Systems* ».

mondes, de leurs déplacements et de leur intensité, est née la première informatique, celle des pionniers et des prototypes, des tâtonnements technologiques, des solutions techniques originales mais souvent déraisonnablement onéreuses. Le début des années 50 verra le statut et l'image de l'ordinateur se transformer peu à peu. Suivant la voie audacieusement ouverte par J. P. Eckert et J. W. Mauchly à la fin des années 40, de grands industriels, tels I.B.M. ou *Remington Rand*, commenceront à proposer des ordinateurs à vocation commerciale. Bien évidemment, seules les entités commerciales les plus riches et les plus puissantes pourront se permettre de louer ou d'acquérir ces fragiles Léviathan informatiques et les équipes de spécialistes nécessaires à la fois à leur emploi et à leur entretien. Graduellement, les technologies vont se perfectionner et aller dans le sens d'une augmentation des performances des machines et d'une diminution de leurs dimensions (et de leur coût, dans une certaine mesure). La deuxième informatique verra nombre de bouleversements technologiques, industriels et sociétaux se produire. L'industrie informatique se structurera, se diversifiera tandis que sa composante logicielle – jusque-là sa portion congrue et négligée – s'autonomisera et entamera une impressionnante montée en puissance. La deuxième informatique sera également caractérisée par la mainmise de l'état et des grandes entreprises sur l'information et sa circulation. Les tenants d'une idéologie contestataire alimentée par le refus de la guerre au Vietnam, le rejet du racisme et, plus généralement, la remise en cause (souvent non violente) de l'ordre établi, chercheront à inverser cette situation en s'emparant de l'ordinateur pour en faire non plus un objet de séquestration de l'information, mais le meilleur vecteur possible pour assurer sa libération. Les mini-ordinateurs et les réseaux informatiques naissants joueront ici un rôle absolument fondamental. Toutes ces technologies et leurs pratiques associées, mais aussi l'idéologie qui naîtra au même moment dans quelques-unes des universités américaines les plus prestigieuses formeront certaines des conditions de possibilité d'apparition de la micro-informatique, une décennie plus tard. C'est cette deuxième période clef de l'histoire de l'informatique que nous proposons à présent d'étudier dans le détail.

2. La deuxième informatique : organisation et diversification de l'industrie informatique et de ses produits, montée en puissance et autonomisation du logiciel (langages de programmation évolués, *operating system* et applications), *time-sharing*, BASIC et UNIX.

2.1. Contexte de développement et lignes de force de la deuxième informatique.

La période que Philippe Breton désigne dans une *Histoire de l'informatique* du nom de « deuxième informatique » a commencé grosso modo au début des années soixante. Un certain nombre de différences, de ruptures, de changements profonds, de transformations essentielles – autant de choses fondamentales sur lesquelles nous allons à présent essayer de nous pencher pour la mieux comprendre - permettent bien évidemment de la distinguer de sa devancière. A de très nombreux égards toutefois, et en plus du fait qu'elle en constitue nécessairement le prolongement chronologique, force est de constater que la « deuxième informatique » s'inscrit dans une forme de continuité marquée avec la « première informatique ». Pour la plupart les acteurs institutionnels, académiques et industriels majeurs qui directement ou indirectement ont permis à cette nouvelle informatique de se mettre peu à peu en place à compter du début des années 60 sont en effet ceux-là même qui, entre la seconde moitié des années 40 et la fin des années 50, ont investi lourdement pour faire de l'ordinateur une réalité technologique apte à servir efficacement les secteurs de la défense nationale, de la science et – quoique plus lentement au départ - de l'économie. Les quinze années qui suivirent la fin de la deuxième guerre mondiale furent comme nous le savons le théâtre d'événements politiques, militaires et technologiques particulièrement déterminants pour le devenir du monde. Le fait qu'en quelques années à peine une Union Soviétique aux visées expansionnistes et aux positions anti-occidentales de plus en plus affirmées ait réussi à se doter d'une flotte de bombardiers stratégiques, qu'elle soit successivement parvenue à mettre au point la bombe atomique (test en août 1949) et la bombe à hydrogène (test en avril 1953), puis qu'elle soit arrivée, coiffant en cela les U.S.A. au poteau, à concevoir un vecteur orbital opérationnel – c'est-à-dire finalement une fusée spatiale convertible en missile balistique capable d'atteindre n'importe quel point du globe pour y délivrer le feu nucléaire – provoqua une véritable lame de peur aux Etats-Unis. Bien que certaines manifestations

sociales et politiques engendrées dans ce pays par la peur du bolchevisme se soient d'abord distinguées par leur caractère passablement fiévreux et irrationnel – nous pensons notamment au Maccarthysme – l'arsenal guerrier incroyablement performant dont disposaient l'U.R.S.S. et ses pays satellites au début des années 50 constituait effectivement une menace militaire authentique, sans précédents connus. Dans le même temps ces avancées réalisées dans les secteurs de l'armement et de l'aérospatiale démontraient de façon tout aussi spectaculaire que symbolique que le bloc communiste était en train de réduire considérablement le retard technologique qu'il accusait auparavant sur les U.S.A. Mieux que cela, en certains domaines de pointe, il commençait tout simplement à les surpasser...

La réaction des Etats-Unis à la mise sur orbite réussie du Spoutnik et à l'avertissement explicite que celle-ci recelait fut assurément à la mesure du camouflet politique, idéologique, militaire et technologique que cet évènement historique put représenter aux yeux de l'opinion publique mondiale de l'époque. Tandis qu'à la fin des années 50 de nouvelles organisations gouvernementales bénéficiant de lignes budgétaires quasi illimitées, telles la *Defense Advanced Research Projects Agency* ou la *National Aeronautics and Space Administration*, furent mises sur pied dans le but de permettre aux Etats-Unis de recouvrer leur leadership en matière de technologie militaire et spatiale, le Président John Fitzgerald Kennedy, lors d'une allocution célèbre prononcée le 25 mai 1961 devant les membres du Congrès Américain, annonça avec force lyrisme que des astronautes débarqueraient sur notre satellite naturel et en reviendraient sains et saufs avant que la décennie courante ne soit écoulée. C'est donc sur fond de guerre froide, de course effrénée aux armements et de conquête spatiale – avec les prodigieuses ressources scientifiques, industrielles, militaires et financières que ces efforts assurément extraordinaires mobilisèrent en leurs temps – que la « deuxième informatique » apparut et se développa. Non seulement se constitua-t-elle dans ce contexte pétri à la fois de grande incertitude et de profonde exaltation nationale mais elle n'eut de cesse, afin de toujours mieux servir ces projets militaro scientifiques grands consommateurs de puissance de calcul, de se perfectionner en s'appropriant rapidement les plus récents développements technologiques qui en étaient issus et/ou dont ils avaient largement favorisé le développement. Ainsi du transistor, des modules électroniques, et des circuits intégrés qui furent d'abord employés dans le cadre d'applications avancées commandées et financées par les militaires américains¹ avant de diffuser progressivement dans les sphères académique, industrielle et économique. Avec un léger décalage,

¹ Par exemple dans le cadre de la conception de systèmes de guidage satellitaires intégrés ou encore dans celle d'ordinateurs spéciaux.

l'informatique civile finit elle aussi par tirer de nombreux bénéfices de ces avancées technologiques.

La « deuxième informatique », comme nous allons le voir à présent, peut se voir définie par plusieurs caractéristiques essentielles. Pour commencer, une tendance croissante à l'intégration des matériels ainsi qu'à l'automatisation et l'optimisation de leur pilotage via des logiciels spécialement conçus à cette fin. L'architecture de l'ordinateur telle que pensée en 1945 par von Neumann, Eckert et Mauchly ayant été reconnue et admise comme modèle structurel fondamental de cet instrument et la phase d'expérimentation technologique « brute » débutée à la même période tirant à sa fin, on va s'efforcer maintenant de réduire l'encombrement et la masse des systèmes – d'abord afin de répondre à des impératifs émanant de la sphère militaire et du secteur de l'aérospatiale – tout en cherchant à développer des programmes capables d'assurer efficacement la gestion de la multitude d'interactions survenant en permanence entre leurs principales parties actives. Autrement dit, il s'agira de décharger l'utilisateur des tâches les plus difficiles, les plus improductives et les plus rébarbatives qui caractérisent l'emploi de cette catégorie de dispositifs pour confier leur gestion à la machine elle-même.

Ensuite, deuxième point, l'industrie informatique va progressivement s'organiser afin de répondre au mieux à la demande grandissante et de plus en plus diversifiée des marchés militaire, scientifique et, surtout, commercial. La capacité d'expertise renforcée, de même que les bénéfices infrastructurels et financiers souvent très importants que les entreprises pionnières de l'informatique² se trouvèrent en mesure de tirer de leur participation aux grands projets gouvernementaux américains du début des années 50 vont être mis à profit par ces dernières au cours de la même décennie afin d'assurer leur place, si ce n'est leur emprise, sur un marché alors en pleine phase ascensionnelle. Suivant quasiment pas à pas l'évolution des technologies mises au point pour les secteurs de la défense nationale, de l'aérospatiale et de la science fondamentale - Guerre Froide et conquête spatiale obligent - de nouveaux systèmes informatiques moins massifs, plus performants, plus faciles d'emploi et plus économiques que les anciens ordinateurs à lampes vont commencer à faire leur apparition. Tous ces facteurs, combinés à une baisse notable du prix de vente ou de location des ordinateurs en raison de la baisse du coût des composants et des économies d'échelle désormais réalisées par les fabricants, vont contribuer à précipiter grandement l'inflation de la demande émanant des agences gouvernementales, des administrations, des universités et des entreprises

² Soit I.B.M., *Burroughs*, UNIVAC, *Honeywell*, *Philco*, la *National Cash Register*, l'*Engineering Research Associates*, la *Radio Corporation of America* et la *General Electric*.

commerciales. Les besoins respectifs en puissance de calcul et en capacité de stockage de ces dizaines de milliers d'acquéreurs ou de locataires d'ordinateurs étant fort loin d'être identiques, le marché informatique va rapidement se sectoriser tandis que les grands constructeurs, I.B.M. en tête, vont adapter leur production et leur service au client³ en conséquence. Dans un premier temps des petites séries d'ordinateurs souvent dérivés d'un même *mainframe* scientifique⁴ et offrant chacun des capacités correspondant peu ou prou aux besoins spécifiques de chaque classe d'utilisateurs identifiable furent fabriquées. Des systèmes d'entrée de gamme et de taille moyenne, comme les I.B.M. 650 *Magnetic Drum Data Processing Machine* et I.B.M. 1401 *Data Processing System*⁵, furent également proposés à des tarifs extrêmement attractifs durant les années 50 et au tout début des années 60 afin d'inciter les utilisateurs traditionnels d'équipements de bureau électromécaniques ou électroniques à se tourner vers l'emploi de l'ordinateur. Il doit être noté que la plupart du temps, chaque modèle d'ordinateur disposait de sa ligne de production individuelle, de sa propre force de vente, de son service technique de réparation, etc. Outre le cloisonnement et la spécialisation des personnels qu'elle supposait nécessairement, une telle organisation représentait un véritable casse-tête pour les constructeurs sur les plans de la production, de la logistique (notamment pour l'approvisionnement en circuits), et de la gestion administrative. Les choses commencèrent à profondément changer entre les années 1960 et 1965.

En raison de son audace en matière de recherche et de développement, de sa hardiesse commerciale, de sa puissance financière colossale, de sa position de leader incontesté dans le domaine des machines de traitement de l'information depuis sa fondation, de l'ampleur et de la solidité de son implantation à l'échelle de la planète, et, enfin, de la politique commerciale de qualité qu'elle s'était toujours efforcée de pratiquer vis-à-vis de sa clientèle, l'entreprise I.B.M. s'imposa encore une fois ici comme l'acteur principal et le grand vainqueur de la mutation technologique en cours. En plus d'être la première à introduire sur le marché des ordinateurs à « bas coût⁶ », le tour de force réalisé par la firme de New York consista à livrer

³ Sous cette notion assez large de « service au client », il faut comprendre plusieurs choses caractéristiques de l'informatique des années 55-65 : l'installation du système informatique et de ses périphériques, la mise en place et l'aide à la conception des applications, la formation des personnels utilisateurs, le suivi technique du système (avec éventuellement sa mise à jour), et son dépannage.

⁴ Comme les machines de la série I.B.M. 700

⁵ Des sobriquets - respectivement le « cheval de trait » et la « Fort T » de l'informatique – furent donnés aux I.B.M. modèles 650 et 1401. Ces appellations imagées mettent assez explicitement en avant le rôle décisif que jouèrent ces deux systèmes dans la diffusion massive de l'ordinateur au sein l'espace économique.

⁶ Ne nous laissons pas abuser par le sens courant que nous tendons à prêter immédiatement à cette expression. En 1959-60, le prix de vente d'un I.B.M.1401 A-1 ne s'élevait à 83700 dollars (de l'époque), somme à laquelle il convenait de rajouter 30000 dollars pour l'obtention d'une perforatrice de cartes. D'autres équipements périphériques souvent indispensables – comme des lecteurs de bandes magnétiques ou des modules additionnels

ces derniers avec des périphériques d'entrée/sortie capables de lire et d'écrire sur les supports mémoriels déjà utilisés par les anciens systèmes de traitement de l'information (*i.e.* les cartes perforées). En faisant en sorte que ses ordinateurs supportent ce médium d'enregistrement ancien et extrêmement répandu, I.B.M. rassurait sa clientèle commerciale traditionnelle et s'assurait en même temps qu'elle lui resterait fidèle en ces temps de grande mutation annoncée. Ce sentiment de continuité directe avec les pratiques professionnelles passées, renforcé par le fait que les milliards de bits d'informations déjà stockés sur les cartes perforées I.B.M. n'étaient aucunement perdus puisque celles-ci pouvaient toujours être exploitées par l'ordinateur (et donc être encore proposées comme des fournitures aussi indispensables que lucratives par leur fabricant), permirent en effet de désacraliser la nouvelle machine aux yeux de ses très nombreux usagers potentiels et d'encourager ainsi vivement ces derniers à se familiariser au plus vite avec ses principes de fonctionnement.

La base des utilisateurs d'ordinateurs civils n'ayant de cesse de s'élargir et de se bigarrer durant la première moitié des années 60, les grands constructeurs de systèmes s'efforcèrent de concevoir des machines informatiques de plus en plus tournées vers les besoins de ces derniers, standardisant des équipements qu'ils voulaient toujours plus souples et plus puissants tout en faisant de même avec les techniques et les outils de programmation (compilateurs, assembleurs, langages de haut niveau, etc.). A la faveur des processus de normalisation croissante touchant les matériels, les langages informatiques évolués et les logiciels, on assista aussi à la montée en puissance du concept de compatibilité et cela aussi bien au sein de la production d'un constructeur donné – la série I.B.M. *System/360* annoncée en 1963 constituant assurément l'exemple le plus connu et le plus emblématique de cette tendance irrépressible – qu'entre les ordinateurs proposés par les différents grands acteurs du marché. Ainsi la firme américaine *Honeywell* introduisit-elle son modèle H-200 en 1963. Vendu 30% moins cher que l'I.B.M. 1401, ordinateur d'une extrême popularité dont il reprenait en grande partie l'architecture afin d'en mieux séduire les usagers, le H-200 était équipé en série d'un logiciel convertisseur – le bien nommé *Liberator* – qui permettait de réutiliser toutes les applications du 1401 en effectuant automatiquement leur traduction. Parallèlement à cette « fronde » visant – si peu que ce soit – à diminuer l'immense domaine

de mémoire à tores de ferrite – étaient aussi proposés pour un coût individuel d'achat s'échelonnant entre 22000 et 68500 dollars. Le montant demandé pour la location de ce même système était proportionnel à son prix de vente. En fonction du degré de sophistication des installations, leur valeur pouvait bien entendu varier. Toutefois, pour qu'un système puisse être qualifié de fonctionnel et d'efficace, elle ne pouvait guère être inférieure à 200000 dollars.

d'influence de la toute-puissante société I.B.M. commençaient à se dessiner les linéaments d'une autre bifurcation capitale dans le secteur du *hardware*.

La deuxième informatique correspond en effet à ce moment technologique qui vit apparaître les premiers mini-ordinateurs⁷. Non sans une certaine pertinence, Paul E. Ceruzzi rappelle dans son ouvrage *A History of Modern Computing* que le terme *Mini Computer* est apparu, à quelques années près, au même moment que la minijupe et la *Mini Minor*, une sympathique petite voiture conçue à la toute fin des années 50 par le constructeur automobile britannique *Morris*⁸. Nul aujourd'hui n'est en mesure d'affirmer avec exactitude quand et par qui fut forgé ce néologisme mais toujours est-il que l'époque, dans son ensemble et pour des motifs divers et nombreux que de toute façon il ne nous appartient pas d'examiner ici, tendait à encourager « la miniaturisation » des choses. Composés des mêmes éléments électroniques de base que les machines contemporaines appartenant aux autres grandes catégories d'instruments informatiques – soit initialement des transistors et des matrices à tores - les mini-ordinateurs étaient des systèmes dont les performances, les dimensions et le coût étaient très inférieurs à ceux exhibés par les superordinateurs (tels le L.A.R.C. d'UNIVAC ou l'I.B.M. 7030 « *Stretch* »), les *mainframes* (série *System/360*), et les dispositifs de taille moyenne (comme les I.B.M. modèles 1401 ou 1620), proposés au même moment. Les exemples les plus marquants, et aussi, à bien des égards, capitaux pour les infléchissements décisifs qu'ils provoquèrent ensuite dans la sphère informatique, furent le C.D.C. 160A, de *Control Data Corporation* et les P.D.P. 1 et P.D.P. 8, de *Digital Equipment Corporation*. L'introduction de cette nouvelle catégorie de dispositifs électroniques sur le marché du traitement de l'information des années 60 conduisit à un bouleversement qui non seulement affecta le paysage informatique industriel, mais transforma aussi profondément et définitivement le rapport que la société et, à travers elle, les individus, entretenaient à l'ordinateur. Nombreux sont en effet ceux qui ont vu dans l'apparition du mini-ordinateur et du nouvel « esprit » qu'il incarnait une des principales conditions de possibilité du mouvement sociétal et technologique qui s'amorça aux Etats-Unis au début des années 70 – et qui enfanta entre autres choses la micro-informatique - en réaction contre le modèle informationnel centralisé et ultra contrôlé que les thuriféraires de l'automatisation et de l'informatisation de la société, au nom de son optimisation rationnelle, défendaient. Ce que prouva véritablement le mini-ordinateur, c'est qu'il existait en dehors des catégories d'utilisateurs institutionnels d'autres classes d'utilisateurs

⁷ Ou *Mini Computers*. Même s'il existe ici un certain nombre d'éléments de filiation, ces machines ne doivent bien entendu pas être confondues avec les micro-ordinateurs.

⁸ In [Ceruzzi, 1998], p. 135.

qui n'aspiraient qu'à avoir elles aussi accès aux ordinateurs. Pourvu seulement que leur soient proposées des machines informatiques dont les caractéristiques techniques, l'esprit et le coût correspondraient à leurs attentes, leurs besoins et leurs moyens et ce marché à l'ampleur décidément insoupçonnée serait à même de libérer son formidable potentiel. L'introduction et la diffusion relativement discrètes et limitées des premiers mini-ordinateurs, dans les années 1960-61, ne suffirent certes pas à ébranler le solide empire des *mainframes* (comme devait par exemple le prouver le succès sans précédent que rencontrèrent les machines de la famille *System/360* à partir de la mi-1965). En revanche, en démontrant qu'un ordinateur pouvait être autre chose qu'un gigantesque broyeur de nombres impénétrable et dispendieux, ventilé et surveillé en permanence par une procession de techniciens et d'ingénieurs d'usine tout à la fois jaloux de leur machine et de leur savoir, le mini-ordinateur contribua, dès le départ, à redéfinir en profondeur la notion même d'ordinateur. Plus que cela il jeta les bases d'une culture informatique complètement renouvelée – une culture fondamentalement basée sur l'autonomisation de l'utilisateur et de la valorisation de ses compétences techno-logiques ainsi que sur la mise en place de liens de coopération pérennes et ouverts entre ce dernier et le fabricant de la machine – qui n'eut de cesse de monter en puissance jusqu'à littéralement éclater en 1965-66, avec l'apparition du fameux D.E.C. P.D.P-8.

La fin des années 50 et la première moitié des années 60 virent également la naissance, la multiplication et la consécration des langages de programmation avancés – comprendre de haut niveau – ainsi que celles du logiciel dans sa grande globalité. Afin de faciliter et de rendre plus rapide l'écriture, l'utilisation et le débogage des programmes de pilotage des systèmes et des applications professionnelles ou scientifiques, on commença lentement mais sûrement à introduire des couches logicielles intermédiaires entre l'homme et la machine. Il s'agissait de permettre aux utilisateurs de concevoir des applications au moyen de langages qui, à défaut de ne pas être complètement débarrassés des longues et incompréhensibles séries numériques qui caractérisaient et rendaient si difficile la programmation informatique des débuts, comportaient néanmoins suffisamment d'instructions données sous forme *symbolique* pour que la tâche s'en trouve considérablement simplifiée. Des logiciels spéciaux – compilateurs ou interpréteurs – se chargeaient ensuite de traduire *automatiquement* le programme entré par l'utilisateur dans les termes d'un langage codé de bas niveau (binaire), directement exploitable par le processeur de la machine. Certes ces opérations intermédiaires impliquaient un accroissement du temps de traitement des programmes par la machine puisque leur fonction consistait précisément à opérer une transformation qui autrefois n'existait pas : celle consistant à traduire un corpus de données compréhensibles par l'homme

en un ensemble d'informations immédiatement interprétables par l'ordinateur. Le temps économisé lors des phases d'élaboration et de correction des programmes grâce à l'emploi des langages informatiques de haut niveau devait toutefois compenser largement le surplus de consommation de temps machine que l'opération systématique de leurs corollaires obligatoires – *i.e.* les compilateurs ou les interpréteurs - occasionnait.

Les tout premiers efforts faits en direction d'une simplification, voire d'une symbolisation des langages informatiques remontent au pionnier allemand solitaire Konrad Zuse avec le *Plankalkül* (un langage qu'il avait mis au point dans les années 1945-46 afin de programmer ses machines Z). On pourrait mentionner ici aussi les travaux réalisés par Alan M. Turing à Manchester (où il rédigea un manuel de programmation pour le *Mark I*), et le *Short Code*, un interpréteur de pseudo code conçu en 1949 par John W. Mauchly à destination des ordinateurs B.I.N.A.C. et U.N.I.V.A.C. I et II. Mais le virage le plus important sera assurément amorcé entre 1951 et 1958 avec l'apparition successive des langages A-O (langage de programmation mathématique à compilateur intégré que Grâce Hopper créa en 1951 à la *Remington Rand* pour l'U.N.I.V.A.C. I), *Autocode*⁹, FORTRAN (pour *FOR*Mula *TRAN*slator, langage spécialement développé par John Backus pour l'I.B.M. modèle 704, un ordinateur à virgule flottante), et *International Algebraic Language* (ou ALGOL 58, un langage de programmation défini par un comité d'informaticiens européens et américains au rang desquels figurait également John Backus). La multiplication et la diffusion des langages de ce genre, assorties à un effort croissant réalisé en direction d'une formulation de plus en plus symbolique des instructions informatiques – on se dirigera ainsi progressivement vers une expression des ordres proche du langage naturel comme on peut le voir par exemple en PASCAL ou en BASIC – permettront désormais aux utilisateurs d'ordinateurs d'écrire, de modifier et de corriger leurs programmes (pilotes de système ou applications professionnelles) avec une facilité bien plus importante qu'ils ne pouvaient le faire auparavant.

Au cours des années 50 la très grande majorité des logiciels était ainsi écrite par les utilisateurs des machines. Les fabricants d'ordinateurs, fussent-ils les plus puissants et les mieux implantés, fournissaient en effet rarement plus à leur clientèle qu'un manuel complexe indiquant comment telle ou telle machine particulière pouvait être programmée. De fait cela supposait que toute organisation abritant un système informatique emploie à plein temps une équipe de programmeurs professionnels afin de se trouver en mesure de le faire fonctionner.

⁹ Ce vocable est en fait un terme générique auquel on recourait autrefois pour désigner les langages symboliques appartenant à la famille des assembleurs. Le premier langage de cette sorte a été créé en 1952 par Alick E. Glennie, un chercheur du *Royal Armaments Research Establishment*. Il était destiné à l'ordinateur *Mark I* de l'Université de Manchester.

Or à l'époque ces derniers, comme du reste les machines dont ils avaient le privilège de maîtriser les arcanes, formaient une caste peu nombreuse dont il convenait de rémunérer les membres en proportion du caractère réellement exceptionnel de leur talent. Avec la diffusion de langages de programmation accessibles, la formation en masse de programmeurs provoquée par le lancement des grands projets informatiques de la défense nationale américaine (notamment le S.A.G.E.), et l'organisation des utilisateurs en coopératives de partage d'applications et d'informations techniques (tels le groupe SHARE fondé en 1955 à l'initiative d'I.B.M. et rassemblant des possesseurs de modèles 704), cette situation évoluera grandement. Alors que les compétences des usagers institutionnels et commerciaux n'auront de cesse de se développer, entraînant ainsi la naissance d'une nouvelle classe d'experts – ceux-là seront les grands officiants et les champions d'une deuxième informatique caractérisée par sa propension à la centralisation et au verrouillage de l'information - les constructeurs, eux, tendront de plus en plus à fournir à titre « gracieux » des utilitaires système et des applications avec les machines achetées ou louées. La conjugaison de ces deux tendances fortes jouera comme de bien entendu en faveur de la standardisation du *software*. Enfin à partir de 1970 offres matérielle et logicielle se désolidariseront et, parallèlement à la montée en puissance de la mini informatique – et bientôt à celle de la micro informatique –, connaîtront un développement tout à fait spectaculaire sans que jamais plus elles ne soient amenées à se confondre. Sur le plan économique cette dynamique de perfectionnement, de diversification et de fiabilisation du logiciel se soldera par l'apparition et la rapide structuration d'un marché correspondant. Ce nouveau marché sera d'ailleurs amené à connaître en l'espace d'une quinzaine d'années à peine un schéma d'évolution tout à fait extraordinaire de même qu'un certain nombre de transformations structurelles fondamentales non moins remarquables. Au nombre de trois, elles joueront pour nous comme autant de points de repère essentiels dans notre tentative d'appréhension et de compréhension de l'histoire du logiciel.

Les deux derniers grands points ou caractères spécifiques qui à notre sens permettent de définir avec une certaine justesse la « deuxième informatique » concernent le développement des technologies matérielles et logicielles qui permirent l'instauration de modalités d'emploi de l'ordinateur totalement nouvelles. Il s'agit d'une part de l'invention puis de la mise en application du concept de *time-sharing*, à partir de 1957 (avec le *Compatible Time-Sharing System* dont seront plus tard dérivés les O.S. *Multics* du M.I.T. *Project Multiple Access Computer* et *Unix* des *Bell Labs/AT&T*), et d'autre part de la réalisation des grands réseaux informatiques militaires (S.A.G.E., A.R.P.A.N.E.T.), civils et

commerciaux (par exemple le S.A.B.R.E. et le PANAMAC développés par I.B.M. pour les compagnies aériennes *American Airlines* et *Pan America* et l'E.R.M.A., conçu et réalisé par le *Stanford Research Institute* et *General Electric* pour le compte de la *Bank of America*).

2.2. Montée en puissance et autonomisation du logiciel : des langages de programmation évolués à l'émergence d'une industrie du software structurée et sectorisée.

2.2.1. Etat des lieux.

La diffusion massive de l'ordinateur auprès d'utilisateurs de plus en plus nombreux et diversifiés, aussi bien en genres qu'en besoins, nécessita rapidement que les entreprises produisant ces instruments mettent au point des langages informatiques permettant d'optimiser et d'accélérer, voire de faciliter, leur programmation. Pour John Von Neumann on le sait, le langage informatique idéal était celui sur lequel reposait fondamentalement l'économie interne des machines, c'est-à-dire le binaire¹⁰. En droit cela va sans dire, cette façon d'envisager les choses était absolument justifiable et compréhensible. Le recours à un formalisme logique bivalent convenait à la perfection à la programmation d'un automate computationnel universel dont les composants électroniques, ou plutôt les *éléments* pour reprendre ici la terminologie usitée par le mathématicien dans le *First Draft of a Report on the EDVAC*, ne pouvaient par nature adopter que l'un ou l'autre de deux états exclusifs à un instant donné. Il va toutefois sans dire qu'un pareil langage (mieux vaudrait parler de code en l'occurrence) à cause de sa complexité, de sa contre intuitivité native, et du temps proprement disproportionné qu'il aurait exigé pour être mis en œuvre concrètement – y compris dans le cas où l'on aurait souhaité générer de petites procédures grâce à lui - ne pouvait raisonnablement pas être utilisé dans le cadre d'une pratique informatique courante. Si dans les années où furent construits les premiers prototypes d'ordinateurs, une telle modalité de programmation pouvait encore être tolérée – de toute manière il est vrai qu'il n'existait pas

¹⁰ Au début des années cinquante, Von Neumann fut engagé par I.B.M. en qualité de consultant (sur les projets dits de « technologie avancée »). En 1954, Von Neumann assista à une réunion hebdomadaire où John Backus effectua une présentation du FORTRAN. Selon les témoins de la scène, le mathématicien ne se montra nullement impressionné par le nouveau langage, poussant l'audace – voire même la provocation – jusqu'à adresser à l'auditoire cette interrogation à peine croyable: « pourquoi pourrait-on désirer plus que le langage machine ? ».

d'autre alternative - cela cessa d'être chose possible dès lors que l'ordinateur commença à entrer en fonction au sein d'organismes scientifiques et de grandes entreprises.

Il faut bien se rendre compte que dans les toutes premières années de l'informatique programmer un système en langage machine revenait à composer des séries de « 0 » et de « 1 » aussi interminables qu'implacablement structurées, à l'intérieur desquelles toute erreur de type ou de positionnement de données était susceptible d'entraîner des conséquences fort nuisibles à la bonne effectuation des travaux informatiques. Ainsi identifier et localiser ici une ou plusieurs erreurs syntaxiques ou structurelles dans un programme rédigé en langage machine pouvait s'avérer une tâche aussi laborieuse que son processus d'écriture initial. De surcroît pour que ces séries binaires soient non seulement rationnelles, mais pour qu'elles puissent aussi produire exactement le ou les effets que visait leur programmeur – ce qui était loin d'être aussi évident qu'il peut y paraître a priori - celui-ci se devait impérativement de disposer d'une connaissance parfaite de l'architecture fine de l'ordinateur sur lequel il travaillait. Bien entendu le travail premier du programmeur – écrire le programme – pouvait parfaitement être effectué en recourant à une langue formelle ad hoc. C'était par exemple ce que les programmeurs de l'E.D.S.A.C. et de l'E.D.V.A.C. faisaient pour préparer les routines destinées à ces deux machines, en se servant d'instructions élémentaires comportant des mnémoniques. Mais dans tous les cas, et c'est ce qu'il est vraiment impératif de ne pas perdre de vue ici, c'était au programmeur et non à l'ordinateur qu'était dévolue la tâche toujours harassante et souvent hasardeuse consistant à traduire le programme initialement exprimé sur un bloc de papier en langage symbolique (pour des raisons d'évidente commodité) en langage machine (pour des raisons pratiques tout aussi évidentes).

Dans ces conditions, programmer un système informatique réclamait donc que l'on possédât un esprit logique hors du commun, doublé de compétences techniques tout à fait inhabituelles. Peut-être – sûrement – étaient-ce là des prouesses intellectuelles dont étaient capables Alan M. Turing et John Von Neumann, mais ces deux personnalités du monde académique, en plus d'être des mathématiciens d'exception, étaient aussi les pères fondateurs de l'informatique et les créateurs des premiers prototypes d'ordinateurs¹¹. Aussi en connaissaient-ils et en maîtrisaient-ils les arcanes logiques et technologiques avec une virtuosité que seul un nombre très limité de personnes au monde pouvait forcément prétendre

¹¹ Le nom de Turing doit être associé au Colossus (machine à décrypter, Bletchley Park), à l'A.C.E. (ordinateur, *National Physical Laboratory*) et au Mark I (ordinateur, Université de Manchester). Celui de Von Neumann à l'E.N.I.A.C., à l'E.D.V.A.C. (*Moore School of Electrical Engineering*, Université de Pennsylvanie), à l'I.A.S.C. (*Institute for Advanced Study*, Université de Princeton) et à la firme I.B.M. dont il était un des principaux consultants.

atteindre. Au mois de janvier 1952, c'est-à-dire dix mois après que l'U.S. *Census Bureau* ait officiellement pris possession de son UNIVAC I (une machine qui rappelons-le fut commercialisée par la *Remington Rand* après que celle-ci eut rachetée l'E.M.C.C., l'entreprise de John P. Eckert et de John W. Mauchly), la revue bimensuelle américaine *Fortune* publia un des premiers articles de la grande presse consacré aux ordinateurs. Celui-ci était intitulé « robots de bureau ». Ce titre n'est pas quelconque car si on avait déjà parlé de l'ordinateur comme d'un « cerveau électronique » à l'occasion de quelques reportages publiés ici ou là en Grande-Bretagne ou aux Etats-Unis entre 1946 et 1950, c'était très indubitablement une des premières fois où l'on voyait ce dernier instrument qualifié de robot et surtout où on le trouvait associé à un environnement autre que scientifique ou militaire. Rappelons que la notion de « robot » fut introduite en 1921 par l'écrivain Karel Čapek, dans le cadre d'une pièce de théâtre intitulée *Rossum's Universal Robots*. Dérivé du terme tchèque « *robota* », lequel renvoie originellement à l'idée d'un travail asservissant et répétitif qu'exécuteraient par exemple des personnes en situation de servitude, il est comme chacun sait employé aujourd'hui pour désigner un automate électronique sophistiqué – celui-ci dispose quelquefois d'une autonomie relative et affiche une figure anthropomorphe - capable de réaliser un certain nombre de tâches préprogrammées dans un contexte industriel (e.g. robots peintres), scientifique (robots martiens), militaire (drones) ou ludique.

Qu'un journaliste appartenant à un grand magazine national qualifie les ordinateurs de « robots de bureau » au début des années cinquante ne pouvait signifier que deux choses. D'une part le caractère universel de ce type de machines, autrement dit leur capacité fondamentale à accomplir n'importe quel type de tâches pourvue qu'elles soient de nature algorithmique, commençait à être comprise et reconnue par une partie grandissante des observateurs de l'époque et également du public. Ces instruments électroniques tout aussi rares que dispendieux n'étaient donc plus seulement d'énigmatique et fragiles golems d'acier et de verre créés et placés au service exclusif des armées et/ou des savants dans le but de calculer d'énigmatiques problèmes de physique et de mathématique à des vitesses défiant l'imagination et les possibilités humaines. D'autre part le fait que l'on les présente ainsi comme des « robots de bureau » attestait que les grandes machines commençaient tout doucement à sortir des laboratoires universitaires et militaires pour investir progressivement les espaces de travail civils. Car au fond, voilà bien ce qu'était ou plutôt ce que pouvait être aussi l'ordinateur : un *robot* de bureau. Comprendre que si la formidable machine inventée par Turing et Von Neumann était par exemple capable de résoudre des équations liées à la stabilité des ondes de choc engendrées par l'explosion d'une bombe A en des délais

prodigieusement confondants, elle avait également la capacité de devenir un esclave administratif infatigable et quasi infaillible – un robot au sens littéral du terme donc - excellent à la manipulation des symboles alphanumériques comme elle pouvait le faire à celle des quantités pures. A partir de ce moment, on commença peu à peu à cesser de considérer les calculateurs électroniques à programme interne comme de monstrueux cerveaux artificiels mystérieux et ultra protégés pour les voir davantage à la manière d'outils de travail certes encore rarissimes, mais extraordinairement performants.

Parmi les très nombreuses suites qu'entraîna l'irruption de l'ordinateur dans l'univers du travail à partir des années 1951-52, il en est une qui fut incontestablement de toute première importance pour le devenir de l'informatique. La « démocratisation » de l'ordinateur, via sa pénétration progressive mais toujours ascensionnelle dans la sphère économique, ne devait bien entendu pas signifier la disparition de la caste des ingénieurs et des techniciens spécialistes qui, depuis 1946, avait veillé sur sa genèse et son évolution. Jusqu'à 1965 et l'apparition des mini-ordinateurs P.D.P-8 de D.E.C., la programmation et la mise en oeuvre des *mainframes* demeura comme nous nous sommes efforcés de le montrer précédemment leur privilège quasi inattaquable. Il n'empêche: ces nouveaux usages informatiques possédaient leurs spécificités et leurs contraintes propres – la moindre n'étant pas l'exigence de rentabilité – qui réclamaient que l'on définisse des applications adaptées en collaboration avec les gens du métier et aussi que l'on conçoive des outils pour rendre plus aisées et rapides l'écriture, la correction et l'éventuelle mise à jour de ces softwares professionnels.

Chacun sait parfaitement que l'activité commerciale n'est pas une chose qui s'accommode longtemps de fixité ou d'immobilisme. Cela est d'autant plus vrai qu'elle s'exerce à grande échelle. Dans un secteur où la rapidité et la réactivité sont considérées comme autant de vertus cardinales, l'arrivée de l'ordinateur ne pouvait par conséquent représenter qu'une chose éminemment positive. Toutefois et dans de pareilles conditions, on ne peut que s'interroger sur l'intérêt véritable qu'une grande entreprise aurait eu à posséder une machine horriblement coûteuse, fragile et contraignante sur le plan logistique si les délais nécessaires à la composition de ses programmes et à leur débogage s'étaient révélés de très loin supérieurs au temps exigé pour la production des résultats attendus. A cela, il faudrait encore ajouter le pourcentage non négligeable que le montant des salaires destinés aux seuls programmeurs d'ordinateurs représentait à cette époque dans le budget d'exploitation global des machines. Si d'une façon générale les systèmes informatiques étaient chers, toutes proportions gardées, le coût du travail des gens capables de les faire fonctionner ne l'était pas moins. Aussi, lorsque des solutions matérielles consistantes commencèrent à se dessiner

regardant la façon des organes principaux des ordinateurs – logique des C.P.U en tubes à vide, mémoires internes en tubes cathodiques ou en matériaux magnétiques – on commença à se préoccuper davantage de la question du perfectionnement et de l'optimisation des moyens permettant d'assurer leur programmation.

2.2.2. Le *Plankalkül* de Konrad Zuse.

Depuis que les premiers prototypes d'ordinateurs étaient devenus opérationnels – et même un peu avant – quelques tentatives tout à fait dignes d'intérêt avaient été faites en ce sens. On sait par exemple qu'entre 1942 et 1945-46, l'allemand Konrad Zuse avait consacré beaucoup de temps à la définition du langage algorithmique *Plankalkül* – terme que l'on pourrait traduire par l'expression « calcul de programmes » - en parallèle de la mise au point de l'ordinateur à relais Z4. Imaginé au cours du deuxième conflit mondial, le *Plankalkül* était un langage de programmation impératif de haut niveau intégrant plusieurs caractéristiques remarquablement avancées pour l'époque. Ainsi, en *Plankalkül*, il était par exemple possible de réaliser des opérations d'assignation (de type $V1 + V2 \Rightarrow R1$, soit additionner les variables $V1$ et $V2$ et ranger le résultat de cette sommation dans $R1$), des déclarations d'assignement comparatives utilisables notamment sur des structures (listes, tableaux) de données complexes (de type $V1 = V2 \Rightarrow R1$, soit comparer les variables $V1$ et $V2$ et si elles sont identiques, assigner la valeur « vrai » à la variable $R1$, sinon lui assigner la valeur « faux »), des appels de sous-routines avec différents critères d'arrêt, des déclarations conditionnelles, des itérations de déclarations, des opérations de transformation sophistiquées visant des listes individuelles ou couplées. Supportant les opérations de la logique des prédicats et de l'algèbre booléenne, le *Plankalkül* gérait également les types de données et pouvait accomplir des calculs sur des variables exprimées en virgule fixe ou flottante. Formé en ingénierie civile au *Technische Hochschule* de Berlin-Charlottenburg, Konrad Zuse conçut son langage de programmation en pensant au monde de l'ingénierie et des mathématiques. Resté relativement confidentiel puisque ardu – notamment à cause de son système de notation assez peu orthodoxe - et trop tardivement documenté¹², le *Plankalkül* exerça néanmoins une influence sur les concepteurs de langages informatiques de deux décennies suivantes et l'ALGOL (pour ALGOrithmic Language), dont la mise au point débuta au milieu des années 50, lui emprunta certaines caractéristiques significatives.

¹² Signé par K. Zuse, le premier document décrivant en détail le *Plankalkül* date seulement de 1972 (« Der Plankalkül », in *Berichte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung*, n°63, Sankt Augustin, 1972.).

Le docteur Zuse fut très certainement la première grande figure de l'histoire de l'informatique à avoir réalisé un pas significatif en direction de l'élaboration d'un langage de haut niveau, c'est-à-dire d'un langage de programmation qui se rapproche plus de l'utilisateur du système en termes de syntaxe et de structures que du mode opératoire électro-numérique binaire des machines. Mais s'il fut le premier, il ne fut pas non plus le seul. Le Z4 fut finalement installé dans les locaux de l'Institut Fédéral de Technologie de Zurich¹³ au cours de l'année 1950, après avoir été minutieusement restauré par le personnel de la *Zuse KG* (une entreprise fondée en 1949 par K. Zuse). Les différents composants de la machine avaient en effet été récupérés par l'inventeur en 1947 dans le petit village Bavarois d'Hinterstein, endroit où lui et ses assistants les avaient dissimulés à la fin de la guerre dans des conditions passablement rocambolesques. C'est en effectuant des travaux sur le Z4 que le mathématicien suisse Heinz Rutishauser¹⁴ eut une importante intuition : l'ordinateur étant par essence un automate logique universel capable de manipuler des signes alphanumériques qui en raison dernière étaient toujours représentés en binaire, il était sans nul doute possible de le programmer de manière à ce qu'il vérifie et traduise lui-même en langage-machine les séquences d'instructions que l'utilisateur pouvait avoir précédemment écrites en un quelconque langage symbolique. En procédant de cette façon, la conception et la rédaction des programmes devaient toujours être du ressort de l'utilisateur de l'ordinateur. Cependant les séquences les plus difficiles de la procédure, à savoir le contrôle et la traduction en binaire des routines, pourraient être entièrement confiées à la machine. La notion qui se profilait par conséquent derrière l'idée de H. Rutishauser n'était autre que celle de compilateur (ou bien d'interpréteur dans le cas où la traduction automatique aurait été opérée ligne par ligne).

A dire vrai, si cette idée était extraordinairement intéressante et prometteuse, elle n'était pas neuve, même en 1950. David J. Wheeler l'avait déjà conçue et partiellement implémentée au début de l'année 1949 à l'Université de Cambridge. Élégante suite d'une trentaine d'instructions symboliques gérant les mnémoniques et les valeurs numériques exprimées en décimal, ses *Initial Orders* facilitaient grandement la programmation de

¹³ *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich* ou E.T.H.Z.

¹⁴ Dépêchés spécialement aux Etats-Unis par le mathématicien Eduard Stiefel, lequel souhaitait établir un nouvel Institut de Mathématiques Appliquées à l'E.T.H.Z., Heinz Rutishauser et son collègue Ambros Speiser furent chargés de recueillir dans ce pays des informations de première main concernant les nouvelles machines digitales électroniques à programme enregistré. C'est ainsi qu'ils passèrent une bonne partie de l'année 1949 à Harvard et à Princeton, aux côtés d'Howard H. Aiken puis de John Von Neumann. On sait également qu'ils virent l'E.N.I.A.C. à l'U.S. *Army Proving Ground* d'Aberdeen – au moment même où Richard Clippinger était en train de convertir le grand calculateur électronique en ordinateur – et le calculateur électromécanique *Mark II*, à l'U.S. *Navy Proving Ground* de Dahlgren. Avant que le Z4 ne soit installé à Zurich, Rutishauser possédait donc une assez bonne connaissance des ordinateurs.

l'E.D.S.A.C. en simplifiant l'écriture de ses routines et en assurant leur traduction automatique dans le langage fondamental de la machine. En revanche, ils ne prenaient pas en charge leur vérification. Ainsi, si une ou plusieurs erreurs de programmation étaient commises au moment de l'écriture du programme et qu'elles passaient inaperçues aux yeux de l'opérateur, seuls le comportement erratique de l'ordinateur, son arrêt pur et simple ou encore la production de résultats inopinés pouvaient en signaler la présence. Ne restait plus alors qu'à découvrir le ou les bogues incriminés en passant longuement et consciencieusement au crible les innombrables lignes de code qui constituaient le programme corrompu. Une des réponses les plus efficaces qui put être mise au point afin de résoudre en partie cet embarrassant problème fut la définition de bibliothèques de sous-routines. Il s'agissait comme nous avons eu précédemment l'occasion de l'expliquer de répertoires de sous-programmes pré écrits, vérifiés et déjà enregistrés sur cartes ou bandes, permettant, par simple intégration ou appel dans un corps de programme, de réaliser des fonctions données. En plaçant à la disposition des programmeurs des séquences de code fonctionnel saines il devenait possible de réduire d'autant le nombre de lignes de code qu'ils avaient à écrire tout en diminuant de façon appréciable la probabilité de les voir commettre des erreurs au cours du processus de composition. Tous ces concepts novateurs furent publiés aux Etats-Unis en 1951, dans un texte intitulé *The Preparation of Programs for an Electronic Digital Computer*¹⁵. Premier ouvrage dédié à la programmation des ordinateurs, ce manuel eut une importante influence sur les programmeurs des années cinquante, érigeant ainsi les idées développées autour de l'E.D.S.A.C. de l'Université de Cambridge en modèle de référence.

2.2.3. Les compilateurs de Grace Murray Hopper.

Une autre étape décisive de l'histoire du logiciel en général et des outils de programmation en particulier fut franchie au cours des années 1952-53, à la *Remington Rand*. Fait extrêmement rarissime dans l'histoire de l'informatique, c'est une femme, l'américaine Grace Brewster Murray Hopper, qui se trouve à son origine. Diplômée de l'Université de Yale en mathématiques, elle enseigna cette discipline au *Vassar College* jusqu'en 1943, année où elle prit la décision de rentrer dans l'armée. Au mois de décembre 1943, elle intégra l'*U.S. Navy Reserve* et fut versée au *Bureau of Ordnance Computation* de l'Université d'Harvard. Placée sous les ordres du commandant Howard H. Aiken, G. M. Hopper travailla avec grand

¹⁵ M. V. Wilkes, D. J. Wheeler, et S. Gill, *The Preparation of Programs for an Electronic Digital Computer*, Cambridge, Massachusetts, Addison Wesley, 1951.

talent à la préparation des séquences de contrôle destinées aux calculateurs à relais *Mark I* et *II*. Elle co-rédigea d'ailleurs les manuels d'utilisation de ces deux instruments de calcul. En 1946, après avoir reçu le *Naval Ordnance Development Award* pour la qualité de son travail, elle ne fut pas autorisée à demeurer dans l'armée en raison de son âge. Plutôt que de retourner au *Vassar College* afin de retrouver son ancien poste, elle choisit de demeurer à Harvard, aux côtés d'Howard H. Aiken, en qualité de chercheur civil associé à l'*Engineering Sciences and Applied Physics Department*. Là, elle continua à travailler sur le *Mark II* tout en prenant part au développement de son successeur, le *Mark III*. Trois ans plus tard, sollicitée par John W. Mauchly, elle quitta la prestigieuse université américaine pour rejoindre la compagnie informatique *Eckert Mauchly Computer Corporation*, que John P. Eckert et lui-même avaient créée au mois de décembre 1947. A son arrivée à l'E.M.C.C. Grace M. Hopper fut affectée à l'*Applications Department*, un groupe de recherches spécifiquement chargé du développement d'applications commerciales, de sous-routines fonctionnelles et de codes opérationnels C¹⁶ (une dizaine de ces ensembles d'instructions seront successivement mis au point entre 1947 et 1949), destinés au B.I.N.A.C. (*Binary Automatic Computer*), et à un ordinateur dont le processus de construction n'était pas encore achevé, l'UNIVAC. Il doit être noté que l'année même où l'ancienne militaire rejoignit l'E.M.C.C., J. W. Mauchly inventa le *Short Code Orders* (encore noté SHORT-CODE ou SHORTCODE). Il s'agissait là d'un interpréteur de pseudo-code typiquement orienté vers la réalisation de travaux mathématiques. Faisant appel à une série d'expressions numériques formées de deux chiffres que l'ordinateur était en mesure de reconnaître comme des codes correspondant à des instructions, il permettait à des utilisateurs expérimentés d'entrer directement des équations dans la machine. Cependant, puisque l'utilisation du *Short Code Orders* se traduisait par la présence d'une couche logique additionnelle entre l'ordinateur et son opérateur – nous pourrions qualifier cette dernière d'interface opérationnelle rudimentaire – l'exécution des séquences formulées par son intermédiaire était forcément plus lente que celle des expressions directement déclarées en langage machine (cinquante fois environ). A l'inverse, le temps-programmeur requis pour préparer le code en SHORTCODE était nettement inférieur à celui qui aurait été nécessaire pour le rédiger en langage machine.

La mise au point précoce du *Short Code Orders* fait que l'on attribue quelquefois à John W. Mauchly la qualité d'inventeur du premier langage informatique de haut niveau. En

¹⁶ On ne fera évidemment pas la confusion entre les codes C (par ailleurs numérotés de 1 à 10), créés à la fin des années 40 à l'E.M.C.C. et le fameux langage que les américains Kenneth Thompson et Dennis Ritchie développèrent aux *Bell Laboratories* au début des années 70 sur la base du langage B (en parallèle du système d'exploitation UNIX).

vérité, cette façon de présenter les choses nous paraît être par trop simplificatrice, et donc légèrement abusive. D'abord parce que les commandes du SHORTCODE étaient des pseudo-instructions formulées au moyen d'un code mathématique; il ne s'agissait donc pas de commandes exprimées en pseudo langage naturel et encore moins en langage naturel. Or si le BASIC et le C peuvent sans problème se voir qualifiés de langages de haut niveau, ce n'est pas le cas de l'assembleur – langage de bas niveau par excellence - lequel est pourtant nettement plus proche du SHORTCODE que ne le sont les deux codes précités. Ensuite le fait est qu'il en fut de la genèse et de l'évolution des codes informatiques (langages, applications), comme de celles du calculateur électronique à programme enregistré. Pas plus qu'on ne pouvait le faire au sujet de l'ordinateur, on ne saurait par conséquent prétendre ici de façon légitime qu'un individu ou qu'une communauté d'individus oeuvrant de concert au sein d'un même organisme créèrent *le* premier langage informatique de haut niveau. Ces structures logiques hautement élaborées dont la manipulation s'avérait parfois aussi compliquée que le processus même de leur conception se sont en effet construites de manière progressive, par emprunts et échanges incessants entre des groupes divers, issus de différents pays. Dans ce cas non plus, on ne saurait parler de phénomène de « génération spontanée ».

Minée par les difficultés financières liées au développement du B.I.N.A.C. et le succès plus que mitigé que ce premier ordinateur rencontra auprès de la *Northrop Aircraft Corporation*, son commanditaire, l'E.M.C.C. finit par être absorbée par la *Remington Rand Corporation* courant février 1950¹⁷. Cette acquisition n'empêcha pas Murray G. Hopper de continuer à exercer avec talent ses activités de programmatrice au sein de la division applications de la société. A la fin de l'année 1951, confrontée comme l'ensemble des autres membres de l'*Applications Department* à la littérale prolifération des sous-routines que les codeurs travaillant pour cet organisme avaient incessamment conçues depuis les années 1948-49, elle prit la résolution de mettre au point un moyen logique capable d'en rationaliser l'ordonnancement et d'en optimiser l'utilisation sur l'UNIVAC. Cet effort aboutit à la création, en mai 1952, du premier compilateur de l'histoire, le « A-0 » (aussi appelé *A-Compiler*). Qu'on y prenne bien garde ! Le terme *compilateur* – du latin *compilātōr*, pillard, plagiaire – ne doit pas uniquement être entendu ici en sa moderne acception informatique. Selon le dictionnaire informatique Sybex, on désigne aujourd'hui par le mot compilateur « un

¹⁷ Suite à une fusion opérée en 1952 avec l'*Engineering Research Associates* (elle aussi rachetée par *Remington Rand* en décembre 1951), l'E.M.C.C. devint une des composantes de la division UNIVAC, une unité de R&D nouvellement créée au sein de cette grande compagnie. De 1950 à 1952, l'E.M.C.C. continua néanmoins à jouir d'une certaine indépendance, tout comme ce fut le cas de l'E.R.A., entité avec laquelle elle entretenait d'ailleurs des rapports de compétitivité.

*logiciel réalisant la traduction intégrale d'un programme, d'un langage de haut niveau en langage machine*¹⁸». Au sens moderne, un compilateur n'est donc ni plus ni moins qu'un code informatique dédié assurant automatiquement la transposition des programmes écrits dans un langage compréhensible par l'utilisateur de l'ordinateur, en un code binaire exécutable par celui-ci. Or cela ne correspondait pas vraiment à ce que M. G Hopper avait en tête quand elle imagina le A-0. Pour elle et selon la définition qu'elle devait en donner en 1978 :

*« Ce n'était pas ce que vous appelleriez aujourd'hui un [compilateur] et ce n'était pas non plus ce que vous appelleriez aujourd'hui un « langage ». C'était une série de spécifications. Pour chaque routine, vous écriviez quelques spécifications. La raison pour laquelle nous l'appelions [le A-0] compilateur tenait au fait que chaque sous-routine se voyait attribuer un mot d'appel [call word], parce que les sous-routines étaient dans une librairie et que lorsque vous extrayez des choses hors d'une librairie, vous compilez des choses. C'est aussi simple que ça.*¹⁹ ».

D'après Jean E. Sammet, laquelle se faisait donc ici l'écho des propos tenus par M. G. Hopper :

*« Un compilateur doit au moins réaliser les fonctions suivantes : analyse du code source, récupération des sous-routines appropriées à partir d'une librairie, allocation des emplacements en mémoire et génération du code machine*²⁰*».*

Or selon l'ancienne programmatrice et historienne des langages informatiques, tout cela correspondait très exactement à ce que le compilateur A-0 développé pour l'UNIVAC pouvait faire. On voit en conséquence que les premiers compilateurs développés n'étaient pas seulement des programmes destinés à interpréter des expressions rédigées au moyen d'un symbolisme mathématique commode, avant de les retranscrire en un code fondamental exécutable par la machine. En lieu et place de cela, il s'agissait plutôt de logiciels spécialisés, qui permettaient d'*automatiser*, en en accroissant supposément l'efficacité, une partie de la délicate procédure de production des programmes. Cette tâche de programmation partiellement automatisée exigeait que la totalité des fonctions composant la librairie de sous-routines disponibles soit stockée sur un médium à accès rapide (sur l'UNIVAC elles étaient

¹⁸ Jacques de Schryver, *Dictionnaire Micro-informatique Mégapoche*, Paris Sybex, 1997.

¹⁹ In Jean E. Sammet, *Programming Languages: History and Fundamentals*, Englewood Cliffs, New-Jersey, Prentice-Hall, 1969, p. 12. Cité in Arthur L. Norberg, *Software Development at the Eckert-Mauchly Computer Company Between 1947 and 1955*, Charles Babbage Institute, 31 décembre 2003. Document librement consultable en ligne au format PDF à l'U.R.L. suivant: <http://www.cbi.umn.edu/iterations/norberg.pdf>.

²⁰ *Ibid.*

typiquement enregistrées sur les bandes magnétiques des unités UNISERVO). Parcourant alors la multitude de pseudo instructions composant le programme principal, le compilateur, après avoir identifié les *call word* leur correspondant, insérait en les copiant aux emplacements adéquats les sous-routines que le programmeur voulait précisément employer à cet endroit. Une fois cette tâche accomplie, il réalisait les dites fonctions, puis l'exécution du programme maître pouvait se poursuivre. Intuitivement on tend en général à assimiler un pareil processus à une sorte de travail d'assemblage consistant à intégrer de façon correcte des briques fonctionnelles – les sous-routines – au sein de la trame d'un complexe logique préexistant (le programme principal). La réalité était cependant beaucoup plus complexe que ne le laisse supposer ce commode raccourci figuré. Tout en procédant à l'insertion automatique des fonctions dans le corps du programme principal, le compilateur devait en effet systématiquement gérer les problèmes concernant la recherche et l'allocation des emplacements mémoire attribués aux variables nécessaires à leur exécution, de même que ceux regardant les résultats précisément produits par cette exécution. Tout ce travail se réalisait par conséquent dans un contexte dynamique et non pas statique, ce qui contribuait bien entendu à en compliquer considérablement le déroulement.

S'il fonctionnait bel et bien, le compilateur A-0 produisait dans les faits des résultats par trop insatisfaisants pour que l'on puisse sérieusement envisager d'en concevoir une version destinée à la commercialisation. En dehors de la qualité relative des codes qu'il était capable d'engendrer automatiquement, ce qui se trouvait incriminé ici en tout premier lieu était sa lenteur d'opération, de même que celle des programmes conçus par son moyen. Malgré ce défaut plutôt significatif – à dire vrai on peut bien se demander comment il aurait pu en être exempt puisqu'au fond il ne constituait rien de plus qu'une première tentative ? - le compilateur A-0 apportait la preuve indéniable qu'il était possible de s'affranchir de la très longue et très pénible tâche que représentait la programmation en langage machine en concevant un automate logique spécialement dédié à cette fin. Désormais l'objectif principal consistait à tenter de mettre au point un système de programmation automatique capable de générer des codes avec une rapidité et une efficacité comparables à celles caractérisant habituellement la production d'un programmeur humain expérimenté.

Nommée *Systems Engineer and Director of Automatic Programming Development* de la Division UNIVAC en 1952, Murray G. Hopper continua à œuvrer sans relâche au perfectionnement de ses compilateurs. C'est d'ailleurs sous son impulsion qu'un changement particulièrement remarquable leur fut apporté. M. G. Hopper pensait en effet qu'il était possible de programmer l'UNIVAC afin que ce dernier soit en mesure de reconnaître un

certain nombre de commandes directement exprimées en langue naturelle (ce pouvait être aussi des mnémoniques basées sur des mots appartenant à l'anglais). Travaillant en suivant cette nouvelle voie, la programmatrice et son équipe purent ainsi définir de nouvelles applications de programmation automatique, plus rapides et plus efficaces que le A-0, mais aussi plus proches de l'utilisateur que ne l'avait été ce dernier, étant donné l'orientation foncièrement « mathématisante » qui lui avait originellement été conférée. Entre 1952 et 1958 ce sont ainsi les compilateurs/assembleurs A2 et AT-3 qui firent leur apparition. Dans la foulée, des versions remaniées de ces logiciels conçus pour les UNIVAC I et II furent commercialisées sous les désignations respectives de ARITH-MATIC²¹ et de MATH-MATIC (ce dernier était similaire au FORTRAN). C'est aussi au cours de cette période – plus précisément à partir de février 1955 - que G. M. Hopper commença à créer le compilateur B-0. On connaît d'ailleurs peut-être mieux ce logiciel sous son appellation commerciale: FLOW-MATIC. D'aucuns considèrent que le B-0/FLOW-MATIC, langage spécifiquement orienté vers la production d'applications commerciales et administratives, fut le premier langage de programmation de haut niveau jamais mis au point. Il faut dire qu'au nombre des innovations dont il était porteur figurait une chose jusque là absolument inédite, à savoir la possibilité d'employer un certain nombre de commandes formulées directement en anglais courant (et non pas exprimées sous une quelconque forme numérique ou alphanumérique, fut-elle abrégée). Ajoutons aussi que les systèmes fonctionnant sous FLOW-MATIC permettaient à leurs opérateurs de définir des éléments de programme en recourant à des termes ad hoc, éventuellement empruntés à la langue naturelle. En conséquence, lorsqu'il souhaitait réaliser des opérations de comptabilité (comme l'édition de fiches de paye ou de factures par exemple), l'utilisateur de ce langage pouvait attribuer aux variables dont il avait besoin des labels d'identification énoncés en anglais. Les premières fois où elle exposa le principe du FLOW-MATIC, il fut répondu à G. M. Hopper qu'elle ne parviendrait jamais à ses fins, les ordinateurs ne comprenant pas l'anglais.

Ainsi qu'il vient d'être mentionné, le FLOW-MATIC mettait à la disposition de ses usagers un répertoire d'instructions complet, dont certaines étaient formulées en langue naturelle. On conçoit alors sans grande difficulté combien le fait de pouvoir composer des séquences de commandes telles que « TRANSFER A TO C », « COMPARE PRODUCT-NO (A) WITH PRODUCT-NO (B) ; IF GREATER GO TO OPERATION 10 ; IF EQUAL GO TO OPERATION 5 ; OTHERWISE GO TO OPERATION 2 » ou bien plus simplement encore « STOP » permettait de faciliter et d'accélérer l'écriture des programmes. De fait, là où en langage machine des

²¹ Avant d'être rebaptisé de la sorte pour des raisons commerciales, l'ARITH-MATIC s'appelait A-3.

compétences élevées et une attention sans faille étaient constamment requises de la part des programmeurs pour composer correctement les longues séries numériques correspondant aux lignes de code définissant les applications, le FLOW-MATIC autorisait une souplesse et une aisance d'emploi inédites et remarquables. Ici en effet il ne s'agissait plus seulement de manipuler des quantités ou des pseudos instructions algébriques entremêlant de façon passablement absconse des lettres et des chiffres. Pour la première fois depuis que cet instrument avait vu le jour, la possibilité était offerte aux utilisateurs d'ordinateurs de pouvoir également travailler avec des séquences de symboles alphanumériques faisant *immédiatement* sens pour eux. De surcroît, et à la différence de ce qui se produisait avec les autres langages de programmation où une pseudo instruction correspondait en général à un seul ordre machine, la plupart des commandes du FLOW-MATIC codaient individuellement pour plusieurs opérations fondamentales. Une seule instruction formulée dans les termes de ce langage évolué était par conséquent susceptible de provoquer l'exécution de plusieurs actions élémentaires au niveau le plus bas du système. Non content d'être basé en partie sur l'anglais, chose qui une fois de plus devait énormément simplifier l'écriture des programmes, le FLOW-MATIC, grâce au jeu de correspondance multiple qu'il instaurait ainsi entre commandes de haut niveau et instructions machine, permettait donc également d'en réduire la taille. Bien entendu, de tels avantages ne pouvaient pas ne pas s'accompagner de quelques contreparties négatives. La plus significative résidait dans le fait que l'ordinateur devait impérativement traduire en langage machine les lignes de code écrites en FLOW-MATIC avant de pouvoir les exploiter. Leur processus d'exécution exigeait en conséquence plus de temps que n'en réclamait celui des programmes directement produits en code binaire. Une chose n'en demeure pas moins sur laquelle ne subsiste strictement aucun doute : si l'on avait assigné à des programmeurs la tâche de rédiger une même routine d'abord en langage machine, puis en FLOW-MATIC, les difficultés de réalisation auxquelles ils se seraient très certainement heurtés dans le premier cas auraient été incomparablement plus importantes que celles qu'ils auraient peut-être pu rencontrer dans le second. Il ressort donc de cela que les ralentissements que pouvait éventuellement subir l'ordinateur lorsqu'il traduisait en binaire des programmes rédigés au moyen du FLOW-MATIC se trouvaient souvent compensés par les économies de temps énormes que ce langage autorisait en amont, c'est-à-dire durant les phases de conception et de correction des programmes.

Le FLOW-MATIC, langage évolué inventé par Grace M. Hopper au cours de la seconde moitié des années 50, incarnait une approche radicalement nouvelle de la programmation informatique. Pour la première fois en effet on se proposait de se détacher

radicalement du niveau des symbolismes mathématiques sur la base desquels tous les compilateurs et les autocodes de l'époque avaient été élaborés²², afin d'opérer un net rapprochement en direction de l'utilisateur et de son mode d'expression spécifique. Que la mise au point de ce langage de programmation novateur se soit déroulée au sein de la division UNIVAC de *Sperry Rand*, une des premières entreprises à avoir mis sur le marché des ordinateurs à vocation commerciale²³, ne saurait certainement pas être considéré comme un fait relevant du hasard. Elaborer un langage informatique faisant appel dans une large mesure à des vocables empruntés à la langue naturelle revenait en effet à mettre théoriquement la programmation de ces prodigieux automates à la portée d'individus qui n'étaient ni des physiciens ni des mathématiciens accomplis. Or lorsque l'on s'efforçait, comme *Sperry Rand*, de vendre ou de louer des ordinateurs à des structures et des organisations travaillant dans les domaines de l'économie et/ou de l'administration, le fait de mettre à la disposition de ces clients non spécialistes des outils logiques adaptés aussi bien à leurs besoins qu'à leurs capacités ne pouvait être perçu autrement que comme un impératif commercial. Le FLOW-MATIC réalisait précisément cela. Au prix il est vrai d'une très légère baisse de performances, il permettait, en tenant lieu d'interface programmatique entre la machine et l'humain, de réduire l'écart radical qui de fait existait (et existe toujours du reste) entre le mode d'expression naturel des utilisateurs d'instruments informatiques – mode qui appartient comme nous le savons à la sphère langagière – et la modalité d'opération fondamentale de ces systèmes – laquelle est d'essence logicomathématique.

Dans les années qui suivirent immédiatement la conception du FLOW-MATIC, Grace M. Hopper prit une part active à la mise au point du langage informatique d'affaires COBOL (pour *COmmon Business Oriented Language*). Coconceptrice du seul et unique langage de programmation alors destiné aux monde des affaires, elle fut ainsi conviée à occuper un des deux postes de conseiller technique qui avaient été créés au sein du comité exécutif du CODASYL (pour *COncference on DAta SYstems Languages*). La mission première de ce consortium fondé en 1959 et regroupant des représentants de l'industrie, de l'armée et de plusieurs organismes gouvernementaux²⁴ consistait à préciser les codifications et standards

²² Et encore ces derniers représentaient-ils un écart aussi notable qu'appréciable par rapport à ce que Von Neumann considérait comme étant la modalité idéale de programmation (soit l'écriture des programmes directement en code binaire).

²³ Cela par le jeu complexe des rachats. Car à proprement parler, c'est la société *Remington Rand*, elle-même reprenneur de l'E.M.C.C. au début des années 50, qui commercialisa la première les ordinateurs de la classe UNIVAC.

²⁴ Organisées sous le haut patronage de l'U.S. *Department of Defense*, les réunions du comité exécutif du CODASYL se déroulaient dans des locaux du Pentagone. Y prenaient part les représentants des six plus puissantes firmes américaines d'informatique (I.B.M., R.C.A., *Sperry Rand*, *Burroughs*, *Honeywell*, *Sylvania*),

des futurs langages informatiques. L'influence qu'exerça le FLOW-MATIC sur le COBOL est globalement reconnue, de la même façon qu'est admis le rôle déterminant que joua par la suite la programmatrice dans le processus de promotion – ce terme étant entendu ici au sens large – du COBOL auprès de ses utilisateurs potentiels. Elle participa ainsi à des démonstrations organisées avec certains des industriels membres du CODASYL, rédigea, avec son équipe, des manuels et des outils spécifiques pour le COBOL, et fit tout ce qui était en son pouvoir pour faire en sorte que la marine de guerre américaine adopte ce nouveau langage informatique de haut niveau. Enfin, sous sa direction, l'U.S. Navy développa un ensemble d'applications et de protocoles permettant d'éprouver et de valider les compilateurs écrits en COBOL. Ce langage dont les spécifications furent définies en 1960 est encore largement employé au jour où nous écrivons.

G. M. Hopper ne fut bien entendu pas la seule à réaliser des travaux de recherche et de développement dans le domaine des langages de programmation au cours de la première moitié des années 50. Nous avons déjà mentionné l'*Autocode* d'Alick E. Glennie, un compilateur rudimentaire que le physicien anglais avait conçu en 1952, pendant ses heures de liberté à l'Université de Manchester. L'*Autocode*, qui traduisait automatiquement des expressions symboliques en langage machine fut originellement conçu pour le *Mark I*. Cependant différentes versions en furent produites pour d'autres dispositifs informatiques, notamment ceux que fabriquait l'industriel britannique *Ferranti*²⁵.

2.2.4. Le « système » de J. H. Laning Jr et N. Zierler.

Nous allons à présent évoquer le travail que John Halcombe Laning Jr et Neal Zierler réalisèrent au *Massachusetts Institute of Technology*, durant les années 1953-54. Spécialement conçu pour l'ordinateur *Whirlwind*, leur langage de programmation possède la particularité de n'avoir jamais reçu aucune dénomination officielle (au besoin nous l'appellerons système de Laning/Zierler) Cela n'empêcha cependant pas les deux hommes d'en fournir une description exhaustive dans un rapport d'une trentaine de pages qu'ils intitulèrent « A Program for

ceux de l'U.S. *Air Force*, du *David Taylor Model Basin* (un groupement d'installations spéciales appartenant au gouvernement et destinées à tester le design des navires), et du *National Bureau of Standards*. A l'origine, il fut prévu que trois comités de travail (en plus du comité exécutif original) seraient créés : un chargé de travailler à court terme, un à moyen terme, et le dernier, à court terme. Seuls les deux premiers comités virent en définitive le jour. Il est à noter que certains membres de l'équipe que G. M. Hopper dirigeait à la division UNIVAC de *Sperry Rand* étaient membres du comité de travail à court terme du CODASYL.

²⁵ Il s'agissait des ordinateurs *Atlas*, *Titan*, et *Mercury*. L'*Autocode* de Manchester fut aussi adapté à deux machines produites par I.B.M., les ordinateurs modèles 702 et 705.

Translation of Mathematical Equations for Whirlwind I²⁶ ». Publié au début de l'année 1954 sous financement de l'U.S. *Air Force*, ce document proche d'un manuel de programmation connut une assez large diffusion au sein du milieu scientifique américain. Dans le résumé introduisant à son contenu, Laning et Zierler devaient présenter synthétiquement leur système en usant des termes suivants:

« *Un programme interprétatif pour le Whirlwind est décrit qui acceptera les équations algébriques, les équations différentielles, etc., écrites sur une bande de papier perforée Flexowriter en notation mathématique ordinaire (dans certaines limites imposées principalement par la [machine à taper] Flexowriter) comme entrée et fournira automatiquement les solutions désirées²⁷.* ».

Le programme « interprétatif » mis au point ici pour le *Whirlwind* fonctionnait à la façon d'un compilateur moderne. C'est-à-dire qu'il recevait tout d'abord comme entrées les éléments de code source que l'utilisateur avait dactylographiés au moyen d'un télétype électromécanique *Friden Flexowriter*, puis il traduisait ce dernier en code objet, forme logique directement « compréhensible » et exécutable par le *Whirlwind*. Le code source, ici, était constitué par les équations algébriques ou différentielles dont les scientifiques entendaient découvrir les solutions au moyen de l'ordinateur du M.I.T. Avant que ces données mathématiques ne soient fournies au *Whirlwind*, il était bien entendu nécessaire que les programmeurs de la machine procèdent à leur reformulation dans le symbolisme propre au système de Laning/Zierler²⁸. Mais ce langage à propos duquel John Backus, le père du FORTRAN, a pu dire naguère qu'il était « *un concept élégant élégamment réalisé*²⁹ » pouvait réaliser d'autres choses encore. Il était ainsi capable de conserver les traces des multiples allocations mémoire effectuées lors de l'exécution des processus (une particularité extrêmement appréciable dans le cadre des procédures de débogage des programmes). Il prenait aussi en charge l'appel de fonctions et la gestion des procédures et des sous procédures itératives (boucles). En dépit de son caractère élaboré, le système de Laning/Zierler ne rencontra jamais qu'un succès mitigé, y compris au sein du M.I.T.,

²⁶ J. H. Laning Jr et N. Zierler, « A Program for Translation of Mathematical Equations for Whirlwind I », *Engineering Memorandum E-364, Instrumentation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology*, janvier 1954. Ce rapport est consultable en ligne : <http://hrst.mit.edu/hrs/apollo/public/archive/1685.pdf> ou <http://community.computerhistory.org/scc/projects/FORTRAN/Laning%20and%20Zierler%201954.pdf>.

²⁷ Ibid. *Introduction*, p. III.

²⁸ Pour être réellement précis, ce que l'ordinateur recevait comme données en entrée était une représentation de ces équations, constituée par leur transcription sur des bandes de papier perforées.

²⁹ In [Ceruzzi, 1998], pp.86-87.

l'institution où il fut inventé et dont il ne parvint jamais à franchir les portes. Trois raisons au moins – les deux premières étant d'ordre technique, la dernière ayant trait au conservatisme féroce dont faisaient preuve certaines corporations au sein de la population informaticienne – peuvent être concurremment invoquées afin de comprendre pourquoi il en fut ainsi.

Dans ce qui précède, nous avons eu l'occasion d'évoquer l'histoire du *Whirlwind*. Cet ordinateur dont le financement avait largement été assuré par l'armée américaine était comme on s'en souvient un instrument fondamentalement destiné à la recherche scientifique. Or puisque le système de Laning/Zierler avait été mis au point pour cette machine, il ne pouvait qu'être orienté vers le domaine des mathématiques. Les utilisateurs habituels du *Whirlwind* n'avaient en effet cure du genre d'applications susceptible d'intéresser les usagers informatiques appartenant au milieu des affaires. Ils n'avaient pas besoin d'outils de programmation « génériques » mais de langages spécialisés leur offrant d'abord et avant toute autre chose la possibilité de manipuler et de résoudre des ensembles d'équations. Le langage de Laning/Zierler, que nous pourrions en conséquence qualifier de compilateur algébrique, correspondait à cela. Son symbolisme et son mode opératoire avaient été pensés précisément pour permettre la résolution des problèmes de cette nature. Il permettait à l'homme de se concentrer exclusivement sur la question qui l'amenait à avoir recours à l'ordinateur, en le débarrassant de celles liées au fonctionnement intime de cet instrument. Son extrême spécialisation dans le champ des mathématiques permet déjà de comprendre pourquoi le compilateur algébrique de Laning et Zierler n'intéressa jamais le monde de l'économie et des affaires. De la même façon que les scientifiques n'avaient aucune utilité d'un langage informatique orienté spécifiquement vers le business, les businessmen n'avaient nullement besoin d'un compilateur spécialement imaginé pour assurer le traitement des systèmes d'équations rencontrés en physique. Si diffusion il pouvait y avoir le concernant, elle ne pouvait donc intéresser que le monde des sciences. Ensuite, et c'est là la seconde raison d'ordre technique à laquelle nous faisons référence plus haut, l'exécution des programmes rédigés au moyen de ce langage était relativement lente. D'après Paul E. Ceruzzi qui se fait ici l'écho de remarques émises par Donald E. Knuth dans son article « The Early Development of Programming Languages.³⁰ », le compilateur de Laning/Zierler, une fois lancé, était une dizaine de fois moins rapide que les systèmes en code machine employés alternativement pour programmer le *Whirlwind*. Selon John W. Backus ces performances peu élevées étaient

³⁰ Donald E. Knuth et Luis I. Trabb Pardo, « The Early Development of Programming Languages. », in *Encyclopedia of Computer Science and Technology*, Marcel Dekker, New York, 1977, pp. 419-96, cité dans [Ceruzzi, 1998], pp.86-87.

principalement dues au fait que le compilateur de Laning/Zierler, à l'instar de tous les autres langages de programmation automatiques de la période, « *passaient leur temps dans des sous-routines en virgule flottante* ³¹ ». Les représentations approximées des nombres réels (grandes et petites quantités stockées sous la forme type signe/mantisse/exposant) que les ordinateurs étaient appelés à manipuler très fréquemment lors de l'exécution des applications informatiques de nature scientifique n'étaient alors pas prises en charge par les unités physiques de la machine. Il en allait exactement de même avec les registres d'index, ces espaces mémoire de traitement qui sont employés pour modifier les adresses des opérandes pendant l'exécution des programmes. Les compilateurs et les codes rudimentaires existant à l'époque devaient donc gérer – c'est-à-dire simuler - ces deux types de processus entièrement, ce qui avait forcément pour conséquence de ralentir leur opération. S'il était forcément plus pratique à utiliser que ces codes alternatifs, lesquels opéraient au plus près du niveau machine, la commodité d'usage qui caractérisait le compilateur du M.I.T. possédait donc une contrepartie passablement handicapante: en l'espèce, une lenteur marquée.

Ce qui amène directement à la troisième et dernière raison permettant de comprendre pourquoi le compilateur de Laning/Zierler passa quasiment inaperçu au cours des années 50. Cette raison était en fait une conséquence directe de la posture fortement conservatrice adoptée par un des groupes les moins nombreux et pourtant les plus influents de la communauté informaticienne d'alors, les programmeurs³². Au M.I.T. comme partout ailleurs à la même époque, ces derniers constituaient une caste séparée. Les membres de cette élite étaient en effet détenteurs d'un savoir rare – l'art de programmer les ordinateurs en langage machine – dont ils s'enorgueillissaient et sur lequel ils tendaient toujours à veiller avec une jalousie consommée. Cela étant rappelé et puisqu'elle faisait effectivement planer une menace sur l'exclusivité de leur talent et les divers privilèges qui lui étaient en général associés, la mise au point d'un langage algébrique facilitant la programmation du *Whirlwind* ne pouvait être accueillie par eux que d'une façon sinon hostile, du moins extrêmement réservée. Dès

³¹ John W. Backus, « The history of FORTRAN I, II and III. », *Proceedings First ACM SIGPLAN Conference on History of Programming Languages*, Los Angeles, 1981, (Section 1.1. *Attitudes about Automatic Programming in the 1950s*). Une version digitale de ce document est consultable en ligne à cette U.R.L.: <http://www.stanford.edu/group/mdd/SiliconValley/Backus/backus.html>. Indiquons que les pages de cet article ne sont pas numérotées.

³² La situation n'est en réalité pas si différente que ça aujourd'hui. S'il est évident que le nombre de programmeurs a augmenté dans des proportions absolument considérables depuis les années 50, le conservatisme et le sentiment élitiste qui caractérisait autrefois cette corporation se retrouve encore de nos jours mais sous des formes différentes. Elle s'exprime en général au travers des querelles opposants les « paroisses » concurrentes – ici par exemple le langage C se trouvera littéralement vénéré tandis que le BASIC sera impitoyablement dénigré alors que là ce sera l'inverse – et à l'intérieur même de ces églises où il subsiste un tiers-état et un haut clergé.

lors et étant bien compris que la caste des programmeurs représentait l'autorité suprême en la matière, le défaut de vitesse que le compilateur de J. H. Laning Jr. et N. Zierler accusait par rapport aux codes machine sur lesquels ces gens régnaient sans partage constitua très certainement pour eux le meilleur des arguments à opposer à son usage. Et de fait l'utilisation de ce langage informatique au M.I.T. demeura anecdotique. Quelques applications seulement furent programmées avec lui.

S'il arrive que l'on parle encore du compilateur algébrique de Laning/Zierler aujourd'hui c'est fréquemment en raison de l'influence supposée qu'il exerça sur les concepteurs du FORTRAN dans les premières années du développement de ce langage informatique. Pendant longtemps John W. Backus, l'architecte en chef de ce code de programmation extrêmement important, a en effet soutenu que le travail des deux chercheurs du M.I.T. les avait inspirés, lui et son équipe, dans le cadre de la mise au point de certains de ses aspects. Dans un article publié en 1981 et intitulé « The History of FORTRAN I, II, and III³³ », J. W. Backus a cependant démenti cette version des faits qu'en toute bonne foi, il avait pourtant lui-même longtemps contribué à alimenter. Quoi qu'il en soit et pour un faisceau de motifs que nous allons à présent nous employer à éclaircir, le FORTRAN occupe une place tout à fait singulière dans l'histoire des premiers langages de programmation, tant son impact sur l'industrie informatique des années 50 et 60 fut grand.

2.2.5. Le langage de programmation FORTRAN.

Le terme FORTRAN signifie *Formula Translation* ou *Formula Translator*. Notons que jusqu'à sa version 90 – une révision qui comme sa numération l'indique date de 1990 - le nom de ce langage se trouvait toujours écrit en caractères majuscules. A partir de cette date récente, le standard a changé et on a commencé à noter le nom de ses nouvelles évolutions en lettres minuscules (ainsi des Fortrans 90, 95 et 2003). Comme sa désignation le suggère aussi tout à fait clairement, le FORTRAN était un langage de programmation spécialement conçu pour effectuer des calculs scientifiques. Les travaux préliminaires touchant son développement débutèrent au début de l'année 1954. Comme nous le notions plus haut, la

³³ John W. Backus, « The history of FORTRAN I, II and III. », *Proceedings First ACM SIGPLAN Conference on History of Programming Languages*, Los Angeles, 1981. On se rapportera plus particulièrement à la section 1.3. (*Programming Systems in 1954*) de cet article dans laquelle J. W. Backus expose les raisons de son propre égardement à propos de l'importance du rôle joué par le système de Laning/Zierler dans le développement du FORTRAN.

place occupée par le FORTRAN au sein du panthéon des premiers langages informatiques n'est pas des moins importantes. Il est vrai qu'à l'exception notable des compilateurs créés par Grace M. Hopper pour les UNIVAC de *Remington Rand* et *Sperry Rand*, la très grande majorité des efforts réalisés en matière de mise au point de codes de programmation au cours de la période 1950-57 fut le fait de spécialistes travaillant dans des laboratoires universitaires ou militaires qui, parce qu'ils l'avaient construit et/ou en avaient besoin dans le cadre de leurs recherches, disposaient d'un ordinateur. Le FORTRAN, lui, obéissait à une logique différente. Il fut en effet spécialement développé par une équipe d'I.B.M. pour le *Data Processing System 704*, un *mainframe* à mémoire en tores de ferrite pensé pour les applications scientifiques et d'ingénierie que le plus puissant fabricant d'ordinateurs américain annonça en 1954, comme le successeur de l'*Electronic Data Processing Machine* modèle 701³⁴.

John W. Backus fut le principal maître d'œuvre du langage FORTRAN. Ce mathématicien diplômé de l'Université de Columbia avait été recruté par la société I.B.M. en 1950, à l'âge de 26 ans. Avant de commencer à travailler sur ce qui allait devenir le *Formula Translation*, il avait fait ses premières armes trois années durant sur le *Selective Sequence Electronic Calculator*, préparant notamment pour cette machine à tubes à vides et relais électromécaniques des tables d'instructions destinées au calcul des positions des différentes planètes du système solaire. En 1953, J. W. Backus mit au point le *Speedcode* en compagnie de son collègue Harlan Herrick Jr. Quelquefois qualifié de « proto FORTRAN » cet interpréteur de pseudo-code créé pour être utilisé sur les ordinateurs I.B.M. 701 et 650 possédait la double particularité de prendre en charge l'effectuation des opérations en virgule flottante et d'émuler la présence de registres d'index. Toutefois si l'existence de ces deux fonctionnalités tendait à faciliter notablement le travail des programmeurs des I.B.M. 701 et 650, elle s'accompagnait d'un désavantage fort peu insignifiant, celui de ralentir le fonctionnement de ces machines. En plus de générer des séquences de code exécutable à partir d'un pseudo-code symbolique dont il assurait la traduction vers le niveau opérationnel fondamental du système, le *Speedcode* devait en effet gérer – c'est-à-dire simuler sur le mode logique - ces deux catégories d'opérations nécessaires aux calculs scientifiques. D'où – paradoxe ! – sa grande lenteur. C'est fort de cette expérience que J. W. Backus prit contact avec son supérieur, le Dr. Cuthbert C. Hurd, alors responsable du Département des Sciences

³⁴ L'I.B.M. 701 *Electronic Data Processing Machine* était la version commerciale de l'ordinateur militaire *Defense Calculator*. Officiellement présenté par la direction d'I.B.M. le 7 avril 1953, il fut livré à ses différents commanditaires – au total il y en eut 19 – entre le 23 mars 1953 et le 28 février 1955. L'architecture de l'I.B.M. 704 fut conçue par Gene M. Amdahl, lequel devait travailler quelques années plus tard sur celle des machines de la série de compatibles System/360.

Appliquées chez I.B.M., afin de lui soumettre l'idée du développement d'un système de programmation automatique « pratique », pour le nouvel ordinateur scientifique *Data Processing System 704*. A ce stade il apparaît indispensable de préciser que par rapport à ses devanciers, ce *mainframe* introduisait nombre d'éléments techniques inédits. Il possédait ainsi une mémoire à tores de ferrite et était doté, en série, d'un tambour magnétique pour le stockage de masse des données. Surtout, l'I.B.M. 704 fut le premier ordinateur commercial disposant d'une part d'une capacité matérielle à opérer en virgule flottante (autrement dit cette fonctionnalité était assurée par une circuiterie électronique consacrée) et d'autre part, de trois registres d'index physiques. Or tout cela ne pouvait signifier que trois choses. Primo, l'I.B.M. 704 était une machine capable d'un niveau de performances très élevé. En plus de faire appel à des technologies novatrices (mémoire ferromagnétique), elle était équipée de modules physiques dédiés qui permettaient d'accélérer considérablement la réalisation des calculs scientifiques (virgule flottante câblée, petites unités d'enregistrement ultrarapides servant de registres d'index). De plus, à côté de la traduction des pseudo-instructions en code machine, une des tâches principales incombant alors aux systèmes de programmation de type *Speedcode* consistait précisément à simuler la fonction respective de ces deux sortes de dispositifs, alors cette disposition n'avait plus lieu d'être avec l'I.B.M. 704. Ces systèmes de programmation n'étaient donc pas adaptés à cette machine. Tertio, et comme conséquence du fait que cet ordinateur était matériellement équipé pour réaliser les calculs en virgule flottante et gérer dynamiquement l'adressage des opérandes pendant l'exécution des procédures informatiques, il apparaissait nécessaire de définir un nouveau langage de programmation automatique prenant expressément en compte ces nouveaux paramètres. Parvenir à tirer pleinement partie des capacités inédites de l'I.B.M. 704 en concevant à son intention un langage de programmation optimisé représenta ainsi l'un des facteurs primordiaux qui amenèrent J. W. Backus à proposer l'idée du FORTRAN aux responsables du géant de l'informatique. Mais en l'occurrence, l'optimisation des performances et des temps de calcul sur ce nouvel instrument informatique n'était pas le seul et unique objectif que le mathématicien programmeur avait alors en tête. Grâce au FORTRAN, il entendait aussi permettre aux utilisateurs d'ordinateurs 704³⁵ de réaliser d'importantes économies financières.

Nous avons précédemment indiqué que la part prise par la rémunération des équipes de programmeurs dans le budget d'exploitation des ordinateurs était en général fort conséquente. Selon Backus si l'on ajoutait encore à cela les surcoûts occasionnés par les

³⁵ Dans un premier temps au moins puisque c'est d'abord pour cette machine que Backus et son équipe créèrent le FORTRAN.

longues et multiples procédures de débogage des logiciels systématiquement effectuées par ces personnels, le poste budgétaire « programmation » d'un centre informatique typique pouvait représenter jusqu'aux trois quarts des sommes d'argent dévolues à son fonctionnement³⁶. Sachant qu'en 1954 le processus de « démocratisation » des ordinateurs était déjà amorcé, que le nombre de leurs utilisateurs ne pouvait désormais que croître et leur prix diminuer en conséquence, une telle disproportion entre le coût des matériels informatiques et celui attaché à la production et à la stabilisation de leurs programmes ne pourrait continuer à être toléré longtemps. Ce faisceau d'arguments avérés suffit à convaincre Cuthbert C. Hurd qu'I.B.M. devait encourager le développement du langage FORTRAN. Le Directeur de l'I.B.M. *Applied Science Division* donna donc rapidement son approbation officielle au projet de Backus (c'était peu de temps après avoir reçu le mémorandum que ce dernier lui avait adressé, soit en décembre 1953 ou en janvier 1954).

L'entreprise que John W. Backus et les membres de son *Programming Research Group* entendaient mener ici à bien fut donc d'emblée orientée et réglée par la série d'éléments ou de contraintes technico-économique que nous venons d'évoquer. Ce qu'au fond le mathématicien envisageait de faire, c'était concevoir un système de programmation automatique – en l'espèce un langage informatique dédié en priorité aux calculs scientifiques – qui non seulement exploite pleinement la puissance de l'I.B.M. 704, mais qui, en étant capable de générer rapidement des programmes au moins aussi efficaces que ceux qui pouvaient être produits par les programmeurs via l'harassante méthode du codage machine manuel, permette de surcroît de d'alléger et d'accélérer leur travail. Même s'il présente un intérêt indéniable du point de vue historique et scientifique, étudier ici le processus de développement du langage FORTRAN dans son détail nous amènerait à nous éloigner par trop de notre ligne générale de travail. Aussi nous contenterons-nous à présent d'en évoquer les étapes principales et d'en relever les caractéristiques qui nous semblent être les plus pertinentes.

Aussi étonnant que cela puisse paraître, la définition puis la construction du *langage* FORTRAN – avec son répertoire d'instructions, sa syntaxe et ses règles de fonctionnement - se déroulèrent dans des délais remarquablement brefs. A la fin de l'année 1954 Backus et son groupe³⁷ étaient ainsi venus à bout de cette phase du travail. L'achèvement de la première

³⁶ John W. Backus, « The history of FORTRAN I, II and III. », *Proceedings First ACM SIGPLAN Conference on History of Programming Languages*, Los Angeles, 1981, section 1.2. *The Economics of Programming*.

³⁷ En plus de J. W. Backus, son manager, ce groupe était composé d'Irving Ziller, d'Harlan Herrick, de Robert A. Nelson et de Roy Nutt. Ce scientifique travaillait pour l'*United Aircraft Corporation*, une compagnie aéronautique qui avait commandé trois I.B.M. 704. Ce sont les ingénieurs de cette firme qui, en utilisant un

tranche de ce projet, au début du mois de novembre 1954, fut immédiatement sanctionné par la publication d'un rapport préliminaire. Constitué de 29 pages, ce dernier était intitulé « Specifications for the IBM Mathematical FORMula TRANslating System, FORTRAN.³⁸ ». Preuve supplémentaire du lien fondamental qui unissait à l'origine le développement de ce langage de programmation à celui de l'I.B.M. 704, les responsables de « *Big Blue* » adressèrent immédiatement des exemplaires de ce dossier à chacune des organisations et entreprises qui s'étaient déjà portées acquéreuses d'un de ces nouveaux ordinateurs. John W. Backus et ses assistants complétèrent ensuite cette démarche en rendant visite aux différents commanditaires de la machine, afin de leur présenter le FORTRAN et de leur expliquer ses principes clef. D'après les souvenirs du mathématicien, la réaction à laquelle lui et ses collaborateurs se heurtèrent alors le plus souvent fut le scepticisme. Habitué au dilemme capital qui caractérisait alors le champ de la programmation automatique – tout semblant de « proximité » du code informatique avec l'utilisateur se payait toujours par un ralentissement du temps d'exécution des programmes en machine tandis que l'inverse signifiait un code particulièrement abscons que le système était cependant en mesure de traiter avec une extrême rapidité - les futurs possesseurs d'I.B.M. 704 doutaient profondément du fait qu'un langage de programmation alliant aisance d'emploi, ainsi que rapidité et efficacité dans la production des codes objets (exécutables) puisse jamais être mis au point. C'était pourtant là toute l'ambition et l'originalité du projet porté par Backus et son équipe.

A ce stade de la réflexion l'examen du contenu de quelques-uns des passages introductifs du rapport préliminaire rédigé par les membres du *Programming Research Group* vaut la peine d'être fait. Ceux-ci comportent en effet des éléments particulièrement éclairants quant aux nouveautés et avantages que le FORTRAN prétendait introduire et/ou posséder. Le premier de ces paragraphes s'ouvre en fait sur une présentation assez générale mais très instructive du nouveau langage (ou « système » comme il est nommé ici). On remarquera toutefois que celle-ci était faite en très étroite relation avec les innovations techniques introduites avec l'ordinateur 704. Dans leurs premières années, le FORTRAN et cette machine semblaient ainsi totalement indissociables.

I.B.M. 704, ont mis au point le premier assembleur commercial dans les années 1955-56 (il s'agissait du *Symbolic Assembly Program* ou S.A.P.).

³⁸ « Specifications for the IBM Mathematical FORMula TRANslating System FORTRAN. », *IBM Corporation, Report by Programming Research Group, Applied Science Division, IBM, Preliminary Report*, New York, 10 novembre 1954. Une version numérisée de ce document original peut être consultée en ligne au : http://community.computerhistory.org/scc/projects/FORTRAN/FORTRAN_PreliminaryReport_1954.pdf

« *Le Mathematical Formula Translating System d'I.B.M. ou plus brièvement FORTRAN, inclura un vaste ensemble de programmes pour permettre à l'I.B.M. 704 d'accepter la formulation concise d'un problème dans les termes d'une notation mathématique et de produire rapidement et automatiquement des programmes [de 704] pour solutionner ce problème. La logique du 704 est telle que pour la première fois, des techniques de programmation ont été définies qui peuvent être mises en œuvre par un système de codage automatique de telle sorte qu'un problème automatiquement codé que l'on aura préalablement défini avec précision dans un langage qui ne ressemble pas au langage machine, sera exécuté avec la même rapidité que s'il avait été laborieusement codé à la main. Jusqu'ici les systèmes [de programmation] qui avaient cherché à réduire le travail de codage et les problèmes de débogage offraient le choix entre un codage aisé et une exécution lente ou un codage laborieux et une exécution rapide.*³⁹ ».

Avant d'aborder les détails techniques regardant la programmation d'un problème particulier en FORTRAN, les auteurs proposaient de considérer les avantages informatiques liés à l'utilisation d'un tel système de codage :

« ... la raison de l'existence des calculateurs à haut vitesse [ordinateurs] est le fait qu'ils permettent de résoudre des problèmes à un coût moindre, en termes de temps et d'argent, que les autres moyens disponibles. Le temps et le coût requis pour solutionner un problème au moyen d'un ordinateur dépendent grossièrement de 4 catégories de choses :

- 1°) L'analyse et la programmation.
- 2°) Le codage.
- 3°) Le débogage.
- 4°) La solution machine.

Les ordinateurs les plus rapides et les mieux dotés en capacité mémoire permettent de réduire les coûts en temps et en argent attachés à la catégorie n°4 mais jusqu'ici, la mise au point de nouvelles machines ne semble pas avoir influé sur la réduction des coûts, en temps ou en argent, associés aux catégories n°1, n°2 et n°3. Il semble généralement vrai que le coût du personnel d'une installation informatique est au moins aussi élevé que celui de la machine

³⁹ Op. Cité, p.2.

qui y est utilisée. De plus il est raisonnable de considérer que le coût du personnel en rapport avec les opérations de codage et de débogage représente largement plus de la moitié du coût total du personnel. En définitive, et pour les installations qui ne sont que très peu sujettes à des problèmes à long terme, une somme équivalente à environ la moitié du coût de la machine se trouve consacrée aux opérations de débogage. Par conséquent, on peut dire de façon grossière que pour chaque dollar dépensé afin de résoudre un problème moyen sur un ordinateur, moins de 25 cents vont aux opérations d'analyse et de programmation, plus de 25 cents sont dépensés pour les opérations de codage et de débogage réalisées par le personnel, à peu près 25 sont consacrés aux les opérations de débogage de la machine [pannes], et environ 25 cents servent à couvrir les frais de fonctionnement du système.

Puisque le FORTRAN devrait potentiellement permettre d'éliminer les opérations de codage et de débogage, il devrait être possible de solutionner des problèmes pour moins de la moitié du coût que cette résolution coûterait en l'absence d'un tel système. De plus, puisqu'il devrait être de possible de consacrer la quasi-totalité du temps machine utile à la résolution des problèmes au lieu de la moitié seulement, la sortie [la production] d'une machine donnée devrait presque être doublée... Non seulement le FORTRAN réduit l'investissement initial nécessaire à la production d'un programme, mais il diminuera encore plus le coût de la reprogrammation des problèmes pour les futurs ordinateurs, puisque chaque machine de cette sorte devrait être équipée d'un système équivalent au FORTRAN qui pourra traduire les termes d'un problème exprimés à l'aide d'un langage très proche du FORTRAN dans son propre code [machine].

En plus du fait que le FORTRAN permettra de réaliser potentiellement des économies financières, un tel système rendra faisable et commode l'investigation expérimentale de modèles mathématiques et de méthodes numériques variés. Le FORTRAN peut également s'appliquer à des techniques complexes et longues pour le codage d'un problème que le programmeur humain n'aurait ni le temps ni l'inclination à dériver ou à composer. Ainsi, dans de très nombreux cas, le FORTRAN peut véritablement produire un meilleur programme qu'un codeur humain normal. Finalement, la quantité de connaissance nécessaire pour utiliser efficacement un I.B.M. 704 grâce au FORTRAN est très largement inférieure au savoir requis pour employer rentablement cette machine par le biais de la méthode du codage direct [programmation en code machine]. Les informations regardant la manière dont on doit utiliser les sous-programmes, quelles instructions machine sont disponibles, comment optimiser une séquence de calculs, et celles concernant un grand nombre d'autres techniques de programmation sont intégrées au système FORTRAN de sorte que le programmeur n'a pas

besoin de les connaître. En fait, une grande quantité d'informations que le programmeur a besoin de connaître à propos du système FORTRAN est déjà comprise dans la connaissance qu'il possède des mathématiques. Ainsi il sera possible de placer les formidables capacités de l'ordinateur 704 à la portée d'un panel d'utilisateurs beaucoup plus large... ».

Les paragraphes ouvrant ce rapport préliminaire précisaient d'une manière tout à fait claire et synthétique quels avantages décisifs les utilisateurs d'ordinateurs I.B.M. 704 pouvaient s'attendre à trouver en choisissant le langage FORTRAN pour programmer leurs machines. De fait étaient mis en avant ici au moins quatre raisons incitant fortement à adopter le FORTRAN pour coder les applications destinées à ce modèle de *mainframe* scientifique (au moins dans un premier temps). Pour commencer, et cela constituait le premier point, le FORTRAN devait permettre à ceux qui avaient choisi de l'employer de réaliser d'importantes économies en termes de temps et d'argent. Deuxièmement ce langage de programmation de haut niveau ouvrait sur la possibilité d'un accroissement de l'expérimentation mathématique: en simplifiant le codage informatique des problèmes, notamment ceux présentant les structures les plus complexes, il élargissait le champ d'application de l'ordinateur tout en démultipliant à moindres coûts la puissance d'investigation des chercheurs. Troisièmement le FORTRAN avait la capacité de mettre en oeuvre automatiquement des techniques de programmation longues et complexes dans le processus de codage informatique d'un problème. Sur ce plan prétendaient les auteurs du rapport, ce langage était apte à surpasser les performances d'un programmeur humain moyen. Enfin, quatrième et dernier point, le FORTRAN, en raison de sa simplicité, de sa proximité structurelle avec les formes algébriques et aussi du fait qu'il intégrait de très nombreuses techniques avancées de programmation, était capable de rendre l'ordinateur 704 aisément accessible à un grand nombre d'utilisateurs. L'apprentissage du système de programmation mis au point par John W. Backus et son équipe étant singulièrement aisé pour des individus travaillant dans le domaine des sciences - pour les raisons mêmes que nous venons de passer en revue - il semblait inutile de faire appel ici aux classes d'entraînement informatique généralement rencontrées ailleurs afin de familiariser les futurs utilisateurs du nouveau *mainframe* d'I.B.M. avec leur matériel. Un programme allégé de formation - c'est-à-dire en définitive un programme moins long et moins coûteux que ceux habituellement mis en place - pouvait parfaitement être envisagé dans ces circonstances.

Était également évoquée ici la possibilité du portage de programmes écrits en *Formula Translator* sur et pour une machine particulière - comme l'I.B.M. 704 par exemple - vers des

ordinateurs (encore à construire) disposant d'une part de capacités de calcul au moins égales à celles possédées par cette dernière, et d'autre part d'un langage de programmation « voisin » du FORTRAN. Quand bien même les codes machine respectifs de ces ordinateurs auraient différé, le fait qu'on les programme tous au moyen de langages informatiques appartenant à une même catégorie devait permettre une exportation aisée, c'est-à-dire en dernière analyse une traduction facile, des programmes écrits pour la première machine dans des formes logiques exploitables par les autres systèmes. À un protocole de conception des applications basé sur le langage machine qui, par définition, exigeait un ajustement long et rigoureux du code spécifiant tel ou tel ensemble de fonctionnalités informatiques aux caractéristiques matérielles de l'ordinateur auquel il était initialement destiné - ce qui supposait bien sûr qu'on le redéfinisse entièrement lorsqu'on voulait l'utiliser sur un ordinateur de marque et/ou de type différents - Backus et son groupe proposaient donc de substituer un modèle d'écriture à la fois plus universel et plus avantageux. Celui-ci devait en effet faciliter le réemploi des programmes en contournant l'écueil colossal qu'avait jusque-là représenté leur adaptation ou portage d'un système informatique possédant un code machine particulier, à un autre système pourvu comme de bien entendu d'un langage fondamental différent. Une application conçue en FORTRAN pour un modèle spécifique d'ordinateur étant donnée, il devenait ainsi possible d'en produire une version pour une autre machine elle aussi équipée du FORTRAN ou d'un langage assimilé dans des délais raisonnables et pour un coût parfaitement supportable. Instituant ici une véritable politique de compatibilité logicielle, le FORTRAN et les langages « voisins » devaient donc servir de passerelles logiques entre des dispositifs possédant des langages machines dissemblables. Typiquement l'opération consistait à traduire un programme déjà écrit au moyen de ce langage de haut niveau dans les termes du langage de haut niveau équipant la machine sur laquelle on souhaitait désormais le voir fonctionner. Une fois cette phase de transposition achevée – remarquons bien que cette dernière relevait encore de la compétence des programmeurs humains - le FORTRAN (ou un langage voisin) effectuait *automatiquement* la traduction des séries d'instructions composant ce programme remanié dans le code machine particulier de l'ordinateur cible.

Il n'est guère difficile de comprendre à quel point la disponibilité d'un langage comme celui de Backus pouvait faciliter la tâche et bouleverser littéralement les méthodes de travail des gens alors en charge de la programmation des ordinateurs. Car le FORTRAN avait beau être un langage orienté vers la résolution de problèmes mathématiques, ce qui supposait par conséquent qu'il se trouve réglé par le moyen d'une syntaxe spécifiquement adaptée à des travaux de type scientifique, il n'en disposait pas moins d'instructions formulées en anglais

(comme IF, GOTO et DO par exemple), c'est-à-dire en définitive d'ordres informatiques dont l'expression formelle était directement empruntée à la langue naturelle (en l'occurrence il s'agissait ici de l'anglais, soit la langue native des programmeurs). Ainsi non seulement la composition des programmes proprement dite se voyait grandement facilitée grâce au FORTRAN puisque celui-ci rapprochait artificiellement l'homme de la machine en mettant à leur disposition un vocabulaire et une grammaire formels communs, mais en plus, la transcription d'une application initialement écrite dans ce code évolué dans un autre langage informatique de haut niveau était elle aussi supposée pouvoir se faire de façon extrêmement aisée⁴⁰. Jusqu'à un certain point et avec tous les bénéfices que cela pouvait entraîner dès lors que l'on avait acquis un peu de maîtrise en la matière, cette dernière opération pouvait se voir rapprochée de l'acte consistant à traduire un texte rédigé dans une langue naturelle donnée dans un autre dialecte humain. Ce qui formait ici le cœur véritable de la difficulté de l'activité programmatique, à savoir la transcription de séquences informatiques aisément compréhensibles par l'homme (code de haut niveau) en code machine exécutable (langage de très bas niveau), relevait en dernière analyse des capacités de traduction et d'optimisation automatiques du compilateur FORTRAN. C'est à ce dernier module logique que revenait en effet la charge autrefois dévolue à l'homme de la transformation du code source du programme (ici des expressions mathématiques écrites en FORTRAN) dans le code machine (binaire) de l'ordinateur. Compte tenu du caractère crucial et de l'extrême sophistication de la fonction qu'il avait à remplir, la mise au point du compilateur du FORTRAN - auquel Backus et ses collègues d'I.B.M. se référaient en l'appelant « *translator* » - se révéla bien plus ardue qu'il n'avait été initialement envisagé. A tel point d'ailleurs que pour atteindre le principal objectif visé ici – c'est-à-dire engendrer par des moyens automatiques un code exécutable aussi bon que celui que pourrait produire un programmeur humain – les chercheurs d'I.B.M. furent contraints de prolonger notablement la durée de son développement. En définitive celle-ci finit par dépasser celle qu'avait demandée la conception du langage lui-même. Au début de l'année 1955, le *Programming Research Group* avait en effet estimé à un semestre le temps qui lui serait nécessaire pour finaliser cette fonctionnalité centrale du système FORTRAN. Dans les faits cependant, la production des 18 000 lignes de code (toutes évidemment rédigées en FORTRAN) qui au final devaient constituer le *translator* demandèrent deux ans et demi de labeur acharné à cette équipe composée d'une douzaine de programmeurs expérimentés. Le travail de développement et de correction d'erreurs dans le

⁴⁰ Rappelons toutefois qu'en 1955-57 le FORTRAN était un des seuls langages de programmation de haut niveau existants.

code se prolongea jusqu'au mois d'avril 1957, date à laquelle le système de programmation FORTRAN⁴¹ put enfin être livré aux diverses organisations qui avaient commandé des *mainframes* 704 à la firme I.B.M.

Il convient à ce point de tenter de prendre l'exacte mesure de l'œuvre accomplie ici par John W. Backus et ses collaborateurs. Avec ses 18 000 lignes de code le compilateur du langage FORTRAN - et par voie de nécessaire conséquence le système de programmation FORTRAN auquel il se trouvait logiquement intégré - représentait en effet l'un des plus gros et des plus complexes programmes informatiques jamais écrits depuis que l'ordinateur avait été créé. À notre connaissance le seul programme développé à peu près à la même époque qui, toutes proportions gardées et dans deux registres tout à fait distincts s'entend, était susceptible d'être comparé à la première version du FORTRAN (en raison notamment de sa complexité, de son coût, de son temps de développement et aussi des enjeux formidables dont il était porteur) était le logiciel militaire destiné aux ordinateurs équipant les nœuds de décision opérationnelle du *Semi Automatic Ground Environment*, sur lequel la *System Development Division* de la *RAND Corporation* avait commencé à travailler à partir du mois d'octobre 1956. Cet environnement informatique achevé dans les années 1959-60 devait en effet compter au bas mot plus d'un million de lignes de code. La mise au point de ce projet dont seule la démesure le disputait au caractère totalement inédit dura quatre années, coûta quelques 150 millions de dollars⁴² et mobilisa près de 2100 personnes pendant toute cette période. On sait aujourd'hui qu'au moins 700 d'entre elles étaient des programmeurs confirmés. Alors certes, le système de programmation FORTRAN était nettement moins volumineux et beaucoup moins complexe que le logiciel créé pour le S.A.G.E. Incidemment son développement ne coûta pas aussi cher et s'il fut effectivement victime de quelques retards aussi importuns qu'inévitables, il n'est peut-être pas inutile de rappeler alors qu'une douzaine d'hommes seulement y participèrent de manière directe.

Dès son introduction le système de programmation FORTRAN s'imposa comme une référence chez les utilisateurs d'I.B.M. 704 *Data Processing System*⁴³. L'élégance de sa syntaxe, le fait que nombre de ses instructions puissent être directement formulées en langue naturelle et la surprenante puissance de son compilateur, lequel était dans la plupart des cas effectivement capable de générer des codes exécutables de qualité comparable à ceux

⁴¹ Deux mois auparavant, le FORTRAN avait fait l'objet d'une présentation officielle à l'occasion de la *Western Joint Computer Conference* (J. W. Backus et Al., « The FORTRAN Automatic Coding System », in *Proceedings of the Western Joint Computer Conference*, Los Angeles, février 1957).

⁴² Estimation faite en dollars de 1962.

⁴³ Le système de programmation FORTRAN fut initialement livré aux possesseurs d'I.B.M. 704 sous la forme d'anonymes paquets de cartes perforées à 80 colonnes.

qu'aurait pu produire un programmeur humain⁴⁴, assurèrent au langage informatique conçu par le *Programming Research Group* un succès à la fois immédiat et durable auprès des usagers. Puisqu'il permettait à ses utilisateurs de se concentrer uniquement sur la résolution du problème qui les préoccupaient en leur masquant la quasi totalité des détails du fonctionnement interne⁴⁵ de la machine (alors qu'auparavant ils devaient nécessairement et méticuleusement les prendre en compte pour pouvoir composer leurs programmes), puisqu'il mettait à leur disposition des outils de programmation intuitifs et extrêmement performants, puisque, enfin il bénéficiait de la puissance et de la réputation d'I.B.M. et des qualités technologiques extraordinaires de la machine à laquelle il avait été associé dès les premiers temps de sa genèse, le FORTRAN ne pouvait recevoir qu'un accueil favorable de la part des clients militaires, scientifiques et industriels du géant américain de l'informatique. Une étude réalisée à la fin du mois d'avril 1958 par I.B.M.⁴⁶ confirme cela, indiquant ainsi que sur 26 installations d'ordinateurs 704 alors existantes aux Etats-Unis, plus de la moitié employait le FORTRAN pour résoudre 50 à 60 % des problèmes scientifiques traités. Nombreux étaient également les possesseurs d'ordinateurs 704 qui faisaient appel au FORTRAN pour effectuer environ 80 % de leurs travaux courants. Dans tous les cas, la *totalité* des utilisateurs équipés du FORTRAN recourraient occasionnellement à ce langage de programmation pour réaliser tel ou tel type de tâches informatiques. Toujours selon cette même étude il existait à la fin de l'année 1958 soixante installations de ce type (ce qui représentait un total de 66 *mainframes* 704). Il ressort après analyse que plus de la moitié des instructions écrites pour ces six dizaines de grosses machines furent produites en utilisant le système de programmation FORTRAN⁴⁷. Deux à trois années à peine après qu'il ait fait son apparition sur le marché, le langage de John W. Backus était déjà devenu le système de programmation le plus prisé des membres de la communauté des utilisateurs de *mainframes* scientifiques. Entre-temps le scientifique américain et son groupe avaient commencé à travailler à l'élaboration d'une deuxième version, ou plutôt d'une évolution du FORTRAN original, en se basant notamment

⁴⁴ Il existait deux façons au moins d'évaluer la qualité d'un programme produit par le compilateur du FORTRAN: on pouvait vérifier la quantité d'espace mémoire occupé par ce programme et/ou encore mesurer le temps machine que réclamait son exécution.

⁴⁵ Une des caractéristiques les plus intéressantes du FORTRAN tenait au fait que celui-ci laissait la possibilité aux programmeurs d'accéder aux opérations du niveau machine lorsque la nécessité s'en faisait ressentir.

⁴⁶ In J. W. Backus, « Automatic Programming: Properties and Performance of FORTRAN Systems I and II », in *Proceedings of Symposium on the Mechanisation of Thought Processes, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, Grande-Bretagne, novembre 1958*. Egalement cité dans [Backus, 1981].

⁴⁷ Développé à l'origine pour l'I.B.M. 704 par les chercheurs de l'*United Aircraft*, puis donné au groupe d'utilisateurs I.B.M. SHARE – assurément le premier du genre - le S.A.P. (*Symbolic Assembly Program* ou *SHARE Assembly Program*) était certainement le langage informatique le plus utilisé à l'époque avec le FORTRAN.

sur les informations que les usagers institutionnels de la première mouture de ce langage lui faisaient régulièrement remonter. La compilation séparée de sections de programmes devait figurer au nombre des capacités inédites de ce « nouveau » langage. Distribué au cours de l'année 1958, le FORTRAN II et son compilateur exigèrent l'écriture de près de 50 000 lignes de code.

Naturellement, le fait que le FORTRAN ait été le premier représentant de sa catégorie et qu'il ait pu d'emblée bénéficier de la puissance financière et de l'étendue des réseaux commerciaux internationaux d'I.B.M. aussi bien pour sa promotion que pour sa diffusion auprès des utilisateurs de matériels informatiques représentèrent autant de facteurs appelés à jouer fortement en faveur de sa grande popularité. A la fin des années 50 pourtant, il n'existait pas moins de plusieurs douzaines de langages informatiques spécifiquement dédiés aux applications scientifiques, et cela rien qu'aux Etats-Unis. Certains étaient des langages assez peu répandus, comme le M.A.D. (*Michigan Algorithm Decoder*), développé à l'Université du Michigan sur la base de l'I.A.L. (*International Algorithmic Language*), qui avait lui-même servi de point de départ à la création de l'ALGOL 58 (*ALGOritmic Language*, 1958). D'autres connurent au contraire une diffusion plus importante. Parmi ces derniers figuraient notamment L'ALGOL 58. Celui-ci était le fruit d'un développement concerté entre l'*American Association for Computing Machinery* (A.C.M.) et un certain nombre d'instituts scientifiques européens, au premier rang desquels se trouvait la *West German Society for Applied Mathematics and Mechanics*⁴⁸. L'objectif poursuivi par ces organisations consistait à tenter de définir un langage scientifique standardisé (universel), puissant, portable - c'est-à-dire utilisable sur des architectures matérielles différentes avec un minimum de modifications – qui puisse être diffusé au niveau mondial. Il s'agissait ici de parvenir à offrir une alternative au FORTRAN. Même si, fidèle à sa tradition, I.B.M. s'employait à faciliter grandement les choses à ceux qui utilisaient ses matériels, le gros du travail de programmation et les dépenses importantes que celui-ci générait demeuraient donc toujours à leur charge. I.B.M. était et demeurait un constructeur et un vendeur de matériels. Jusqu'à ce que l'industriel prenne véritablement conscience de l'enjeu commercial stratégique qu'il représentait, le logiciel ne resta pour lui qu'une chose relativement accessoire. Celui-ci avait beau être un produit informatique immatériel, il n'en demeurait cependant pas moins la propriété de l'industriel qui le faisait seulement évoluer lorsqu'il l'estimait souhaitable (ces transformations accompagnaient d'ailleurs souvent une évolution de ses matériels). À l'instar de ce qui se

⁴⁸ *Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik* (G.A.M.M.), Société Allemande pour les Mathématiques et la Mécanique appliquées.

passait déjà pour eux avec les ordinateurs qu'ils louaient à I.B.M., la marge de manoeuvre des utilisateurs du FORTRAN se trouvait donc réduite ici à son strict minimum.

Compte tenu de ce positionnement typique et de la situation de monopole quasi absolu qui était alors celle du géant de l'informatique, certains se sont laissés aller à penser que la diffusion et le succès formidables qu'avait connus le FORTRAN à la fin des années 50 étaient probablement la conséquence d'une stratégie commerciale déloyale, savamment ourdie par la société I.B.M. dans le but de renforcer plus encore l'emprise écrasante qu'elle exerçait déjà sur l'industrie informatique mondiale. Bien que parfaitement recevables en droit, pareilles suppositions appartiennent encore au domaine de la spéculation étant donné qu'à ce jour, aucune espèce de preuve n'a été découverte qui permettrait de les étayer sérieusement. Le doute peut bien continuer à subsister, il n'en demeure pas moins que le FORTRAN réunissait des qualités exceptionnelles qui, à elles seules, suffisaient selon nous à expliquer pourquoi les utilisateurs scientifiques et industriels d'ordinateurs le plébiscitèrent partout de la même façon au point d'en faire rapidement leur langage de programmation standard.

Dans les années qui suivirent immédiatement la mise sur le marché de la première version du langage de J. W. Backus, ce phénomène ne s'amorçait d'ailleurs pas. Tout au contraire. L'arrivée d'évolutions encore plus performantes de ce langage de haut niveau (en l'espèce ses versions II et IV, respectivement apparues en 1958 et 1961), ajoutée à la publication de manuels de programmation dédiés⁴⁹ contribua à amplifier encore ce phénomène de diffusion rapide et massif. Au début des années 60 l'usage du FORTRAN s'étendit graduellement à des secteurs moins spécialisés que ceux initialement touchés et bientôt, les universités et les collèges qui avaient la chance de disposer d'un ordinateur purent également en faire bénéficier tous ceux qui fréquentaient leurs cours de programmation. Petit à petit le FORTRAN devint si populaire et son usage tellement répandu, que les autres grands fabricants d'ordinateurs scientifiques (comme *Burroughs*, *Honeywell*, *UNIVAC* ou *Control Data Corporation*) se lancèrent également dans le développement de leurs propres versions du FORTRAN, en ne se privant pas de tirer partie de l'abondante documentation qui avait déjà été consacrée à ce langage. Cette forme de reconnaissance manifestée par les membres les plus influents de la communauté industrielle informatique américaine devait en fait équivaloir à un entérinement de fait – pour ne pas dire officiel - de la domination écrasante qu'exerçait à l'époque le FORTRAN. Tout ceci eut au moins deux conséquences majeures, la première positive et la seconde négative. D'abord, la reconnaissance officieuse mais quasi unanime du

⁴⁹ Tel le célèbre manuel de programmation que Daniel D. McCracken, scientifique et informaticien, publia en 1961 (*A Guide to Fortran Programming*, New York, John Wiley, 1961).

FORTRAN comme langage standard de la communauté scientifique eut pour conséquence le développement d'une multitude de compilateurs pour une importante diversité de machines. Ainsi, au début des années 60, les centres de recherche et les organisations industrielles purent commencer à échanger des applications écrites en FORTRAN en dépit des différences (type de système, modèle, marque...), qui caractérisaient fréquemment leurs équipements informatiques. Dans le même temps et parallèlement à l'émergence de cette compatibilité ou portabilité logicielle qu'autorisait le FORTRAN, les programmeurs trouvèrent enfin un langage informatique auquel il leur était possible de se référer communément. Le revers de la médaille est que le processus de diversification qui accompagna la forte diffusion du FORTRAN prit très vite des allures de prolifération incontrôlée. En 1963, il existait ainsi déjà une quarantaine de « dialectes » et de compilateurs FORTRAN différents sur le seul territoire des États-Unis. On prit toutefois rapidement conscience du fait qu'un tel processus de « babélisation » du langage FORTRAN ne servirait à terme ni les intérêts des constructeurs de matériel informatique, ni ceux de leurs utilisateurs. Un sérieux effort de normalisation fut en conséquence entrepris à compter de ce moment qui aboutit quelques années plus tard à la publication du FORTRAN 66⁵⁰, premier langage informatique officiellement standardisé et publié par l'*American National Standards Institute* (A.N.S.I.). Au milieu des années 70, la quasi-totalité des systèmes informatiques vendus étaient pourvus d'un langage FORTRAN 66, système de programmation performant qui garantissait que dans une très grande majorité de cas, une application conçue sur tel ou tel ordinateur pourrait fonctionner – au prix peut-être de quelques ajustements – sur un autre dispositif. Le FORTRAN 66 occupa le devant de la scène informatique jusqu'en 1978, année durant laquelle on introduisit son successeur, le FORTRAN 77. Normalisé puis publié par l'A.N.S.I. le FORTRAN 77 fut adopté comme standard international par l'*International Standards Organisation* (I.S.O) en 1980. D'autres versions du FORTRAN respectant en général le principe de compatibilité descendante ont depuis lors vu le jour. Au FORTRAN 77 succéda ainsi le FORTRAN 90, une évolution importante qui intégrait la version 77 du langage comme sous-ensemble et dont l'I.S.O. publia les spécifications en 1991. Aujourd'hui ce sont les versions 95 et 2003 de ce langage de programmation extrêmement répandu qui sont les plus utilisées de par le monde. Il est à noter que le FORTRAN 2003 intègre désormais des types de données (classes, héritage...), qui lui confèrent la puissance d'un langage orienté objet. Il inclut aussi une capacité d'interopérabilité avec le langage C.

⁵⁰ Sorti en 1966, le FORTRAN 66 appartenait à la famille des FORTRAN IV.

En l'espace d'une cinquantaine d'années à peine, le FORTRAN a connu une spectaculaire évolution en même temps que d'importantes transformations structurelles. Conçu au milieu des années 50 pour un modèle particulier d'ordinateur, le *mainframe* 704 d'I.B.M. qui présentait la propriété alors inédite de posséder des circuits électroniques spécialement dédiés à la gestion des nombres représentés en virgule flottante, il s'est d'abord imposé comme langage de programmation de référence auprès des représentants de la communauté scientifique qui recouraient à cette machine pour exécuter leurs calculs. Progressivement, son efficacité incontestable et sa prise en main relativement aisée ont amené un nombre toujours croissant d'utilisateurs à se tourner vers son emploi (au détriment d'autres langages de programmation scientifiques, tel ALGOL). Finalement au début des années 60, des versions du FORTRAN ont vu le jour qui n'entretenaient plus aucun lien direct avec la société qui se trouvait à l'origine de son développement. Premier représentant historique du genre, ce langage informatique de haut niveau s'est imposé immédiatement comme un outil de programmation incontournable auprès de la classe d'utilisateurs qu'il était susceptible d'intéresser non pas tant à cause des avantages qu'aurait pu lui procurer la toute-puissance commerciale d'I.B.M. ou bien encore l'antériorité de son développement par rapport à celui d'autres langages informatiques, mais bien en raison de son orientation mathématique, de sa proximité avec l'utilisateur et aussi de son incontestable efficacité. Le succès rencontré par le FORTRAN au début des années 60 nécessita bientôt que l'on procède à sa normalisation tant n'avaient cessé d'apparaître des versions différentes qui toutes n'offraient pas les garanties nécessaires de consistance et de compatibilité que l'on était en droit d'attendre de la part d'un langage de programmation scientifique aussi répandu. Au fil des décennies et afin de contrarier ce phénomène dont les conséquences ne pouvaient à terme que se révéler délétères, différentes évolutions du FORTRAN ont été successivement adoptées comme standards officiels, d'abord aux États-Unis (normes A.N.S.I.), puis sur le plan international (normes I.S.O.). Ce fut ainsi le cas des FORTRAN 66, 77, 90, et 2003. Après plus d'un demi-siècle d'existence, le langage FORTRAN que John W. Backus et sa dizaine de collaborateurs avaient développé en 1954 à destination de l'I.B.M. 704 est toujours en usage. Bien entendu, et alors même que grâce à l'écriture de nouveaux compilateurs son utilisation se trouvait étendue à un nombre toujours plus important d'ordinateurs (sans distinction de marque, de type et de modèle), il a subi de profondes transformations au cours de ces nombreuses années. Ces dernières ont été occasionnées par les extraordinaires mutations qui trois décennies durant n'ont cessé de toucher les matériels. Le surgissement concomitant de besoins et de pratiques informatiques inédits les ont également déterminées.

Aujourd'hui, le FORTRAN est devenu un langage universel. Avec le COBOL, langage de programmation destiné au secteur des affaires conçu à la toute fin des années 50 et toujours en service à ce jour⁵¹, il peut en quelque sorte être considéré comme un témoin « vivant » de l'histoire de l'informatique. En effet subsistent encore en lui à l'état de traces les résonances lointaines des premiers temps de cette technologie.

2.2.6. Emergence, structuration et segmentation de l'industrie logicielle.

En 2004, l'industrie mondiale du logiciel et des services liés aux applications informatiques a généré un chiffre d'affaires de 603 milliards d'euros. En comparaison, la même année, les ventes d'équipements informatiques se sont élevées à 379 milliards d'euros « seulement ». Depuis de nombreuses années maintenant, la richesse engendrée par la commercialisation de biens informatiques immatériels dépasse donc, et de loin, celle produite par la vente des biens informatiques concrets. Jusqu'à la moitié des années 60, les ordinateurs sont demeurés des objets relativement rares et complexes à mettre en œuvre que leur coût d'achat ou de location et leur entretien proprement dispendieux devaient réserver au seul usage d'organisations privilégiées. Il s'agissait essentiellement de centres de recherche civils et militaires, d'universités, de groupes industriels et de grandes entreprises. L'intégration croissante des matériels informatiques autorisée par la mise au point de composants électroniques, magnétiques, et ferromagnétiques toujours plus petits, performants et fiables, l'industrialisation croissante du processus de production des ordinateurs, ajoutées à la multiplication des systèmes de programmation de haut niveau - c'est-à-dire des langages ne nécessitant pas une connaissance approfondie des modes opératoires réglant le fonctionnement des niveaux matériels les plus bas de la machine pour pouvoir être employés -

⁵¹ Le langage COBOL (pour *COmmon Business Oriented Language*) est certainement un des seuls systèmes de programmation informatique qui puisse souffrir ici la comparaison avec le FORTRAN. Mis au point au cours des années 1959-60 à la demande des autorités américaines, largement inspiré par le langage FLOW-MATIC (B-0 *Compiler*) dont G. M. Hopper avait débuté le développement en 1955 pour l'UNIVAC, ce langage fit officiellement son apparition en 1960, sous la désignation de COBOL 60. Confronté d'une part au peu d'empressement que les fabricants d'ordinateurs mettaient à adopter ce qu'il espérait pourtant voir devenir rapidement un standard et d'autre part à la multiplication inquiétante des langages orientés vers les applications commerciales - pour ne citer que ces quelques exemples *Sperry Rand/UNIVAC* disposait du FLOW-MATIC, *I.B.M.* du *Commercial Translator* et *Honeywell* du *Fully Automatic Compiling Technique (F.A.C.T.)* - le gouvernement américain décida de faire pression sur ces derniers afin de stopper leurs efforts de développement concurrents et divergents. Il déclara ainsi qu'il n'achèterait ni ne louerait aucun système informatique qui ne soit équipé d'un COBOL à moins que ne soit apportée la preuve que la présence de ce langage ne contribuait en rien à améliorer les performances propres de ladite machine. Contemporain du FORTRAN, le COBOL a lui aussi beaucoup évolué, et à ce jour, il est toujours beaucoup employé dans le monde.

ont amorcé un phénomène de démocratisation sinon de l'outil informatique lui-même, du moins des connaissances et des pratiques attachées à ses technologies.

Cet accroissement des performances des ordinateurs et de l'efficacité des langages de programmation qui commença à faire véritablement sentir ses premiers effets au cours de la seconde moitié des années 50 ne devait pas pour autant régler d'un trait l'un des problèmes les plus symptomatiques de la première informatique, à savoir la pénurie de programmeurs et le coût exorbitant dont s'accompagnait logiquement le travail de cette catégorie de spécialistes. Comme nous avons eu l'occasion de le faire remarquer à plusieurs reprises lorsqu'il était question du développement du langage FORTRAN, les sommes d'argent consacrées à la production des programmes représentaient pourtant à cette époque une des dépenses les plus importantes - plus encore que celles allouées à la location et à l'entretien des machines – au sein des budgets d'exploitation des installations informatiques. Ces trois éléments caractéristiques de la première informatique – nous faisons référence ici à la pénurie dramatique de programmeurs qui sévissait alors, aux salaires excessivement élevés auxquels ils pouvaient en conséquence prétendre ainsi qu'au caractère de toutes façons indispensable de leurs services - ont constitué autant de facteurs déterminants dans le processus d'émergence, de structuration, et de diversification de l'industrie du logiciel. Il fut un temps de recherches intenses où l'ordinateur n'était qu'un instrument scientifique en quête de sa propre identité et de sa propre stabilité physique. Quand enfin les premiers prototypes de machines informatiques commencèrent à donner satisfaction à leurs concepteurs sur le plan matériel, ils se commencèrent à se préoccuper davantage de la question du code. Les hommes qui furent à l'origine de ces machines, que ce soit aux États-Unis ou en Grande-Bretagne, étaient tous les mathématiciens et/ou des physiciens de haut niveau. C'est un fait connu que les plus brillants d'entre eux n'éprouvaient strictement aucune difficulté à programmer les systèmes informatiques qu'ils avaient imaginés et bien souvent assemblés eux-mêmes, directement en langage machine. À peine ces prototypes avaient-ils commencé à devenir opérationnels et fiables que quelques individus, à la fois pionniers et visionnaires de l'informatique, imaginèrent de se lancer dans leur commercialisation. Parfaitement conscients de l'extraordinaire potentiel économique des ordinateurs, ils n'étaient pas sans savoir également que les exigences, les compétences, et les besoins spécifiques des clients auxquels ils entendaient les vendre ou les louer n'étaient en aucune façon comparables à ceux des techniciens, des ingénieurs et des scientifiques qui les avaient conçus.

En 1951 la firme *Remington Rand* introduisit sur le marché civil américain les premiers exemplaires de son UNIVAC I. C'est à ce moment que l'ordinateur fit sa première

grande apparition dans la société civile et, à la même occasion, ses premiers pas dans l'univers des affaires. Bien sûr à cette époque un instrument de cette sorte représentait pour une entreprise un investissement financier et humain formidable que seuls des besoins colossaux en matière de traitement de l'information étaient susceptibles de justifier vraiment. Si les usagers scientifiques d'ordinateurs, grâce à leur connaissance intime de l'économie interne de ces machines et leurs dispositions aux mathématiques et à la logique, étaient en général parfaitement capables d'écrire eux-mêmes le code des applications dont ils avaient besoin dans le cadre de leurs travaux de recherche, c'était plus rarement le cas des personnes appartenant aux sociétés qui prenaient le risque d'employer ces nouveaux dispositifs électroniques. Qui plus est, les travaux que ces firmes entendaient réaliser grâce à l'ordinateur étaient parfaitement inédits d'un strict point de vue *informatique*. Le plus souvent liées à leur gestion administrative et à l'activité qu'elles exerçaient dans tel ou tel secteur de la production économique, ces tâches avaient pu autrefois être effectuées par des opérateurs humains équipés de tabulateurs et de calculateurs, c'est-à-dire de dispositifs mécaniques ou électromécaniques spécialisés. Or étant universel par définition, l'ordinateur n'était aucun de ces instruments individuels mais il avait la potentialité de les devenir tous, temporairement et alternativement. Des programmes permettant à l'ordinateur d'exécuter les fonctions spécifiquement souhaitées – celles-là même que les anciens appareils mécanisés accomplissaient - étaient cependant nécessaires pour que cette actualisation puisse se réaliser. De 1950-51, moment où les premiers systèmes informatiques firent leur apparition sur le devant de la scène civile américaine, jusqu'aux années 1955-56, une organisation gouvernementale ou un groupe industriel en possession d'un ordinateur pouvait envisager trois manières différentes d'obtenir les applications dont il pouvait avoir besoin.

2.2.6.1. Programmes et applications conçus par l'utilisateur final.

La première de ces façons consistait à écrire soi-même le ou les programmes convoités. Pour cela, il était nécessaire d'avoir à sa disposition du personnel spécialisé qui connaissait à la fois les subtilités matérielles du système précisément utilisé, de même qu'un large éventail de techniques de programmation (en langage machine). Il a déjà été mentionné à plusieurs reprises qu'à cette époque, les programmeurs appartenaient à une classe professionnelle fort peu représentée dont les membres courtisés monnaient à prix d'or le précieux savoir dont ils

avaient alors l'apanage⁵². Dans de telles conditions évidemment le développement d'une application informatique quelconque prenait fréquemment les allures d'une entreprise à la fois longue, difficile et coûteuse.

2.2.6.2. Programmes et applications conçus par les fabricants de systèmes.

La deuxième façon qui s'offrait alors aux utilisateurs d'ordinateurs pour se procurer des *softwares* - le terme n'existait pas encore en propre - consistait à employer les programmes éventuellement développés par le constructeur de la machine qu'ils louaient ou qu'ils avaient acquise. Nous avons fait usage du terme « éventuellement » car au cours de la période 1950-55, le fait qu'un fabricant d'ordinateurs fournisse systématiquement à ses clients des applications en même temps que des matériels informatiques n'était pas nécessairement chose allant de soi. Au commencement d'ailleurs, les constructeurs d'ordinateurs se contentaient le plus souvent de livrer à leurs clients les quelques programmes qui étaient strictement nécessaires au fonctionnement de leurs produits. En fait de « programmes », il s'agissait plutôt d'un langage d'assemblage rudimentaire accompagné de quelques routines au caractère rigoureusement indispensable (comme des séquences de code servant à amorcer le chargement d'un programme en mémoire ou à piloter les périphériques d'entrée/sortie raccordés au système). Contrairement à ce que l'on serait peut-être tenté de penser, ce schéma minimaliste ne concernait pas uniquement les constructeurs d'ordinateurs les plus modestes. Il valait également pour des firmes aussi puissantes et prestigieuses qu'I.B.M. et UNIVAC/*Remington Rand*. Lorsque les deux géants industriels, qui se trouvaient également être les deux principales sociétés concurrentes sur le marché naissant de l'informatique, introduisirent leurs premiers *mainframes* entre 1951 et 1953, ils le firent en fournissant aux commanditaires de leurs *Data Processing System 701* et de leurs UNIVAC 1 (respectivement) des paquets de cartes perforées supportant les routines impérativement nécessaires à la marche de ces instruments - et rien de plus - ainsi que des manuels de fonctionnement qu'on se laissera ici volontiers aller à qualifier d'étonnamment sommaires compte des connaissances

⁵² Au cours de la première moitié des années 50, il n'était pas rare que le salaire mensuel des programmeurs dépasse 300 dollars. La plupart des équipes travaillant à la programmation des *mainframes* comptaient au moins 30 spécialistes du logiciel (et cela pour une seule installation). En nous basant sur cette estimation minimale, il apparaît que la somme que les organismes détenteurs d'ordinateurs devaient consacrer chaque mois au traitement des programmeurs avoisinait au minimum 9000 dollars. Pour rappel et afin de disposer d'un élément de comparaison typique, on se souviendra par exemple que le *mainframe* I.B.M. 701 (hors dispositifs périphériques) employé par l'U.S. *Naval Ordnance Test Station* de China Lake coûtait chaque mois 21 500 dollars à la marine de guerre américaine.

informatiques limitées qui caractérisaient certains de leurs destinataires⁵³. Forte de sa très longue expérience en matière de dispositifs de bureau à cartes perforées, laquelle avait permis, au fil des décennies, la mise en place et le perfectionnement d'une politique de démarchage, de formation et de soutien technique au client sans précédent, la société I.B.M. ne devait cependant pas en rester là. Appliquant *mutatis mutandis* au nouveau secteur de l'informatique les méthodes commerciales qui, 40 années durant, avaient assuré son prodigieux succès économique et contribué simultanément à renforcer son image de marque, elle commença à dispenser des cours de programmation aux futurs programmeurs de son ordinateur 701 via sa division *Technical Computing Bureau* (T.C.B.), six mois avant que les premiers exemplaires de cette machine ne soient livrés à leurs commanditaires. Equipé lui-même d'un *mainframe* 701, le T.C.B. mettait sa propre machine à la disposition des programmeurs en apprentissage pour qu'ils puissent se familiariser avec elle et également commencer à travailler à la conception d'applications ciblées. La totalité de ces opérations se déroulait évidemment sous la supervision de spécialistes appartenant à I.B.M. Cela signifiait d'une part que les personnes passant par ces classes de formation étaient bien souvent opérationnelles avant même que les organisations pour lesquelles elles travaillaient n'aient réceptionné leur propre ordinateur et que, d'autre part, lorsque cette réception devenait chose effective, la machine pouvait immédiatement être placée en service. Cette façon de procéder ne voulait cependant pas dire qu'I.B.M. fournissait des logiciels à ses clients. La firme de T. J. Watson leur assurait une formation poussée tout en leur offrant une assistance de qualité dans l'écriture de leurs propres applications. Même si, fidèle à sa tradition, I.B.M. s'employait à faciliter grandement les choses à ceux qui utilisaient ses matériels, et les dépenses importantes que celui-ci générerait demeuraient donc toujours à leur charge. Et encore le géant de l'informatique soutenait-il ses clients, ce qui était alors très loin d'être le cas de tous les fabricants d'ordinateurs. À un degré ou à un autre et de façon plus ou moins tardive, il est vrai que les grandes entreprises qui avaient jadis tenté de concurrencer I.B.M. sur le terrain des machines bureautiques à cartes

⁵³ Intitulé *Principles of Operation, IBM type 701 and Associated Equipment*, le manuel accompagnant l'ordinateur 701 introduisait son futur utilisateur aux principes généraux (logiques et technologiques) de fonctionnement du calculateur électronique universel. Il ne comportait cependant que 96 pages ! Réalisé dans le même esprit d'initiation, le manuel de l'UNIVAC 1 (*Manual of Operation, the Central Computer of the UNIVAC System*) n'était guère plus dense que celui destiné à la machine concurrente puisqu'il ne comportait que 125 pages. La diffusion de ces deux documents débuta respectivement en 1953 et en 1954. Paradoxalement et alors même que l'ordinateur fait maintenant partie intégrante de nos existences au point que nous ne le remarquons plus vraiment - quant il est encore visible - les manuels d'utilisation livrés avec nos ordinateurs personnels sont souvent déraisonnablement épais. Ces deux manuels ont été digitalisés. Ils peuvent être librement téléchargés au format PDF aux deux adresses suivantes : www.bitsavers.org:80/pdf/ibm/701/24-6042-1_701_PrincOps.pdf (IBM 701) et www.bitsavers.org:80/pdf/univac/univac1/UNIVAC1_OperMan.pdf (UNIVAC 1).

perforées emboîtèrent le pas à leur vieil adversaire en proposant elles aussi à leurs clients des services de formation et d'assistance à la programmation. Mais il existait aussi des sociétés nouvelles venues sur le marché des instruments de traitement de l'information. Dans ce secteur économique où la plus grande exigence professionnelle côtoyait souvent l'excellence technologique - chose encore plus vraie depuis la récente advenue de l'ordinateur - ces dernières ne pouvaient évidemment pas espérer tirer partie d'une expérience de la relation au client comparable à celle dont pouvaient se prévaloir au même moment I.B.M. ou la *National Cash Register* par exemple. Cela ne devait bien sûr pas empêcher ces firmes de se lancer dans la fabrication et la commercialisation d'ordinateurs, et de rencontrer un certain succès dans cette activité. Toutefois et pour ce qui concerne la seule question de l'écriture et de la fourniture des programmes, elles ne devaient jamais proposer que le strict minimum à ceux qui avaient choisi de faire confiance à leurs matériels. En vérité et jusqu'au début de la seconde moitié des années 50, les utilisateurs d'ordinateurs furent la plupart du temps obligés de concevoir eux-mêmes le code des applications dont ils avaient besoin dans le cadre de leur pratique informatique particulière. Ceci pour la simple et bonne raison qu'il n'existait pour eux aucune autre alternative sérieuse qui puisse être envisagée. Ce qui nous amène tout naturellement à évoquer maintenant la troisième et dernière voie qui, à partir des années 1954-55, leur permit de se procurer des programmes informatiques.

2.2.6.3. Les groupes d'utilisateurs (*Users Groups*).

Durant les années 50, la dernière façon qui s'offrait à un utilisateur d'ordinateur d'obtenir un programme consistait tout simplement à en faire la demande à un autre usager informatique - non parlons bien sûr ici d'organismes ou d'institutions et non pas d'individus - qui le possédait ou qui possédait quelque chose approchant de ce que l'on désirait parce qu'il l'avait lui-même développé (en bénéficiant ici éventuellement de l'aide d'un constructeur), dans le but de répondre à ses propres besoins. Au fond ce n'était là rien de plus qu'une forme de partage. On aurait cependant tort de céder à la tentation consistant à effectuer un rapprochement hâtif entre cette pratique et celles qui, similaires sur le fond, ont cours actuellement. Le contexte dans lequel ces processus d'échange se déroulaient, à savoir l'informatique du milieu du 20^{ème} siècle, faisait qu'ils obéissaient à des modalités de fonctionnement très singulières. Se trouvaient ainsi rassemblés au sein de groupes d'utilisateurs informatiques créés et patronnés par de grands constructeurs d'ordinateurs, des dizaines d'utilisateurs de *mainframes*, tous issus des secteurs de la recherche et de l'industrie. Ces

groupes de coopération mises en place et orchestrés par les industriels de l'informatique les plus influents n'avaient comme on l'imagine aisément pas grand-chose à voir avec les communautés de personnes qui, aujourd'hui, pratiquent librement le partage de logiciels *freeware* ou la mise en commun de code open source. Les plus réputées de ces associations d'utilisateurs étaient certainement le SHARE, un groupe que la société I.B.M. avait mis en place en 1955 afin de faciliter les échanges entre possesseurs de *mainframes* 704, et l'*UNIVAC Scientific Exchange* (U.S.E.), équivalent du SHARE chez UNIVAC/*Remington Rand*, qui avait également vu le jour en 1955 et regroupait les usagers de systèmes 1103A. D'autres structures reprenant à leur compte le principe du groupe d'utilisateurs inauguré par I.B.M. et UNIVAC/*Remington Rand* furent créées par des firmes informatiques moins importantes, à la fin des années 50 et au début des années 60. On pourrait par exemple citer le *Burroughs Users' Group* ou B.U.G. (il deviendra le *Cooperating Users of Burroughs Equipment* ou C.U.B.E. en 1963), né en 1962 de la fusion du *Cooperating Users' Exchange* (C.U.E.), l'association rassemblant à l'origine les utilisateurs d'ordinateurs du constructeur *Burroughs*, et de la *Datatron Users Organization* (D.U.O), laquelle regroupait les utilisateurs de systèmes *Datatron* (des machines que la société *Electrodata Corporation* produisait avant qu'elle ne soit rachetée par *Burroughs* en 1956). De tous ces groupements, celui fondé en 1955 par I.B.M. était très certainement le mieux organisé et le plus agissant. Il est d'ailleurs la seule organisation de ce type qui existe encore à ce jour et s'il est devenu depuis lors une entité indépendante qui réunit plus de 2000 entreprises et près de 20000 membres, les liens qui l'unissent encore à I.B.M. sont étroits. Le SHARE - loin d'être un acronyme ce terme n'est autre que le verbe qui en anglais signifie « partager » - présente donc cette double particularité d'avoir été créé dans les années 50 par le plus puissant de tous les constructeurs d'ordinateurs de l'époque et d'être toujours actif au moment même où nous écrivons. Étant donné cela, son histoire est aussi la plus documentée qui se puisse trouver parmi toutes celles des *Users Groups*.

Pour être rigoureusement exact, il convient ici d'indiquer que le SHARE ne fut pas le premier groupe d'utilisateurs constitué par I.B.M. dans les années 50. Un premier groupement baptisé *Digital Computer Association* vit en effet sa réunion inaugurale et organisationnelle se tenir dans le courant du mois de novembre 1952. La *Digital Computer Association* naquit à l'initiative de Blair R. Smith, un manager des ventes expérimenté qui, après avoir fait ses classes dans le secteur des machines de bureau – et avoir été aussi l'un des cofondateurs de la

section de la *National Machine Accountants Association*⁵⁴ de Los Angeles - avait rejoint I.B.M. Il se trouvait désormais en charge de la commercialisation du *mainframe* 701 dans la région de Santa Monica, en Californie. Rétrospectivement, l'idée conçue par B.R Smith en 1952 ne manquera sans doute pas de nous apparaître d'une désarmante simplicité. Dans le même temps s'imposera également à nous l'évidence de sa nécessité. Pourtant quand il en fit officiellement la proposition, celle-ci eut quelques difficultés à rallier l'ensemble des suffrages chez I.B.M. Elle rencontra notamment une certaine forme de résistance de la part de Thomas J. Watson Sr., son inflexible C.E.O. En professionnel rompu aux techniques de terrain, Blair R. Smith avait remarqué que les institutions et les organisations auxquelles il louait des ordinateurs 701 se heurtaient toutes invariablement aux mêmes difficultés dès lors qu'il s'agissait de procéder à la programmation de ces systèmes. Puisqu'il n'existait alors aucun département officiel auprès duquel se procurer des programmes types, débogués et prêts à être utilisés, leurs usagers étaient contraints de développer la totalité de leurs applications en comptant exclusivement sur leurs moyens et leurs compétences propres. Ceci, et l'isolement dans lequel se trouvaient plongés de fait les utilisateurs de systèmes 701, conduisaient à une situation fort peu avantageuse pour chacun d'entre eux. Au total, rappelons qu'I.B.M. devait enregistrer 18 commandes fermes pour son *mainframe* scientifique 701⁵⁵. Ces ordinateurs commencèrent à être livrés à leurs commanditaires respectifs à partir du mois de mars 1953. Les livraisons prirent fin en février 1955, lorsque l'U.S. *Weather Bureau* de Washington DC prit enfin possession de la dernière machine produite. Entre les mois de mars et novembre 1953 cependant, ce ne sont pas moins de 12 I.B.M. 701 *Electronic Data Processing Machine* qui furent installées sur l'ensemble du territoire des États-Unis. Quelques temps avant de rentrer en possession de leur système 701, toutes les compagnies et les organisations ayant passé commande de cet ordinateur auprès de l'industriel avaient procédé au recrutement anticipé d'équipes de programmeurs. Une fois cette tâche plutôt délicate menée à bien – rappelons qu'à cette époque les individus capables de faire fonctionner un ordinateur représentaient une ressource d'une grande rareté - elles avaient commencé à former ces personnels aux spécificités du système informatique 701, sur la base des informations fournies par I.B.M. Dans tous les cas, dès que la machine était réceptionnée puis placée en service, ses

⁵⁴ La *National Machine Accountants Association* a été créée le 26 décembre 1951 à Chicago, suite à la volonté d'un groupe déjà constitué d'opérateurs de machine de bureau - la *Machine Accountants Association* - de donner naissance à un groupement professionnel de support aux utilisateurs d'*Accounting Machines* à l'échelon national. La N.M.A.A. apportait à ses membres le soutien technique dont ils pouvaient avoir besoin et favorisait également l'échange d'informations entre eux.

⁵⁵ Nous ne prenons pas en compte ici le premier ordinateur 701 dont la livraison aux I.B.M. *World Headquarters* (New York) débuta le 20 décembre 1952.

programmeurs devaient s'atteler à l'écriture et/ou au débogage des utilitaires indispensables à son fonctionnement et des applications pour lesquelles son droit d'usage avait été acquis (ou bien parfaire cette écriture et ce processus de correction dans l'hypothèse où ils auraient été entrepris avant). Ainsi, chacun, de son côté, concentrait ses efforts et ses ressources sur le développement de routines et d'applications aux fonctions sinon identiques du moins fort semblables, tous ces programmes étant bien sûr destinés à un même modèle d'ordinateur. A peu de variations près, cette entreprise de programmation à la fois difficile et coûteuse se voyait répétée au sein de chaque installation équipée d'un *Defense Calculator*⁵⁶. Si, par exemple, à un moment donné, une dizaine d'I.B.M. 701 étaient simultanément opérationnels, il était absolument certain qu'il existait un langage d'assemblage, une routine d'amorçage de programmes et un convertisseur de base numérique différents (au moins) pour chacune de ces machines. Au cours de la première moitié des années 50, la redondance caractérisant la réalisation des travaux de programmation les plus fondamentaux ainsi que les dépenses directement entraînées par cette redondance étaient à tel point considérables qu'elles faisaient peser sur le principe même de l'utilisation des ordinateurs une menace économique. Si rien n'était entrepris afin de limiter ou de stopper ce phénomène, programmer un système informatique risquait à terme de coûter plus cher que le coût de la location ou même l'achat de celui-ci.

Ce que Blair R. Smith envisageait de faire ici, c'était proposer aux utilisateurs d'ordinateurs 701 de mutualiser leurs efforts. À cette fin de coopération, il offrait de créer une association - un groupe d'utilisateurs - qui, placé sous l'égide de la société I.B.M., leur permettrait de procéder non seulement au partage et à l'échange d'applications, mais aussi à la mise en commun des savoir-faire en matière de programmation. En somme il ne s'agissait ni plus ni moins que d'appliquer au secteur de l'informatique les pratiques qui avaient cours depuis un certain temps déjà au sein des groupes rassemblant les utilisateurs de tabulateurs et autres calculateurs électromécaniques de bureau. A priori cette proposition aurait dû recevoir un accueil favorable de la part de ceux qu'elle concernait au premier chef, qu'il s'agisse d'I.B.M. ou de ses clients. Contre toute attente ce fut loin d'être le cas. Les résistances initialement rencontrées aux plus hauts échelons de la direction d'I.B.M. furent cependant bientôt levées par la perspective de trouver dans cette forme de coopération une possible solution au problème économique extrêmement préoccupant que posait alors le développement des programmes informatiques. Quant aux possesseurs d'I.B.M. 701, le point qui les faisait

⁵⁶ *Defense Calculator* est le nom sous lequel l'I.B.M. 701 fut désigné tout au long de sa période de développement.

essentiellement hésiter à s'engager ici concernait justement une des raisons qui avaient amené Blair R. Smith à imaginer ces coopératives d'utilisateurs d'ordinateurs. Ainsi Fred J. Gruenberger devait-il faire figurer dans un article paru en 1980 aux I.E.E.E. *Annals of the History of Computing*, un extrait de correspondance dans lequel Smith déclarait :

« *Les raisons poussant à organiser la Digital Computer Association étaient plutôt évidentes. Un certain nombre de compagnies (et plus important certains de mes propres clients) avait passé commande [d'ordinateurs] et étaient occupées à entraîner des programmeurs. À cause de la rareté du personnel expérimenté, il était clair que les clients de 701 avaient besoin de partager des informations et des savoir-faire*⁵⁷. ».

Si pour l'ancien manager des ventes chez I.B.M. la « rareté du personnel expérimenté » représentait un prétexte suffisant pour envisager la création d'un groupe tel que la *Digital Computer Association*, elle constituait au contraire un motif de réserve, voire même de discorde, pour les utilisateurs d'ordinateurs que cette organisation était pourtant censée rapprocher les uns des autres. Comme c'est toujours le cas lorsqu'une ressource rare et indispensable se trouve mise en jeu – ici il s'agissait bien entendu des programmeurs – certains n'hésitaient pas à employer des méthodes déloyales pour s'emparer de ce que tous convoitaient et peu possédaient. Ainsi parmi les organisations et les entreprises que B. R. Smith entendait regrouper au sein de la D.C.A., il s'en trouvait quelques-unes qui, totalement dénuées de scrupules, avaient littéralement « volé » certains programmeurs employés par des structures concurrentes. C'est donc dans une atmosphère particulièrement tendue que la réunion inaugurale de la D.C.A. se déroula. Ce climat initial défavorable finit néanmoins par se dissiper, pour faire progressivement place à une ambiance nettement plus cordiale⁵⁸. Au fil des rencontres cette tendance à la coopération entre les utilisateurs d'I.B.M. 701 se renforça et peu à peu, elle commença à porter ses fruits⁵⁹. La *Digital Computer Association* était donc devenue une réalité d'où des choses concrètes et inédites commençaient à sortir.

⁵⁷ Fred J. Gruenberger, « A Short History of Digital Computing in Southern California », in I.E.E.E. *Annals of the History of Computing*, vol. 2, n°3, juillet-septembre 1980, pp. 246-250.

⁵⁸ Dans « The IBM 701— Marketing and Customer Relations », (I.E.E.E. *Annals of the History of Computing*, Vol. 5, n°2, Avril Juin 1983, pp. 170-172), Blair R. Smith rapporte à titre anecdotique que les trois tournées générales qu'en commercial aguerris il décida d'offrir aux participants de cette réunion ne furent certainement pas étrangères à la dissipation graduelle du climat de défiance qui régnait entre eux au départ. Notons que les réunions de la *Digital Computer Association* se déroulaient régulièrement au Santa Ynez Inn, un très bel hôtel-restaurant sis dans le comté de Santa Barbara, en Californie.

⁵⁹ Notamment avec le *Project for the Advancement of Coding Technique* ou P.A.C.T. I, un système de codage amélioré destiné au *mainframe* scientifique d'I.B.M. qu'un groupe informel d'utilisateurs de machines 701 avait élaboré.

Durant le mois de mai 1954 la société I.B.M. annonça officiellement qu'elle introduirait sous les deux années à venir un nouveau *mainframe* scientifique⁶⁰. Elle présenta au départ cette machine comme un système 701 dont les capacités logico arithmétiques et les performances auraient subi d'importantes améliorations. Ce dispositif n'était autre que l'I.B.M. 704 *Data Processing System*, un *mainframe* capable de réaliser des opérations en virgule flottante qui, autre fait original, était également pourvu d'une mémoire à tores de ferrite de 4 Ko de capacité⁶¹. La plupart de ceux qui employaient déjà un I.B.M. 701 - ce qui voulait dire aussi la plupart des membres de la *Digital Computer Association* - passèrent immédiatement commande d'un modèle 704. Attirés par les performances formidables que promettait d'atteindre ce nouvel ordinateur et peut-être aussi par le fait que son constructeur, le premier d'entre tous, avait créé une structure permettant à ses acheteurs de partager leurs applications informatiques et leur expérience sur le plan de la programmation, de nouveaux utilisateurs vinrent également grossir les rangs de la clientèle de *mainframes* I.B.M.

C'est à l'occasion de l'introduction de l'I.B.M. 704 *Data Processing System* que la *Digital Computer Association* cessa d'exister et qu'elle fut remplacée par une organisation plus structurée et mieux établie : le SHARE. La raison d'être de ce nouveau groupe dont l'assemblée inaugurale eut lieu le 22 août 1955 était strictement identique à celle qui avait présidé à la création de la D.C.A. Il s'agissait de permettre à tous les utilisateurs d'I.B.M. 704⁶² d'associer leurs efforts de développement en matière d'applications informatiques, d'ingénierie logicielle et aussi de standardisation des méthodes et des processus informatiques. En constituant de la sorte une bibliothèque d'applications entretenue et augmentée par tous, c'est-à-dire finalement en rendant accessible à chacun des membres du SHARE le travail qu'avaient ou qu'étaient en train de réaliser tous les autres, une réduction considérable des dépenses attachées à ce goulet d'étranglement financier qu'était en train de devenir la production de softwares pouvait être sérieusement envisagée. Quand bien même la haute spécificité des programmes échangés leur interdisait-elle en général d'être directement chargés en machine sans avoir auparavant fait l'objet de quelques modifications appropriées, adapter une application déjà existante à son installation et à ses besoins particuliers était toujours plus intéressant, pour une compagnie particulière, que d'avoir à prendre intégralement en charge son développement. Le démarrage d'un processus de standardisation des méthodes et des équipements informatiques devait lui aussi contribuer à la diminution de

⁶⁰ Le premier IBM 704 fut livré au mois d'avril 1956 au *Los Alamos Scientific Laboratory*.

⁶¹ C'était pour tirer pleinement parti des nouvelles capacités arithmétiques câblées de l'I.B.M. 704 que John W. Backus et ses collaborateurs mirent au point le langage de programmation FORTRAN.

⁶² Posséder un *mainframe* I.B.M 704 était la seule et unique condition pour appartenir au SHARE.

ces dépenses. Afin d'améliorer la coopération et les échanges entre les adhérents du SHARE, des standards spécifiques furent par exemple définis et adoptés qui portaient sur les mnémoniques des codes d'opération, les langages assembleurs de l'I.B.M. 704, le format des cartes perforées utilisées, et aussi sur la configuration alphanumérique de la roue des systèmes périphériques d'impression. Parallèlement à cela on organisa des rencontres fréquentes et on créa également un système de distribution, le tout dans l'optique de faciliter la circulation des idées, des programmes et des sous-routines.

Dans une conférence prononcée en 1956, Paul Armer devait estimer à environ 300 le nombre de programmes⁶³ mis à la disposition de ses membres par le groupe d'utilisateurs SHARE depuis que celui-ci avait été créé. Dans le même discours, l'ancien programmeur devenu directeur du *Computer Science Department* de la *RAND Corporation* évaluait à environ 50 millions de dollars les économies globales que les efforts entrepris par le SHARE pour réduire la « programmation redondante » - selon l'expression autrefois consacrée - avaient permis de réaliser effectivement. Et celui-ci de prendre un exemple concret afin d'illustrer son propos. Le langage d'assemblage qui était le plus employé pour la programmation des installations 704 avait été entièrement développé et financé par l'*United Aircraft and Transport Corporation*. Suivant des suggestions émises par le SHARE cette société avait par la suite apporté un certain nombre de modifications à cet assembleur, lequel était par ailleurs considéré comme un langage élégant et compliqué par les utilisateurs de *mainframes* 704. Ce logiciel comportait au total 2500 lignes. En 1955-56 la production d'une ligne de code informatique coûtait entre 2 et 10 dollars, en fonction de sa complexité. A supposer que l'on prenne cette dernière valeur comme référence (chose en droit tout à fait admissible puisqu'un assembleur est une construction informatique non triviale), alors on pouvait suivre P. Armer et conclure que le travail réalisé pour produire ce langage avait coûté au moins 25 000 dollars à la holding aérienne. Si chaque possesseur d'I.B.M. 704 désireux d'utiliser un assembleur avait fait de même de son côté - l'auteur employait d'ailleurs le terme d'isolationniste afin de qualifier cet hypothétique utilisateur - il aurait été contraint de dépenser une somme au moins équivalente à celle déboursée par l'*United Aircraft and Transport Corporation* pour parvenir à un résultat similaire ou légèrement différent du sien. Le sacro-saint principe de coopération réglant cette puissante communauté informatique qu'était le SHARE permettait précisément d'éviter que des choses aussi incohérentes ne se

⁶³Ces données sont extraites du texte d'une conférence prononcée en 1956 par Paul Armer, à l'occasion de l'*Electronic Business Systems Conference* de San Francisco. Ce discours a depuis lors été édité sous le titre de «SHARE-A Eulogy to Cooperative Effort» (in I.E.E.E. *Annals of the History of Computing*, vol. 2, n°2, avril 1980, pp. 122-129).

produisent. En tenant compte du fait que tous les adhérents de cette organisation n'utilisaient pas nécessairement le langage assembleur cité en exemple, Armer chiffrait tout de même à 1,5 million de dollars les économies que sa mise en commun, via le SHARE, avait permis de réaliser.

Entre le moment où il fut créé, c'est-à-dire août 1955, et celui où Paul Armer prononça son discours à l'*Electronic Business Systems Conference* de San Francisco (soit novembre 1956), les effectifs des organisations adhérentes au groupe d'utilisateurs SHARE passèrent de 18 à 62. En tout cela représentait 76 installations informatiques mettant chacune en oeuvre un *mainframe* I.B.M. 704 et ses équipements périphériques. À l'instar de la compagnie industrielle qui se trouvait à son origine, le SHARE était une organisation d'ampleur internationale puisque les 76 installations dont nous venons de parler étaient réparties sur le territoire des États-Unis, mais aussi sur ceux du Canada, de la Grande-Bretagne et de la France. Consciente de la validité, de l'efficacité et aussi du caractère commercialement très attractif du modèle mutualiste établi par I.B.M., la société UNIVAC/*Remington Rand* emboîta comme nous l'avons déjà indiqué le pas à son principal concurrent en créant pour les utilisateurs de ses systèmes 1103A bientôt groupe connu sous le nom d'UNIVAC *Scientific Exchange* (U.S.E). Forte de l'impressionnant succès rencontré par l'organisation SHARE, la compagnie I.B.M. ne s'arrêta pas là et décida de mettre rapidement sur pied une structure équivalente afin d'offrir le même type de services aux utilisateurs de ses ordinateurs commerciaux 702 *Electronic Data Processing Machine*, 705 *Data Processing System* et 650 *Magnetic Drum Data Processing Machine*. Baptisée G.U.I.D.E. (pour *Guidance of Users of Integrated Data Processing Equipment*), cette organisation vit le jour en 1956. Comme le SHARE, le G.U.I.D.E. finit par devenir un groupe d'utilisateurs de matériels informatiques extrêmement influent. En 1970, ses statuts subirent des modifications. Renommée G.U.I.D.E. *International Corporation*, elle devint une association à but non lucratif. Le groupe d'usagers G.U.I.D.E. existe encore à ce jour et malgré les transformations structurelles intervenues au début des années 70, les relations qu'il entretient avec la compagnie I.B.M. sont privilégiées.

Développer soi-même ses programmes utilitaires et professionnels (qu'ils soient de type scientifique ou commercial) ou compter sur ceux, rudimentaires mais néanmoins essentiels, que fournissaient avec une parcimonie extrême les fabricants de systèmes informatiques, représentaient pour les possesseurs d'ordinateurs de la première moitié des années 50 les deux moyens les plus courants – et à dire vrai c'étaient les seuls - de se procurer des applications pour leurs machines. Les années 1954-56 marquèrent un tournant important concernant cette très épineuse question de la conception et de la disponibilité des codes

informatiques. Durant cette période les constructeurs d'ordinateurs commencèrent à se rendre compte de l'importance cruciale que ce produit informatique qu'ils avaient jusque-là si largement dédaigné – le logiciel – revêtait réellement pour ceux qui louaient ou acquéraient leurs instruments. Les grands fabricants, I.B.M. en tête, s'employèrent alors à mettre en place des groupes d'utilisateurs - sortes de coopératives informatiques - auxquels leurs clients respectifs avaient la possibilité de s'affilier en fonction du type de machine dont ils se servaient (et par voie de conséquence de leur domaine d'activité). S'adressant aux usagers d'une marque en particulier, et, le cas échéant, d'une gamme particulière de machines au sein de celle-ci, la vocation première de ces *users groups* consistait à favoriser l'échange et la conception groupée de programmes ainsi que le partage de savoir-faire en matière de codage informatique. Parallèlement à l'émergence d'organisations aussi opérantes que le SHARE, l'U.S.E. ou le G.U.I.D.E., d'autres vecteurs de transformation, tout aussi déterminants et bouleversants de ce point de vue, firent leur apparition.

D'abord bien sûr ce sera la mise au point, chez I.B.M., du langage FORTRAN au cours des années 1954-57. Ce langage de haut niveau conçu à l'origine « autour » de l'I.B.M. 704 et dédié à la création d'applications scientifiques sera bientôt suivi par le COBOL. Ce langage de programmation évolué était quant à lui spécifiquement destiné au domaine des affaires. Créé en 1959-60, le COBOL était le résultat probant d'un effort de standardisation informatique auquel avaient pris part trois grandes agences gouvernementales civiles et militaires américaines ainsi que les six plus importants constructeurs d'ordinateurs du pays. L'apparition de ces nouveaux outils logiques devait littéralement révolutionner le travail de codage informatique en le rendant désormais accessible à un plus grand nombre d'utilisateurs informatiques. Plus proches, par définition, de la langue naturelle des utilisateurs ou des formules algébriques dont ils étaient familiers qu'ils ne l'étaient des codes numériques bivalents (indirectement) manipulés par les systèmes informatiques, ces langages de programmation de haut niveau facilitèrent donc grandement l'élaboration des applications, en même temps que leur débogage et leur éventuelle modification. Avec eux la programmation cessa d'être la chasse gardée d'une minorité triée sur le volet pour devenir un « art » accessible aux non-spécialistes.

Les formidables perfectionnements technologiques apportés aux équipements informatiques entre 1955 et 1960 représentèrent un deuxième facteur de transformation qui affecta de façon concluante l'industrie et les pratiques informatiques de l'époque. Une intégration, des performances et une facilité d'emploi sans cesse améliorées, ajoutées à la mise en série de sa production - laquelle devait entraîner bientôt une baisse des prix conséquente -

jouèrent comme autant d'éléments actifs essentiels dans le phénomène de diffusion de l'outil informatique au sein de la société. Symbole par excellence de la démocratisation réussie de l'ordinateur, la société *Digital Equipment* introduisit avec succès le mini-ordinateur P.D.P.-1 sur le marché américain au mois de mars 1960. Avec cette nouvelle catégorie de machines petites, fiables, performantes et bon marché, des organisations de moindre importance – comme des universités ne disposant pas de gros moyens financiers par exemple - purent elles aussi commencer à se servir d'ordinateurs, que ce soit dans le cadre de leurs recherches ou bien celui de la formation de leurs étudiants. Cet élargissement de la base des utilisateurs d'ordinateurs suite à la mise sur le marché de matériels très compétitifs en termes de performances, de coût d'achat et d'exploitation eut évidemment pour corollaire un accroissement progressif du nombre de personnes compétentes en programmation. Cependant, il va de soi qu'on ne saurait imputer à la seule apparition des mini-ordinateurs l'importante augmentation du nombre de programmeurs que l'on observa aux Etats-Unis au cours de la première moitié des années 60. La principale cause de cette inflation doit en fait être recherchée du côté des extraordinaires besoins en personnels que l'écriture des nombreux programmes destinés à être exécutés sur les ordinateurs AN/FSQ7 équipant les centres opérationnels du réseau militaire S.A.G.E. (*Semi Automatic Ground Environment*) provoqua à partir de 1955.

2.2.6.4. Premières entreprises spécialisées dans l'écriture de programmes informatiques (*Softwares Contractors*).

En pleine guerre froide l'entrée en service programmée du S.A.G.E. - ce dispositif de surveillance aérienne intégré et informatisé opérant à l'échelon continental - devait exiger que les acteurs gouvernementaux, militaires et industriels impliqués dans sa conception réalisent un travail de programmation sans commune mesure avec tout ce qui avait été accompli jusque-là en matière d'écriture de codes informatiques. Il s'agissait ici en effet de produire une série d'applications logicielles appelées à faire fonctionner simultanément un ensemble de systèmes informatiques géographiquement dispersés, communiquant par l'entremise de lignes téléphoniques non seulement entre eux, mais également avec des postes d'observation radar, des sites de lancement de missiles, des bases aériennes, des stations météorologiques, etc. Non seulement cela impliquait-il de gérer en permanence et en temps réel de nombreux flux de données (reçus à partir de sources multiples et hétérogènes et/ou envoyés vers ces dernières), mais encore fallait-il également assurer l'intégration de ces informations et permettre leur

visualisation grâce à des périphériques d'affichage pourvus d'une capacité d'interaction graphique (ce qui supposait donc que l'on prenne en charge les données provenant des « *light guns* » dont étaient munis les opérateurs). En outre et sur la base des informations qu'il recueillait et traitait – c'est-à-dire en fonction des éléments composant la représentation informatique sans cesse actualisée de la situation stratégique aérienne courante - le système devait aussi offrir à ses utilisateurs une aide à la décision et être capable de guider des vecteurs d'interception de types divers (sol-air, air-air, surface-air). Les premières tentatives pour tester des routines capables de réaliser ces différentes catégories de tâches informatiques furent réalisées sur le *Cape Cod System*, en 1953. Un programme expérimental fut mis au point pour ce centre de décision pilote (*Direction Center*) qui abritait un *Whirlwind I64* et la totalité de ses équipements périphériques (en configuration S.A.G.E.). Ce logiciel fut écrit par un groupe de programmeurs expérimentés appartenant à la *RAND Corporation*. S'il ne couvrait pas encore l'ensemble des fonctionnalités qu'à terme chacun des ordinateurs des nœuds opérationnels du S.A.G.E. devrait supporter, il était déjà composé de plus de 35000 instructions. Tout à fait inhabituel pour l'époque, ce nombre, à lui seul, suffisait à donner une idée assez claire de l'ampleur et de la complexité de la tâche qui attendait ceux à qui reviendrait le travail de programmation des machines de ce réseau militaire. Ceci était d'autant plus vrai que le logiciel écrit pour la machine placée au cœur du système de Cape Cod avait été élaboré par un groupe de personnes spécialisées dans le codage informatique et qu'il ne concernait qu'un seul et unique ensemble de dispositifs (à savoir un ordinateur, un certain nombre de radars lourds et légers et une base aérienne). Bien sûr si ces conditions de travail quasiment idéales avaient pu être réunies pour une installation pilote, il était parfaitement exclu d'espérer pouvoir les retrouver à nouveau lorsqu'on passerait à l'échelle réelle, c'est-à-dire lorsqu'on entrerait effectivement dans la phase de programmation de la série de logiciels qui équiperait finalement la totalité des ordinateurs appartenant au système de défense S.A.G.E. Avant même qu'il ne soit entamé, on savait pertinemment que ce travail serait monumental. Il était d'emblée acquis qu'il exigerait beaucoup de temps, qu'il coûterait extrêmement cher et qu'il mobiliserait pour finir un nombre impressionnant de programmeurs. La programmation des systèmes informatiques du S.A.G.E. faisait donc figure d'entreprise formidablement difficile et risquée, à tel point d'ailleurs que les candidats qui paraissaient être alors les mieux placés et les mieux armés pour s'y atteler - c'est-à-dire les firmes industrielles et les instituts scientifiques qui possédaient à l'époque la meilleure capacité d'expertise dans

⁶⁴ Rappelons que chacun des centres du S.A.G.E. devait au final mettre en œuvre deux AN/FSQ-7 (*Whirlwind II* produits par I.B.M.), le second devant prendre immédiatement le relais du premier en cas de défaillance.

le domaine - déclinerent purement et simplement l'offre que leur fit l'armée de l'air américaine. I.B.M., le M.I.T et les *Bell Labs* ayant tour à tour refusé d'assurer le développement de ces programmes⁶⁵, c'est assez logiquement à l'organisation qui avait déjà à son actif la création des logiciels du *Cape Cod System* que cette mission technologique extrêmement délicate fut confiée. C'est donc la *RAND Corporation* qui hérita de cette tâche colossale.

Puissante organisation gouvernementale à but non lucratif spécialisée dans le secteur de la recherche avancée militaire et civile, la *RAND Corporation* comptait à l'époque nombre de programmeurs de premier plan dans ses rangs. Même si elle est authentique, cette dernière affirmation ne doit pas nous induire en erreur. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas nous conduire à penser que la *RAND Corporation* employait alors *énormément* de personnels capables de produire du code informatique. En 1955 le total des effectifs de programmeurs exerçant leur activité professionnelle sur le territoire des Etats-Unis était inférieur à un millier de personnes. Et encore ce nombre doit-il être replacé en perspective. Entre un cinquième et un sixième seulement de ces individus était composé de spécialistes véritables, c'est-à-dire de gens capables effectivement de travailler à la conception de programmes de pointe (scientifiques ou militaires). En raison de l'excellence de leurs compétences et du niveau d'implication élevé qui était ou avait jadis pu être le leur dans la réalisation de projets informatiques avancés, ceux-là formaient une véritable élite. Quant aux autres ils étaient certainement compétents mais, peut-être moins talentueux et expérimentés que les premiers, l'essentiel de leur activité se concentrait d'abord et avant tout sur la mise au point d'applications destinées au secteur commercial. A priori et compte tenu des fonctions triviales qu'ils étaient typiquement appelés à réaliser, ces programmes ne possédaient que peu de choses en commun avec les logiciels au moyen desquels les militaires entendaient faire fonctionner ensemble les multiples équipements du réseau S.A.G.E. Une structure logique relativement simple caractérisait en effet les *business applications* et dans une grande majorité de cas, leur longueur restait parfaitement « raisonnable ». A contrario, et avant même que n'aient été entamés les travaux visant à leur développement, on savait pertinemment que la complexité, la longueur et aussi le coût des futurs codes militaires du S.A.G.E. dépasseraient, et de loin, tout ce qui avait pu être réalisé jusqu'ici en matière de programmation informatique.

⁶⁵ I.B.M. était alors la plus puissante de toutes les entreprises informatiques en activité et c'est elle qui était en charge de la production des ordinateurs AN/FSQ-7 du S.A.G.E. Le M.I.T. était l'institut de recherches technologiques où le *Whirlwind* avait été intégralement conçu. Quant aux *Bell Labs*, ce sont eux qui avaient décroché le contrat portant sur l'installation et la maintenance des lignes téléphoniques spéciales qui raccordaient les centres névralgiques informatisés, les dispositifs militaires d'acquisition de données et les systèmes d'armes défensives entre eux.

La situation apparaissait donc comme singulièrement critique. Non seulement le nombre de programmeurs en activité aux Etats-Unis au début de la seconde moitié des années 50 était très peu élevé, mais en outre, celui des codeurs suffisamment expérimentés pour pouvoir prétendre jouer un rôle déterminant dans le processus de conception des programmes du S.A.G.E. ne représentait qu'une fraction limitée de ces effectifs passablement faibles. Or s'il existait un projet de défense d'envergure nationale où, pour des motifs évidents, on estimait devoir travailler dans la plus grande urgence, c'était bien celui-là. Dans un contexte géostratégique extraordinairement tendu il s'agissait – ne manquons pas de conserver ce point capital à l'esprit – de doter au plus vite les Etats-Unis d'une capacité de détection et de réaction anti-nucléaire avancée. Sur le plan informatique un chantier de l'envergure du *Semi Automatic Ground Environment* représentait bien évidemment une complète nouveauté. Connaissant l'urgence de la situation et sachant aussi qu'à ce stade les inconnues demeuraient encore fort nombreuses qui, à un degré ou à un autre, étaient susceptibles de venir perturber le bon déroulement de cette entreprise inédite, des mesures exceptionnelles durent alors être adoptées par les autorités de manière à faire en sorte que tout se passe pour le mieux, dans les délais les meilleurs qui puissent être envisagés.

Dans un premier temps, une division spéciale dont la mission devait consister à réaliser le codage des programmes destinés au S.A.G.E. fut créée au sein de la *RAND Corporation* Etablie au cours du mois de décembre 1955, cette unité reçut le nom de *System Development Division*. Bien entendu, à lui seul, le fait qu'un service de cette nature voit le jour ne devait pas permettre de solutionner la préoccupante question du déficit de programmeurs à laquelle les décideurs militaires et civils en charge de la réalisation du projet S.A.G.E. se trouvaient de fait confrontés. Des dispositions complémentaires singulièrement efficaces devaient par conséquent être définies et appliquées afin de lever au plus vite cet obstacle dont le potentiel de nuisibilité, à court, moyen et long terme, était considérable. A compter de ce moment la mise en place à grande échelle d'une politique de recrutement et de formation à la programmation s'imposa donc comme une chose relevant directement des impératifs de défense nationale. Mobilisant d'importants moyens sur le terrain – la presse, la radio, des permanences installées en ville et des équipes de « sergents recruteurs » itinérantes figurèrent ainsi parmi les divers procédés auxquels on fit largement appel afin d'attirer un maximum de candidats à l'embauche – une campagne de recrutement couvrant l'ensemble du territoire des Etats-Unis démarra durant le mois de février 1956. Dans le meilleur des cas, cinquante à soixante personnes étaient recrutées chaque mois. La plupart d'entre elles ne possédaient aucune expérience antérieure de l'informatique et des ordinateurs. Quant aux

outils et aux procédures qui permettaient de programmer ces derniers, c'étaient des choses encore plus méconnues. Parce qu'ils faisaient en général montre d'une remarquable capacité d'adaptation aux méthodes et aux exigences propres à ce nouveau domaine, les personnes ayant étudié les mathématiques et les individus versés dans l'enseignement de la musique comptaient toutefois parmi les profils les plus recherchés. Après avoir subi trois jours durant des épreuves intellectuelles et psychologiques les personnes jugées aptes à intégrer la *System Development Division* – elles représentaient environ un quart des effectifs testés - étaient tout de suite prises en charge par des formateurs travaillant pour I.B.M. Pendant une période de deux mois, elles devaient d'abord suivre un entraînement intensif à la programmation des ordinateurs de type AN/FSQ-7 (*Whirlwind II*). Immédiatement après que ce premier cycle ait été finalisé, des instructeurs issus de la *RAND Corporation* prenaient le relais et prodiguaient aux apprentis programmeurs un nécessaire complément de formation. Notons que ce second cycle d'apprentissage se déroulait sur une durée de temps équivalente à celle du premier.

Au mois d'octobre 1956 le statut de la *System Development Division* fut modifié. Désormais constituée en entité à but non lucratif indépendante (c'est-à-dire séparée formellement de la *RAND Corporation*), elle reçut une nouvelle dénomination : *System Development Corporation* (S.D.C.). Au cours de l'année 1957 les personnels et les matériels de la S.D.C. furent transférés en Californie, dans des installations qui avaient été spécialement bâties pour les accueillir. Deux ans plus tard les effectifs de la S.D.C. atteignaient 2100 personnes. Sur ces deux milliers d'employés, 700 étaient des programmeurs spécifiquement affectés au développement des programmes du S.A.G.E. La mise en place des 26 centres informatisés⁶⁶ du réseau militaire américain pris fin en 1962. Au jour d'aujourd'hui le nombre d'instructions entrant dans la composition des programmes principaux des 46 ordinateurs du *Semi Automatic Ground Environment* a été évalué à environ un quart de million. Quant au nombre d'ordres informatiques que les programmeurs de la S.D.C. durent également écrire afin de produire les applications secondaires du S.A.G.E., on estime qu'il se situait dans une fourchette allant de 800000 à 900000. Des grandeurs de cet ordre n'avaient encore jamais été atteintes à cette époque dans le domaine de la programmation. Pas plus d'ailleurs que ne l'avait été le niveau de complexité qui caractérisait aussi bien les logiciels de ce système de veille antiaérienne que les opérations d'échanges informationnels qu'ils pouvaient effectuer avec les autres programmes ou bien les diverses catégories d'équipements interconnectées. Qui plus est cette tâche de programmation dont l'ampleur était alors absolument hors de pair

⁶⁶ Le *Semi Automatic Ground Environment* était composé de 23 centres de contrôle et de 3 centres de combat.

devait exiger que l'on mette au point des protocoles de conception informatique et des outils logiciels inédits, le tout afin d'optimiser l'écriture et le débogage des innombrables procédures logiques requises par le fonctionnement du système. Le caractère extraordinaire du travail de programmation que réalisèrent en quelques années à peine les personnels de la *System Development Corporation* fut incontestablement à la hauteur de son coût global, c'est-à-dire 150 millions de dollars⁶⁷.

Les différents chiffres dont nous venons de faire mention sont assurément très élevés et en cela tout à fait remarquables du point de vue de l'histoire de l'informatique. Un des traits typiques de la première informatique, celle des *one kind computers* et des tentatives technologiques audacieuses, était comme nous le savons l'importance des budgets débloqués pour permettre la conception de systèmes informatiques souvent voués à rester uniques. Pourtant jusqu'au milieu des années cinquante, jamais des sommes équivalentes à celles déboursées pour la réalisation du S.A.G.E. ne s'étaient trouvées engagées en une seule fois, sur un seul projet. Quant aux dépenses touchant spécifiquement à la mise au point des programmes destinés aux ordinateurs AN/FSQ-7 – soit 150 millions de dollars – elles n'avaient aucun précédent dans le monde de l'informatique. Pourtant une des choses les plus intéressantes à propos du projet S.A.G.E. ne concerne pas tant la nature exceptionnelle de ces montants, ni non plus ce à quoi ils ont finalement permis d'aboutir sur le plan de la technologie et de l'informatique militaires. Il s'agirait plutôt d'une conséquence indirecte, d'une suite à la fois technologique et sociétale qui n'avait pas été anticipée par les décideurs militaires et civils au moment où le plan de recrutement de la S.D.D. commença, au début de l'année 1956. Pendant près d'une demie décennie (1956-1962), la *System Development Division* de la *RAND Corporation*, puis, à sa suite, la *System Development Corporation*, fonctionnèrent en effet à la manière d'un grand centre de formation pour programmeurs. Eut égard au rôle de tout premier ordre qu'elle assumait au sein du projet S.A.G.E. (que l'on se place ici sur le plan de la production logicielle ou sur celui du recrutement et de la formation des personnels qui devaient s'en charger), Martin Campbell-Kelly et Williams Aspray ont qualifié la S.D.C. de véritable « université pour programmeurs⁶⁸ ». Puisqu'il était question ici de l'élaboration de programmes militaires stratégiques opérant en temps réel, c'est-à-dire de

⁶⁷ Rappelons que même s'il n'a pas été divulgué, le coût total du projet S.A.G.E. a fait l'objet d'appréciations qui, compte tenu de l'excellente disponibilité et de la précision des informations regardant ce projet militaire, laissent à penser qu'il se situait entre 8 et 12 milliards de dollars (de 1964). La part représentée par le développement des logiciels des ordinateurs AN/FSQ-7 ne représentait qu'une partie relativement peu importante de ces sommes colossales mais jamais encore le coût de l'écriture de programmes informatiques n'avait nécessité de pareilles dépenses.

⁶⁸ In [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], p. 194.

procédures informatiques complexes exigeant les plus hauts niveaux qui se puissent rencontrer en termes de qualité et de robustesse logicielles, le degré de qualification des personnels à qui était confié leur développement devait être spécialement élevé. Aussi les cours prodigués aux jeunes recrues de la *System Development Division* par les professionnels d'I.B.M. et ceux issus de ses rangs propres étaient-ils d'un excellent niveau, de la même façon que pouvait l'être l'expérience que ces apprentis se trouvaient par la suite en mesure d'acquérir en travaillant au contact des meilleurs, sur le projet informatique le plus ambitieux de l'époque.

Au fur et à mesure que le projet S.A.G.E. approchait de sa phase de finalisation et que les travaux initiaux de recherche et de développement en programmation cédaient le pas à de plus prosaïques tâches de maintenance et de correction logicielles, les effectifs de la *System Development Corporation* continuèrent à augmenter. Dans le même temps et de façon quelque peu paradoxale, de plus en plus de programmeurs prenaient la décision de quitter cette organisation soit pour aller créer des compagnies commerciales, soit pour aller proposer leurs services à des sociétés déjà existantes. Il n'était en outre pas du tout exceptionnel que ces mêmes sociétés « approchent » les programmeurs formés et employés par la S.D.C. afin de leur offrir des rémunérations particulièrement attractives en échange de leurs compétences. En l'espace d'une dizaine d'années, les instruments informatiques avaient évolué de manière tout à fait radicale. Alors que ces matériels n'avaient cessé de gagner en performances leurs coûts, eux, avaient diminué dans des proportions considérables. A côté de cela la mise au point des nouveaux langages de programmation évolués, comme le FORTRAN et le COBOL, avait rendu la conception d'applications scientifiques ou bureautiques de plus en plus aisée et de moins en moins dispendieuse. Dans le même temps, les premiers groupes d'utilisateurs avaient commencé de se constituer sous l'impulsion des grands constructeurs d'ordinateurs. Ainsi que nous l'avons analysé, l'objectif poursuivi ici consistait à faire diminuer les coûts de développement des logiciels en favorisant le partage au sein de communautés de clients fédérés par l'usage d'une ou de plusieurs machines d'une même marque.

L'ère de l'informatique commerciale que l'UNIVAC avait en quelque sorte inaugurée dans les années 1951-52 se trouvait donc inscrite à la fin de cette même décennie dans un solide processus de montée en puissance. Dans une conjoncture bouillonnante où seuls le dynamisme et la rapidité d'innovation semblait vouloir le disputer à l'accroissement de la tension concurrentielle, la *System Development Corporation* faisait à la fois figure d'école d'excellence et d'intarissable vivier pour les entreprises officiant directement dans le secteur informatique ou bien celles qui s'étaient dotées d'un ou de plusieurs ordinateurs afin

d'améliorer la conduite de leurs propres activités économiques. Le statut légal de la S.D.C. étant celui d'une organisation à but non lucratif, celle-ci ne cherchait pas particulièrement à s'opposer au départ de ses employés (en faisant par exemple des contre-propositions salariales), lorsque des sociétés privées entraient en relation avec ces derniers afin de les recruter. D'après les données disponibles, on sait que la moitié seulement des programmeurs travaillant pour la S.D.C. restaient en poste après 4 années d'activité. Au-delà d'une période de 7 ans, ce pourcentage chutait à 30%⁶⁹. En 1963, la S.D.C. était en train de tourner la page du projet S.A.G.E. et travaillait désormais à la réalisation d'une cinquantaine de nouveaux programmes, en étroite collaboration avec l'U.S. *Air Force*, la *National Aeronautics and Space Administration* et l'*Advanced Research Project Agency*. A cette époque cette organisation employait environ 4300 individus. Or depuis qu'elle avait été créée et jusqu'à cette date c'était près de 6000 personnes – dont nombre de programmeurs - qu'elle avait recrutées et instruites qui s'en étaient allées fonder leurs propres sociétés ou qui, alléchées par des perspectives financières en général très intéressantes, étaient parties à l'extérieur, pour rejoindre les effectifs de telle ou telle entreprise. Au moins dans son principe, ce phénomène n'était pas neuf. On se souvient que lorsque Blair R. Smith avait commencé à travailler à la mise en place d'un groupe d'utilisateurs chez I.B.M., dans les années 1954-55, une des principales difficultés auxquelles il s'était immédiatement trouvé confronté dans son effort d'unification était le ressentiment puissant que les clients de cette firme nourrissaient parfois vis-à-vis de certains de leurs pairs. A cette époque les entrepreneurs équipés de matériels informatiques ne se préoccupaient guère du respect des règles éthiques, fussent-elles élémentaires, lorsqu'il s'agissait pour eux de procéder à l'embauche d'un ou de plusieurs programmeurs alors même que ces derniers, qui représentaient une ressource humaine d'une grande rareté, travaillaient déjà pour le compte d'un confrère et/ou d'un concurrent.

La *System Development Corporation*, par le biais des missions de recrutement, de formation, de recherche et de développement qu'elle accomplît 8 années durant dans le cadre des travaux de programmation, d'installation et de maintenance des logiciels du réseau S.A.G.E., contribua très largement à dissiper le phénomène du manque de programmeurs qui, aux commencements de l'informatique, avait assurément constitué un des principaux freins à sa diffusion (avec le coût exorbitant et la relative rareté des ordinateurs bien entendu). Selon l'expression de Martin Campbell-Kelly, la S.D.C., en pleine guerre froide et alors qu'elle se

⁶⁹ Ces différents pourcentages ont été avancés par l'historien des technologies informatiques Martin Campbell-Kelly in [Campbell-Kelly, 2003], p. 41. En ce qui concerne la *System Development Corporation*, on consultera avec le plus grand profit l'ouvrage que Claude Baum a consacré à son histoire en 1981 (Claude Baum, *The System Builders: The Story of SDC*, Santa Monica, Cal., *System Development Corporation.*, 1981).

trouvait a priori au seul service de la raison militaire, remplit véritablement et incidemment le rôle d'une « université pour programmeurs ». Ce faisant, cette structure unique dans l'histoire forma le creuset d'où sortirent les forces vives qui devaient autoriser les Etats-Unis à assoire leur future suprématie mondiale dans le secteur du logiciel.

La S.D.C. conserva son statut d'organisme à but non lucratif jusqu'en 1968. Cette année-là, elle acheva le processus de normalisation des rapports qu'elle avait entamé trois ans auparavant avec un de ses principaux partenaires historiques, l'U.S. *Air Force*. Beaucoup moins connue que des firmes comme *Sun* ou *Microsoft*, la *System Development Corporation* est longtemps demeurée la plus grande entreprise d'ingénierie logicielle des Etats-Unis et dans le monde. Par le jeu complexe des cessions et des alliances économiques, elle est successivement devenue une filiale de *Burroughs* en 1980 et d'*Unisys*⁷⁰, en 1986. Intégrée à *Paramax*, filière militaire d'*Unisys*, elle a été cédée à la *Loral Corporation* en 1995, qui l'a elle-même revendue en janvier de l'année suivante à la *Lockheed Martin Corporation*. Logique retour des choses à leurs origines, l'avionneur, spécialiste des systèmes de haute technologie, est un des principaux fournisseurs du département de la défense américain.

Mastodonte parmi les firmes et organisations productrices de softwares, détentrice d'un savoir-faire et d'une expérience hors du commun, bénéficiant fort logiquement du soutien du gouvernement et de l'armée, ses bailleurs de fonds, la *System Development Corporation* compta parmi les premières structures spécialisées dans la mise au point de cette catégorie de produits informatiques et remplit assurément un rôle des plus décisifs dans le champ qu'elle contribua elle-même à constituer puis à alimenter de ses apports théoriques et pratiques⁷¹. Pour influente qu'elle ait été, la S.D.C. ne devait pourtant pas être la seule structure de grande envergure à se lancer dans le domaine excessivement complexe et exigeant de la conception des grands systèmes informatiques intégrés.

2.2.6.5. I.B.M. et le réseau de réservation aérienne SABRE.

A la fin des années cinquante puis au début de la décennie soixante, d'autres acteurs industriels opérant parfois conjointement dans les secteurs de l'informatique, de l'électronique, de l'aéronautique et de l'armement, prirent également une part active à la réalisation de grands projets informatiques civils ou militaires. Parmi ceux-là on pourrait citer en tout

⁷⁰ Après la fusion de *Burroughs* et de la *Sperry Corporation* en une entité unique, *Unisys*, la S.D.C. a été incorporée à *Paramax*, la branche militaire de cette dernière.

⁷¹ Notamment dans le cadre du time-sharing et de l'échange de données informatiques entre ordinateurs distants, travail qu'elle réalisa notamment pour le bénéfice de l'*Advanced Research Project Agency*.

premier lieu I.B.M. qui produisit, ou plutôt qui procéda à l'informatisation du système de réservation des billets de la compagnie aérienne *American Airlines*. Des études de faisabilité concernant aussi bien l'implantation des matériels que celle des logiciels furent réalisées par un groupe de travail appartenant au géant informatique dès 1954. Mais en raison de l'ampleur et du coût présumés du projet, I.B.M. préféra ajourner ici son engagement. A cela rien d'étonnant. Echaudée par les risques économiques considérables qu'elle impliquait, la compagnie présidée par Thomas J. Watson Sr. avait déjà repoussé l'offre que l'armée de l'air américaine lui avait faite d'assurer le développement des logiciels du S.A.G.E. Pour les dirigeants d'I.B.M., il semblait que le déploiement du *Semi Automatic Business Environment Research* (S.A.B.E.R.), comme devait être baptisé initialement le futur réseau d'*American Airlines*, ne pourrait pas suivre une voie différente. A l'instar de celle de son « équivalent » militaire – voisin du sigle S.A.G.E. l'acronyme S.A.B.E.R. indique d'ailleurs clairement l'existence d'un certain rapport de parenté entre les deux métastructures informatiques – la mise en place du système de réservations de la compagnie aérienne civile supposait de très lourds investissements. Ne bénéficiant évidemment pas de l'appui financier des autorités civiles et militaires américaines puisqu'il s'agissait d'un projet commercial initié par des groupes privés, le S.A.B.E.R. n'était pas à l'abri d'un enlisement, voire d'un échec qui pourrait finalement s'avérer fatal à ses concepteurs et à ses commanditaires. En 1954, nonobstant son statut incontestable et incontesté de première entreprise mondiale dans le secteur de la production d'équipements informatiques, la société I.B.M. n'avait d'autre choix que celui consistant à faire montre d'une prudence redoublée dès lors qu'il était question de son niveau de participation à la réalisation des grands chantiers informatiques de l'époque. Cette forme de réserve devait tout spécialement intéresser les vastes structures informatiques distribuées dont les nœuds centraux et périphériques, par définition, étaient voués à opérer à distance et en temps réel les uns avec les autres. Si un des principaux points d'achoppement regardant les ressources matérielles constitutives de ces réseaux était représenté par l'importance des dépenses attachées à la production de leurs composants puis au déploiement physique de ces derniers⁷², il en existait un autre que nous avons déjà évoqué et qui était peut-être plus déterminant encore que le premier. Il s'agissait bien entendu de la grande insuffisance dont les firmes et organisations gouvernementales concernées par de tels projets souffraient, en termes d'expérience et de capacité d'expertise, quant à la conduite des procédures d'écriture, de correction et de maintenance des logiciels qui leur étaient destinés.

⁷² En 1955 les technologies employées pour la construction des ordinateurs étaient encore fort onéreuses, mais en retour elles offraient un niveau de fiabilité tout à fait satisfaisant.

Peu à peu le prix des ordinateurs et des périphériques informatiques diminuait tandis que de nouvelles compétences en matière d'ingénierie logicielle commençaient à diffuser dans les espaces scientifiques et industriels, ceci principalement grâce aux travaux décisifs réalisés à la même période par les personnels de la *System Development Corporation*. A la faveur de ces évolutions et peut-être aussi parce qu'elle présentait la possibilité d'une concurrence se dessiner au sein de ce domaine commercial encore inviolé, l'entreprise I.B.M. adressa à *American Airlines* une proposition officielle portant sur le développement d'un réseau de réservation aérienne au cours des derniers mois de l'année 1957. La valeur globale de ce projet qui représentait une première mondiale – il s'agissait en effet d'un système civil même si sa parenté avec le S.A.G.E. était plus qu'évidente⁷³ - devait être évaluée par le constructeur d'ordinateurs à trois dizaines de millions de dollars. En 1957 une telle somme représentait bien évidemment un investissement considérable, y compris pour une puissante compagnie aérienne. En même temps si l'on prend en considération les avantages formidables que son futur opérateur pouvait espérer tirer de son exploitation à l'échelon national, la trentaine de millions que le réseau informatique S.A.B.E.R. devait coûter à la société *American Airlines* représentait pour elle une dépense tout à la fois nécessaire – car extrêmement profitable - et dérisoire. Dérisoire car si on la place en regard des diverses appréciations qui ont été faites jusqu'à présent du coût total du S.A.G.E., lesquelles avoisinent en général 8 milliards de dollars, elle ne représentait en définitive qu'un dixième de la somme que le gouvernement américain s'était trouvé dans l'obligation de dépenser pour l'établissement de chacun des nœuds opérationnels composant son système de surveillance continental. Il va de soi que la destination commerciale du S.A.B.E.R. le dispensait d'avoir à couvrir la diversité de fonctions informationnelles et télécommunicationnelles que la vocation militaire du S.A.G.E. le destinait à devoir impérativement accomplir. De la même façon, le niveau d'intégration des deux réseaux n'était pas comparable, pas plus que ne l'était l'importance de leurs implantation et couverture spatiales respectives. Cette différence d'échelle et de capacités fonctionnelles, en même temps que la disproportion qui existait entre les quantités et la sophistication des matériels et des logiciels développés puis engagés de part et d'autre, permet dans une large mesure de rendre compte de l'écart de coût remarquable qui séparait ces deux métastructures informatiques. Le fait est cependant que sans la précedence du S.A.G.E. jamais un réseau civil tel que S.A.B.E.R. n'aurait pu voir le jour. La nécessité de la mise en place rapide du *Semi Automatic Ground Environment*, ajoutée aux moyens

⁷³ Le S.A.B.E.R. (SABRE) a quelquefois été surnommé « the S.A.G.E.'s Kid », c'est-à-dire littéralement « le gosse du S.A.G.E. ».

financiers et humains proprement gigantesques que le gouvernement américain débloqua pour rendre celle-ci possible, permit aux organisations scientifiques et aux firmes industrielles impliquées dans sa réalisation de développer des technologies physiques et logiques inédites, d'acquérir des compétences et de former des personnels qui par la suite bénéficièrent énormément aux secteurs de l'informatique civile et militaire américaine. Parce qu'il reprenait à moindre échelle des technologies physiques et logicielles directement dérivées de celles que le complexe militaro-informatique⁷⁴ avait spécialement conçues pour le S.A.G.E., la mise en place du réseau national *Semi Automatic Business Environment Research* fut l'occasion de les voir pénétrer, pour la première fois et avec succès, les champs conjoints du civil et du commercial. A l'origine le cœur du S.A.B.E.R se composait d'un centre opérationnel équipé de deux *mainframes* à transistors I.B.M. 7090 *Data Processing System*. Le schéma organisationnel de ce complexe était globalement calqué sur celui des centres de contrôle du S.A.G.E. puisque l'un des deux ordinateurs s'y trouvant installés était placé en veille permanente, toujours prêt à prendre le relais de la machine de service pour le cas où cette dernière aurait manifesté un quelconque signe de défaillance. Etaient raccordés à ces deux I.B.M. 7090 16 périphériques de stockage de masse de type 1301 *Disk Storage Unit*. Il s'agissait en fait de disques durs de grande capacité descendant de celui employé sur l'I.B.M. 305 R.A.M.A.C.⁷⁵, et capables individuellement de stocker et de transférer 28 millions de caractères et 90000 caractères par seconde. Des lignes téléphoniques reliaient cette paire d'ordinateurs originellement installée à Briarcliff Manor, près de New York, à plus d'un millier de bureaux répartis dans une soixantaine de grandes villes du pays. Chacun de ces bureaux était pourvu d'équipements informatiques standard et peu onéreux (téléscripteurs, appareillage de modulation/démodulation), lui permettant de communiquer en temps réel avec les deux *mainframes* formant l'épine dorsale du système de réservation.

Le S.A.B.E.R. - entre-temps celui-ci avait été rebaptisé réseau SABRE par ses propriétaires⁷⁶ – devint pleinement opérationnel au cours du mois de décembre 1965. A ce

⁷⁴ Pour reprendre et transformer très légèrement le mot célèbre que le Président Eisenhower eut en fin de mandat.

⁷⁵ Rappelons que ce sigle signifie *Random Access Method of Accounting and Control*. Introduit sur le marché en septembre 1956, l'I.B.M. 305 RAMAC *Data Processing System* fut le premier ordinateur de l'histoire équipé d'un système d'enregistrement à disques magnétiques (le R.A.M.A.C.).

⁷⁶ Une certaine incertitude demeure quant aux raisons qui motivèrent *American Airlines* à adopter le terme SABRE en lieu et place du sigle S.A.B.E.R. Cette modification intervint en 1964, soit un an avant la mise en service complète du réseau de réservation, ce qui laisse fortement supposer qu'elle eut lieu pour des motifs de marketing. D'après les informations disponibles sur le site de la *SABRE Group Holdings Inc.*, la désignation « SABRE » est un acronyme signifiant « *Semi Automatic Business Research Environment* ». Sur le site d'*American Airlines*, on parle de « *Semi Automated Business Research Environment* ». Dans les deux cas la signification du sigle initial aurait été peu ou prou préservée tandis que l'interversion de ses deux dernières lettres aurait autorisée la définition d'une marque facilement identifiable et mémorisable par les usagers du

moment, le système de réservation d'*American Airlines* était capable de prendre en charge 85000 appels téléphoniques par jour. Il pouvait également gérer l'ensemble des opérations bureautiques que les 40000 réservations enregistrées au quotidien réclamaient. Idem avec les 20000 billets qui étaient édités chaque jour. Si par prudence économique les dirigeants d'I.B.M. avaient refusé d'assurer le développement des logiciels du réseau S.A.G.E. lorsque cette mission leur avait été proposée, ils acceptèrent en revanche de mener à bien celui du système SABRE, estimant que l'entreprise avait acquis une capacité d'expertise suffisante pour cela depuis le milieu des années 50. Ce travail mené conjointement par des personnels issus des effectifs d'I.B.M. et d'*American Airlines* dura près de cinq ans et impliqua environ 200 programmeurs et techniciens. Profitant de ce qu'ils oeuvraient ensemble à sa réalisation, les spécialistes du géant informatique formèrent les employés du transporteur aérien à la programmation des ordinateurs 7090. En termes de production de logiciels, l'écriture des softwares du SABRE représenta le plus grand projet logiciel civil entrepris au cours de la première moitié des années 60. Le nombre de lignes de code composées afin de concevoir l'ensemble des softwares nécessaires à l'élaboration de ce système ainsi qu'à son fonctionnement avoisinait un million. La mise au point des programmes opérationnels du SABRE réclama l'écriture d'environ la moitié de ces lignes de code. Le demi million de lignes de code restant représentait quant à lui le résultat du développement des divers outils logiques qui avaient été nécessaires à la conduite des procédures de test et de débogage des logiciels formant le cœur du réseau de réservation informatisé SABRE. A l'instar de ceux opérant sur les ordinateurs du S.A.G.E. - quoiqu'à un autre niveau - les programmes opérationnels du SABRE étaient extrêmement complexes. Puisque ce dernier était un système de traitement de données distribué opérant en ligne et en temps réel, il devait être en mesure de traiter simultanément un nombre élevé d'instances de fonctions télécommunicationnelles et bureautiques, avec une minimalisation du risque de surgissement d'erreur dans les multiples processus de transfert, de manipulation et de transformation des informations que celles-ci pouvaient impliquer. Par exemple les mémoires de masse des I.B.M. 7090 du SABRE stockaient sur leurs bases de données la totalité des informations relatives aux vols

voyage aérien. Pour d'autres, SABRE voudrait dire « *Semi Automatic Business Related Environment* » ou encore « *Semi Automated Booking and Reservation Environment* ». Gilbert Burck avance une explication toute différente. Pour l'auteur de *The Computer Age*, « le système d'*American Airlines* fut appelé SABRE, ce terme n'étant pas un acronyme mais un nom évoquant la rapidité et la capacité à toucher la cible », (cité in [Campbell-Kelly, 2003], p.44). Le nœud n'est pas aisé à dénouer d'autant plus que si le mot français « sabre » se dit effectivement « *sabre* » en anglais, il se prononce « *saber* » en américain. On peut toujours penser qu'il s'agissait de conférer au nouveau réseau de réservation informatisé du transporteur américain une image internationale dans le monde anglo-saxon. Toutefois cette hypothèse est douteuse puisque le SABRE, au moins jusqu'en 1983, demeura un réseau strictement national.

d'*American Airlines* ainsi qu'à leurs passagers. En fonction des évolutions de l'offre et de la demande, c'est-à-dire finalement en fonction de l'état courant des bases de données et des diverses sortes d'informations⁷⁷ qui étaient susceptibles d'être entrées à partir des centaines de terminaux distants alimentant le cœur du réseau, l'ordinateur central du SABRE devait pouvoir procéder à la mise à jour, en temps réel, d'une partie plus ou moins importante des données contenues dans lesdites bases. De sa capacité à traiter une multitude d'informations transmises à distance immédiatement et sans anicroche dépendait toute l'efficacité, et par conséquent le niveau de rentabilité, du système de réservation informatisé SABRE. De façon quasiment conforme aux prévisions qui avaient été faites par I.B.M. en 1957, la construction et l'installation de ce formidable outil commercial coûtèrent 40 millions de dollars à *American Airlines*. Sa mise en service permit de faire instantanément diminuer le taux d'erreurs enregistrées sur les opérations de réservations à moins de 1 %. La complète activation du réseau SABRE, en 1965, entraîna d'autres conséquences immédiates, mais elles devaient cette fois toucher directement les êtres humains. Ainsi l'informatisation du service de réservation du transporteur aérien lui permit-elle de réaliser des économies de personnel à hauteur de 30 %. Par son impact le SABRE marqua de façon tout à fait remarquable l'entrée des réseaux informatiques dans la sphère civile. Mais alors même que pour la première fois l'informatique géographiquement éclatée mettait sa souplesse et son hyper efficacité au service de la raison commerciale, la menace d'un remplacement de l'homme par des « cerveaux » électroniques communicants dont il peinait à comprendre l'économie et la puissance prenait véritablement corps dans le champ du travail. De la même manière, l'introduction du SABRE devait signifier le commencement de la diffusion, au sein de la société américaine, d'une technologie invisible et omnipotente, capable de conserver indéfiniment ou presque des informations personnelles à propos des individus et de leurs déplacements interurbains. Si l'ordinateur pouvait accélérer et fiabiliser grandement les transactions commerciales, ce faisant, il était tout aussi capable de servir à la surveillance des personnes. A supposer qu'un tiers soit en mesure d'ouvrir ce que l'on conviendra de nommer ici un « canal d'utilisation discret » en parallèle de sa fonction principale, l'ordinateur pouvait donc constituer une menace potentielle pour les libertés individuelles⁷⁸.

⁷⁷ Dans la majorité des cas il s'agissait ici d'informations relatives à des réservations mais il pouvait aussi se trouver des cas d'annulation. Dans pareilles circonstances un vol considéré comme complet à un moment donné ne l'était plus le moment d'après et puisque la ou les places désormais vacantes étaient redéfinies comme telles dans les bases de données du SABRE, elles pouvaient à nouveau être proposées aux voyageurs éventuellement intéressés.

⁷⁸ I.B.M. était un des principaux fournisseurs d'équipements informatiques et électroniques du *Department of Defense*. Cette entreprise travaillait aussi pour le compte de la *Central Intelligence Agency* (C.I.A.) et du *Federal*

Très vite l'entreprise I.B.M. chercha à valoriser l'expérience qu'elle avait acquise, ou plutôt qu'elle était en train d'acquérir en travaillant sur le SABRE d'*American Airlines*. Dès le début des années 60, elle proposa son savoir-faire en matière de réseaux de réservation informatiques à d'autres grandes compagnies aériennes américaines. Parallèlement à la finalisation du SABRE., le géant de l'informatique travailla à l'implantation de deux réseaux similaires à celui d'*American Airlines*. Il s'agissait respectivement du *Deltamatic*, construit pour la compagnie *Delta Airlines*, et du *Panamac*, propriété de la *Pan American Airlines*. Ces deux réseaux commerciaux entrèrent en service en 1964. Ils étaient l'un et l'autre de taille plus modeste que celle du SABRE, ce qui explique pourquoi ils ont été terminés avant lui. Les réseaux de réservation de la *Delta Airlines* et de la *Pan American Airlines* étaient construits autour de deux I.B.M. *Data Processing System*, respectivement un modèle 7074 et un modèle 7080. La très grande proximité architecturale des deux ordinateurs à transistors qui servaient de processeurs centraux au *Deltamatic* et au *Panamac* permet largement d'expliquer pourquoi le développement des programmes opérationnels de ces systèmes se déroula de façon relativement rapide. A cette époque les codes informatiques étaient élaborés principalement en fonction des unités centrales de traitement (C.P.U.) qui équipaient les ordinateurs. Deux machines pourvues de deux C.P.U. différents exigeaient donc l'écriture de deux codes informatiques distincts, quand bien même ces derniers étaient destinés à accomplir des fonctions totalement identiques. A l'inverse deux ordinateurs matériellement proches pouvaient partager un même code, pourvu que soient apportées à ce dernier de légères mais néanmoins nécessaires modifications. Qui plus est des logiciels et des méthodes de programmation et de vérification spécifiques à ce genre de structures informatisées avaient déjà été élaborés et employés par I.B.M. pour le SABRE. Aguerri, le fabricant américain put donc à nouveau les réutiliser dans le cadre de ces deux nouveaux projets commerciaux.

L'année où le *Deltamatic* et le *Panamac* commencèrent à fonctionner aux Etats-Unis fut également celle où I.B.M. annonça la disponibilité prochaine des premiers modèles de sa nouvelle gamme d'ordinateurs *System/360*. Cherchant à mettre à profit les concepts informatiques inédits introduits via cette nouvelle famille de machines – le moindre n'étant pas leur compatibilité logicielle – ainsi que la capacité d'expertise unique dans le monde civil

Bureau of Investigation (F.B.I.). On sait désormais qu'elle fabriqua des ordinateurs spéciaux pour la *National Security Agency* (N.S.A.), la *Defense Intelligence Agency* (D.I.A.) et le *National Reconnaissance Office* (N.R.O.), toutes de puissantes agences de renseignement que le gouvernement américain, de façon plus ou moins secrète, avait mises en place après la deuxième guerre mondiale. Puisque seuls les personnels d'I.B.M. étaient habilités à intervenir sur les machines que ses clients lui louaient, il était tout à fait envisageable qu'ils accèdent au contenu des bases de données des entreprises locataires – au premier rang desquelles figurait *American Airlines* - au profit d'un tiers, par exemple à l'occasion d'une opération de maintenance.

qu'elle s'était trouvée en mesure de bâtir eut égard à son statut de principal maître d'œuvre des trois premiers réseaux informatisés commerciaux nord-américains, la société I.B.M. déclara également qu'elle entamerait sous peu le développement de nouveaux logiciels réseaux optimisés pour les machines du *System/360*. Cet ensemble de programmes initialement destinés à opérer sur les systèmes informatiques distribués des compagnies aériennes américaines fut baptisé du nom de *Programmable Airline Reservation System* (P.A.R.S.). Le P.A.R.S. avait la particularité de posséder une architecture modulaire. Ainsi les différentes applications informatiques qu'exigeait la réalisation des activités commerciales proprement dites étaient-elles distinctes de l'*Operating System* (O.S.), qui avait en charge le bon fonctionnement des ordinateurs centraux du réseau, et celui de leurs périphériques. Même si O.S. et routines applicatives formaient toujours une seule et même unité programmatique ils n'en étaient pas moins séparés sur le plan logique. Cette séparation était une chose nécessaire pour assurer la compatibilité des différents modèles d'ordinateurs du *System/360*. Au fil des années et après qu'il ait commencé à être distribué par I.B.M., en 1968, le P.A.R.S. a évolué et ses deux composantes fondamentales ont fini par être réellement coupées l'une de l'autre. La partie *Operating System* du P.A.R.S. a été renommée A.P.P.C. (*Advanced Program to Program Communications*) tandis que celle qui regroupait les bases de données et les fonctions de réservation a reçu le nom d'A.C.P. (*Airline Control Program*). En février 1979, après avoir fait l'objet d'un certain nombre de perfectionnements et d'extensions fonctionnelles, l'A.C.P. a une fois encore changé d'appellation pour devenir l'A.C.P./T.P.F. (*Airline Control Program/Transaction Processing Facility*). Aujourd'hui connu sous le sigle T.P.F. (*Transaction Processing Facility*), ce logiciel spécialisé est capable d'assurer avec rapidité et fiabilité le traitement et le transfert de très importants volumes de données informatiques⁷⁹, notamment dans le domaine des transactions commerciales.

Descendant direct des programmes des réseaux SABRE, *Deltamatic* et *Panamac* qu'I.B.M. construisit aux Etats-Unis à la fin des années 50 et au début des années 60, le complexe logiciel *Transaction Processing Facility* est aujourd'hui employé par de très nombreuses entreprises. Parmi ses principaux usagers figurent aujourd'hui la plupart des grandes compagnies aériennes mondiales, des consortiums réunissant des transporteurs

⁷⁹ Capable de supporter simultanément des milliers de terminaux informatiques, avec un volume de transactions pouvant atteindre 5000 opérations par seconde dans le cas des gros utilisateurs, le *Transaction Processing Facility* offre en moyenne un temps de réponse équivalent à 2 ou 3 secondes.

aériens⁸⁰ - la société *Air France* est d'ailleurs membre de l'un d'entre eux - des transporteurs ferroviaires (*Amtrak, Trenitalia, S.N.C.F.*), mais aussi des institutions bancaires, financières et hôtelières (*Bank of America, American Express, Visa International, Holiday Inn, Marriott, Best Western, ...*), et les services de police de la ville de New York.

2.2.6.6. Autres grandes compagnies et organisations américaines impliquées dans la production de programmes informatiques au début des années 60.

Si I.B.M. devait faire figure d'entreprise pionnière en matière de développement, d'installation, de programmation et de suivi technique de réseaux d'ordinateurs et de logiciels à vocation militaire et commerciale, elle ne fut cependant pas la seule grande société américaine à s'illustrer dans ces deux domaines étroitement connexes, à partir du milieu des années cinquante. D'autres compagnies nationales oeuvrant dans le ou les secteurs de l'informatique, de l'électronique, des télécommunications ou de l'aéronautique se trouvèrent elles aussi impliquées à un niveau ou à un autre dans la réalisation des ambitieux projets de défense informatisés qui devaient caractériser la période de la guerre froide. Tout comme le faisait *Big Blue*⁸¹, ces groupes industriels cherchèrent aussitôt à rentabiliser dans la sphère civile toute l'expérience qu'ils avaient pu acquérir grâce à leur participation aux *L-Systems* et/ou aux *Big L-Systems*⁸². Parmi les entreprises engagées dans la réalisation de ces vastes chantiers militaires se trouvaient les principaux fabricants d'ordinateurs du pays (comme I.B.M., *Sperry Rand, Honeywell, Control Data Corporation, National Cash Register, Bendix* ou *Burroughs*), les groupes industriels versés dans la production de matériels électriques, électroniques et parfois informatiques (*Radio Corporation of America, General Electric, Western Electric, Westinghouse...*), les sociétés oeuvrant dans le domaine des

⁸⁰ Tels Galileo (*British Airways, KLM, United Airlines*), Sabre (*American Airlines, All Nippon Airways, Cathay Pacific, China Airlines, Singapore Airlines*), Worldspan (*Delta Airlines, Northwest Airlines, TransWorld Airlines*), et Amadeus (*Air France, Iberia, Lufthansa...*).

⁸¹ Ce surnom fut donné à I.B.M. officiellement en raison du costume de couleur bleu foncé que portaient ses employés. Un rapprochement avec le *Big Brother* d'Orwell ne doit cependant être écarté ici, compte tenu des pratiques parfois fortement anti-concurrentielles qui caractérisèrent jadis le comportement commercial du géant de l'informatique.

⁸² Les expressions *L-Systems* et *Big L-Systems* étaient fréquemment utilisées pour désigner les grands projets de défense initiés par le gouvernement américain au cours de la guerre froide. A l'instar du S.A.G.E., l'archétype des *Big L-Systems*, ces projets étaient le plus souvent liés à la détection et la lutte contre les missiles balistiques intercontinentaux. Ils reposaient donc sur des technologies extrêmement avancées et faisaient appel, pour leur implémentation, à de nombreux contractants issus en général des secteurs de l'électronique, de l'informatique, des télécommunications et de l'aéronautique militaire. Le prix des plus coûteux de ces projets – les *Big L-Systems* – était de l'ordre de plusieurs milliards de dollars, ce qui représentait pour les groupes participants une opportunité commerciale formidable.

télécommunications (*Bell Laboratories, International Telephone and Telegraph, General Electric*), et celles travaillant dans le secteur de l'aéronautique et des systèmes d'armes (*Rockwell-Standard Inc., Martin Marietta Corporation, et McDonnell Douglas Corporation, Raytheon Company*). La plupart de ces entités industrielles possédaient des divisions spécialisées dans la mise au point d'appareillages électroniques sophistiqués - quant il ne s'agissait pas purement et simplement d'ordinateurs - et elles collaboraient de manière régulière avec le gouvernement et les forces armées. Dans la majorité des cas et à une époque où les dépenses liées au secteur de la défense nationale représentaient un facteur de second ordre, il s'agissait pour elles de développer des réseaux de veille radar et de lutte antiaérienne informatisés travaillant en temps réel, ainsi que des systèmes d'armes intégrés (aéronefs de combat et d'espionnage, missiles de tous types destinés à l'interception des vecteurs ennemis et I.C.B.M., vecteurs spatiaux et moyens d'observation satellitaires), faisant systématiquement appel au nec plus ultra technologique du moment. Parmi les *Big L-Systems* à la conception desquels bon nombre de ces firmes prirent part, on pourrait mentionner la chaîne des trois stations informatisées du *Ballistic Missile Early Warning System* (B.M.E.W.S.), un réseau militaire dont la mission première consistait à surveiller l'activité ennemie dans l'hémisphère nord, les deux centres d'opérations souterrains du dispositif de surveillance aérienne continental américano canadien *North American Air Defense Command*⁸³, et le *Strategic Automated Command and Control System* (S.A.C.C.S.), réseau informatique sécurisé de veille et d'alerte opéré par l'U.S. *Air Force Strategic Air Command*.

Comme il est possible de l'imaginer, la mise en place de chacune de ces superstructures informatiques exigea de la part de ceux qui en avaient la charge qu'ils déploient des efforts colossaux tout en dépensant des sommes considérables. Ces trois réseaux virent cependant le jour au cours de la première moitié des années 60. Aussi la situation dans laquelle se trouvaient leurs constructeurs ne saurait être exactement comparée à celle des concepteurs du *Semi Automatic Ground Environment*. Dans les années 1953-54 en effet, tout restait encore à faire concernant les réseaux informatiques. Moins d'une décennie plus tard, alors que les machines informatiques disponibles auprès des fabricants étaient de plus en plus fiables et performantes, des progrès extraordinaires avaient déjà été réalisés sur le plan de

⁸³ Ou N.O.R.A.D. Le premier des deux centres opérationnels du N.O.R.A.D. a été implanté à North Bay, dans l'Ontario. Le second *Combat Operations Center*, qui constitue le cœur véritable de ce dispositif, a été construit sous Cheyenne Mountain, une hauteur située à Colorado Springs, dans le Colorado. De manière assez paradoxale, ce lieu hautement stratégique jouit d'une grande popularité et il a servi de décor à de nombreux films, séries télévisées et romans (par exemple *Wargames, Terminator 3, Stargate...*). Eut égard à l'évolution de la nature des menaces, les missions du N.O.R.A.D. ont été redéfinies au début des années 70. Suivant ces changements, son nom a lui aussi subi une transformation. Ainsi le sigle N.O.R.A.D. signifie-t-il désormais *North American Aerospace Defense Command*.

l'intégration des différentes composantes matérielles des réseaux. Grâce à la mise au point de protocoles de communication spécifiques l'échange et le traitement des données entre ordinateurs étaient également devenus des opérations courantes, qui conjuguèrent rapidité, fiabilité et sûreté. Quant à la question du développement des programmes destinés à ces architectures informatiques complexes, l'écriture des logiciels du S.A.G.E. lui avait apportée une réponse au moins partielle, en mobilisant des dizaines de programmeurs de grand talent et en provoquant dans le même temps la formation de plusieurs milliers d'individus à cette activité demeurée jusqu'ici presque confidentielle. Il s'agissait ici par conséquent de ressources humaines existantes et compétentes, sur lesquelles les concepteurs des nouveaux dispositifs de défense américains eurent tout loisir de s'appuyer pour assurer le développement des *softwares* qui devaient piloter leurs systèmes informatiques distribués. Le fait que, grâce au S.A.G.E., il existât sur le territoire des Etats-Unis une communauté de programmeurs déjà constituée ne devait pas pour autant signifier que l'écriture des programmes pour les réseaux informatiques était soudainement devenue une affaire triviale. Par exemple la mise au point des softwares du *Strategic Automated Command and Control System*, un réseau à la fois plus complexe et plus étendu que le S.A.G.E. dont on entreprit la construction au début des années 60, mobilisa plusieurs centaines de programmeurs pendant une période d'environ deux ans. Que l'on prenne ici en considération les effectifs de spécialistes en codage informatique que la réalisation de ce dispositif défensif réclama ou bien alors le temps qui fut nécessaire à son développement, on voit bien que ces chiffres étaient largement inférieurs à ceux qui avaient pu caractériser la construction du *Semi Automatic Ground Environment*. Les programmeurs qui avaient reçu leur formation en travaillant sur le S.A.G.E. furent nombreux à participer également à la conception du *Strategic Automated Command and Control System*. Cette migration de centaines de spécialistes d'un projet *L-Systems* à l'autre explique en partie pourquoi il fallu aussi peu de temps aux militaires américains pour rendre le S.A.C.C.S. opérationnel⁸⁴ : les gens qui prirent part à son élaboration possédaient une expérience, certainement la meilleure que l'on ait pu faire valoir à cette époque. Un autre élément de taille doit également être pris en compte ici pour parvenir à rendre intégralement compte de la rapidité avec laquelle cette prouesse technologique fut accomplie.

A la fin des années cinquante, Jules Schwartz, un scientifique travaillant pour la *System Development Corporation*, mit au point avec ses collaborateurs un nouveau langage

⁸⁴ Les premiers éléments du *Strategic Automated Command and Control System* commencèrent à opérer dès 1963.

informatique de haut niveau dans l'optique de satisfaire les besoins spécifiques de l'U.S. *Air Force*. Bien que plusieurs langages proches de l'utilisateur aient vu le jour à la fin des années 50 et au début des années 60, aucun d'entre eux, que ce soit le COBOL, l'A.P.L., le Lisp, le PL/I ou le FORTRAN, ne répondait vraiment aux attentes il est vrai particulières des militaires. C'est pour combler cette brèche que Schwartz imagina le J.O.V.I.A.L. Cet acronyme signifie *Jules Own Version of the International Algorithmic Language*. Comme son nom l'indique celui-ci était assez proche du langage impératif ALGOL⁸⁵. Les personnels de la S.D.C. qui élaborèrent le J.O.V.I.A.L. le pensèrent d'abord et avant toute chose comme un langage de commande et de contrôle typiquement orienté vers la production d'applications destinées à des équipements informatiques militaires opérant en temps réel. Si ce langage était tout particulièrement adapté à l'écriture des logiciels contrôlant les réseaux informatiques, les militaires y recoururent également de large façon pour programmer leurs matériels électroniques embarqués (comme les ordinateurs de bord des missiles de croisière et l'avionique des avions de combat). Fruit de l'incomparable expérience que les programmeurs de la *System Development Corporation* avaient accumulée en travaillant à la conception des logiciels du S.A.G.E., le langage informatique J.O.V.I.A.L. fut pour la première fois utilisé sur une grande échelle par les programmeurs responsables de l'écriture des logiciels du *Strategic Automated Command and Control System*. A compter de ce jour, l'U.S. *Air Force* n'a jamais cessé de l'employer⁸⁶.

Que son action ait concerné le conseil technologique ou bien encore le développement des systèmes, on sait toute l'importance du rôle que la S.D.C. continua à jouer dans le secteur de la conception des grandes installations informatiques militaires aux Etats-Unis, après que le réseau S.A.G.E., qui avait initialement motivé sa création, soit effectivement entré en service. Pour autant la S.D.C. ne fut pas la seule organisation émanant du projet S.A.G.E. à se distinguer dans ce domaine, à partir des années 1962-63.

Formée à l'origine dans le but de coordonner les efforts de tous les participants au *Semi Automatic Ground Environment*, la M.I.T.R.E. *Corporation* vit le jour en juillet 1958. M.I.T.R.E. est un sigle qui veut dire *Massachusetts Institute of Technology Research and Engineering*. Lorsque cette entité à but non lucratif fut créée afin de fournir au gouvernement

⁸⁵ Rappelons que le sigle ALGOL signifie *ALGO*rithmic Language.

⁸⁶ Depuis qu'il a été conçu, le langage J.O.V.I.A.L. a évidemment fait l'objet de nombreux perfectionnements. Il s'est par exemple vu adjoindre de nouveaux modules fonctionnels (comme un environnement de développement graphique par exemple.). Au moment où nous écrivons, l'ensemble d'outils intégrés J.O.V.I.A.L. est toujours utilisé pour programmer les matériels informatiques mis en œuvre par l'U.S. *Air Force*. On le retrouve par exemple dans les avioniques d'appareils aussi perfectionnés que les bombardiers B-1, B-2 et F-117 ou encore celle du fameux avion de surveillance électronique A.W.A.C.S.

fédéral des conseils et des services en matière d'ingénierie et technologies de l'information et des systèmes, la plupart de ses personnels fut recrutée au sein du *Lincoln Laboratory*. C'est notamment dans ce prestigieux laboratoire du M.I.T. que le *Whirlwind*, c'est-à-dire le prototype des I.B.M. AN/FSQ-7 du réseau S.A.G.E., avait été imaginé et fabriqué. Eut égard au niveau de compétence de ses premiers employés, la M.I.T.R.E. se forgea rapidement une réputation d'excellence. Une fois son travail sur le S.A.G.E. complété, la M.I.T.R.E. entama de nouvelles collaborations avec les autorités militaires et civiles américaines. Dès l'année 1963, cette organisation développa les infrastructures informatiques et les composantes logicielles d'un système de gestion du trafic aérien (*Air Traffic Control* ou A.T.C.), pour le compte de l'U.S. *Federal Aviation Administration*. Le *National Airspace System* A.T.C. ne constitua toutefois pas le seul projet informatique d'envergure auquel la M.I.T.R.E. apporta son concours pendant les années 60. Il serait trop long et bien entendu hors de propos de chercher à procéder à leur dénombrement exhaustif ici mais il est tout de même possible d'indiquer que parmi les multiples programmes de type C4ISTAR⁸⁷ auxquels la M.I.T.R.E. collabora, on trouve le développement de l'instrumentation électronique et des logiciels de l'avion E-3 *Sentry*/A.W.A.C.S.⁸⁸ et celui du réseau informatisé de l'*Advanced Research Project Agency* (lequel devint par la suite ARPAnet, que l'on présente souvent comme étant l'ancêtre d'Internet).

Le rôle que la mise en place du système de surveillance informatisé continental S.A.G.E. joua durant les années 50 eut égard au développement des technologies de l'informatique, qu'elles soient matérielles ou logicielles, fut comme nous avons déjà eu l'occasion de le signaler tout à la fois séminal et primordial. Nous avons vu pourquoi et comment ce projet de réseau militaire doté d'un budget très supérieur à celui du programme Manhattan avait littéralement précipité la création et/ou le perfectionnement d'équipements et de techniques informatiques extrêmement sophistiqués, et ce dès la première moitié des années 50. L'U.S. *Air Force*, le *Massachusetts Institute of Technology* et de très nombreux groupes industriels américains de premier plan, comme I.B.M., la *Radio Corporation of America*, les *Bell Laboratories*, ou la *Western Electric* contribuèrent à son élaboration. Se faisant, elles renforcèrent notablement leur capacité d'expertise dans leur(s) domaine(s)

⁸⁷ Dans le jargon des militaires et des agences de renseignement américains, le sigle C4ISTAR renvoie aux fonctions suivantes et aux matériels électroniques qui en permettent l'accomplissement: *Command*, *Control*, *Communications*, *Intelligence* (renseignement), *Surveillance*, *Target Acquisition* (acquisition de cibles), *Reconnaissance*.

⁸⁸ A.W.A.C.S. : *Airborne Warning and Control System*. Par cet acronyme on désigne un appareil gros porteur (aux U.S.A. il s'agit d'un Boeing 707 appelé E-3 *Sentry*), équipé d'un radome rotatif caractéristique et d'un dispositif informatique capables d'assurer en temps réel le traitement et la transmission d'informations acquises dans le cadre de missions de reconnaissance, de surveillance et de coordination de manœuvres.

d'intervention respectif(s) tout en consolidant de façon durable la synergie triangulaire armées-industries-universités qui avait caractérisé et assuré l'efficacité de l'effort de guerre américain une décennie plus tôt. Le *Semi Automatic Ground Environment* fut le premier réseau informatique de l'histoire. Autrement dit il s'agissait d'un ensemble inédit d'ordinateurs et de matériels électroniques spatialement distribués, combinant moyens de détection, de contrôle, de communication et d'interception. Les missions de surveillance et d'interdiction pour l'effectuation desquelles le S.A.G.E. avait été créé impliquaient que ses composantes matérielles centrales soient capables de traiter en temps réel des données acquises puis transmises par diverses catégories d'équipements de veille. De la même façon ils devaient également pouvoir transférer des informations, sous une forme exploitable, en direction d'autres dispositifs faisant eux aussi partie intégrante du système.

Le fait de devoir faire face à ces nouveaux besoins numériques, qui plus est à un moment où le contexte géostratégique mondial était des plus contraignes, amena les autorités américaines à placer de très importants moyens humains, financiers et infrastructurels au service du développement rapide de solutions logicielles aptes à les satisfaire. C'est précisément dans la perspective de ce gigantesque chantier de programmation que la *Rand Corporation*, *think tank* historiquement très proche de l'U.S. *Air Force* et de l'avionneur et missilier *Douglas Aircraft*, créa la *System Development Division*, à la fin de l'année 1955. Un an et demi seulement après que cette entité dédiée à la programmation des ordinateurs du S.A.G.E. ainsi qu'à la formation de ses programmeurs ait été mise en place, le *Massachusetts Institute of Technology* établit à son tour une organisation spécialisée dans l'ingénierie de l'information et des systèmes. Ici encore, il s'agissait de travailler au développement du dispositif de surveillance informatisé de l'U.S. *Air Force*. On sait parfaitement combien la construction du réseau S.A.G.E. fut profitable, en termes technologiques et économiques, à I.B.M. La production des ordinateurs équipant ses nœuds rapporta ainsi au géant de l'informatique près d'un demi-milliard de dollars. Si cette société faisait déjà figure d'entreprise archi dominatrice dans le secteur du traitement de l'information au début des années cinquante, on peut sans contredit possible affirmer que c'est grâce au projet S.A.G.E. et aux fabuleux contrats de développement dont celui-ci s'accompagnait qu'elle est par la suite devenue le titan de l'informatique que l'on sait. L'influence déterminante que ce projet sans précédents exerça sur la physionomie et l'évolution d'une industrie informatique encore balbutiante ne devait cependant pas s'arrêter au devenir des seuls matériels et au renforcement de l'hégémonie d'une compagnie en particulier. La *System Development Corporation* et la M.I.T.R.E., structures l'une et l'autre constituées aux confluent des mondes militaires,

industriels et universitaires afin d'apporter des solutions aux problèmes spécifiquement engendrés par la réalisation du réseau S.A.G.E., posèrent grâce à leurs actions respectives les conditions d'apparition d'une véritable industrie du logiciel aux Etats-Unis. C'est en effet à la S.D.C. et à la M.I.T.R.E. que plusieurs milliers d'individus, littéralement, furent formés à l'utilisation des langages, des outils et des méthodes de programmation des ordinateurs.

Les besoins du réseau en programmeurs commencèrent logiquement à décroître lorsque ses différents centres opérationnels se virent tour à tour placés en activité. Son entrée en service effective, durant l'année 1963, ne signifia cependant pas que les personnels spécialisés qui avaient fait leurs classes et leurs armes en travaillant sur ce formidable chantier informatique se trouvèrent brutalement réduits au chômage technique du jour au lendemain. Durant la première moitié des années cinquante, les Etats-Unis avaient par la force des choses souffert d'une pénurie de programmeurs extrêmement préoccupante. Si cette insuffisance avait déjà été source de nombreux problèmes pour les scientifiques et les industriels du pays, elle s'était faite proprement intolérable dès lors que l'informatisation des moyens de la défense nationale était devenue un objectif militaire absolument prioritaire. Les autorités américaines compétentes avaient efficacement résolu cette question en créant la S.D.C. et la M.I.T.R.E. Une fois leur mission première accomplie, ces deux entités devenues corporations indépendantes continuèrent à agir de façon décisive dans les domaines de l'ingénierie de la programmation et des technologies de l'information. Ainsi devait-on les retrouver impliquées dans la plupart des grands programmes informatiques militaires et scientifiques initiés par le pouvoir américain au cours des années soixante. Quant aux personnels que la S.D.C. et la M.I.T.R.E. avaient employé et dont elles avaient assuré la formation une partie continua à œuvrer pour elles – ces programmeurs furent alors fréquemment affectés à la réalisation de nouveaux projets gouvernementaux – tandis qu'une autre partie, certainement la moins négligeable, partit travailler soit pour le compte d'universités, soit pour celui de telle ou telle puissante firme industrielle. Désormais parfaitement conscientes du fait que fournir des applications informatiques avec un ordinateur proposé à la vente ou à la location représentait un argument commercial de taille sur un marché où la demande comme la pression concurrentielle explosaient, les grandes entreprises tendaient en effet à accorder une place de plus en plus prépondérante au développement de logiciels, soit qu'elles se chargent elles-mêmes de ce travail, soient qu'elles en confient la sous-traitance à une entreprise extérieure.

Aussi les programmeurs du S.A.G.E. trouvèrent-ils un marché en plein essor, prêt à leurs accueillir et à exploiter ce qui avait été jusque là considéré par les acteurs de ce domaine comme une ressource particulièrement rare et critique. D'aucuns, parmi ces spécialistes fort

convoités, firent cependant un choix encore différent. Au lieu de rester dans leur organisation d'origine ou de rejoindre une grande société informatique, ils préférèrent créer leur propre affaire afin d'offrir directement des services de programmation – ainsi qu'on les désignait alors - aux structures qui pouvaient se montrer intéressées. En faisant cela, ils empruntaient à leur tour la voie que quelques pionniers, anciens programmeurs chez I.B.M. ou *Sperry Rand*, avaient audacieusement commencé à défricher, à partir de l'année 1955.

2.2.6.7. Les entreprises spécialisées dans la programmation sur commande (*Software Contractors*): caractéristiques opératoires et exemples typiques.

Du fait de leur extrême sophistication, de l'ampleur et de la durée de l'engagement que par définition ils impliquaient, les contrats portant sur la conception de logiciels destinés aux réseaux informatisés - qu'ils soient du reste privés ou gouvernementaux - demeurèrent longtemps la chasse gardée des grandes entreprises nationales et des corporations spécialisées dans l'analyse et la conception des systèmes. Comme il nous a été donné de voir lorsque nous avons évoqué les exemples du S.A.G.E. et du SABRE, ces marchés officiels ou privés possédaient la particularité d'être formidablement lucratifs. Les bénéfices se chiffraient ainsi la plupart du temps en dizaines de millions de dollars. Cependant, fort peu nombreuses étaient les organisations et les entreprises qui disposaient à la fois des moyens et des compétences technologiques que la réalisation de ces projets exigeait impérieusement. A côté, ou plutôt à l'opposé de ces marchés dont l'envergure et la complexité limitaient d'emblée le nombre de soumissionnaires potentiels, il existait d'autres niches commerciales, certes nettement plus modestes, mais qui offraient néanmoins des opportunités très intéressantes à qui savait les saisir. La timide « démocratisation » de l'ordinateur qui s'était amorcée au cours de la première moitié des années cinquante avait provoqué l'apparition de nouvelles classes d'utilisateurs, notamment dans les secteurs du commerce et de la recherche. Simultanément, ce phénomène de diffusion progressive avait engendré de nouvelles demandes en matière de codes informatiques. Si ces nouveaux utilisateurs avaient choisi de se tourner vers l'emploi d'équipements informatiques, c'était évidemment dans la perspective d'accroître leur propre capacité de productivité. Or pour cela, ils avaient impérativement besoin d'applications adaptées à la fois à leur machine et à la spécificité de leurs activités. Si, cas de figure tout à fait courant, ces usagers ne possédaient pas par eux mêmes les ressources nécessaires au développement de ces programmes, il ne leur restait alors qu'une seule alternative pour

obtenir ce qu'ils désiraient : soit se tourner vers le fabricant qui leur avait vendu ou loué leur système informatique, soit faire appel à un tiers capable de réaliser ce travail de programmation. Comme il a déjà été précisé plus haut, les firmes qui concevaient et commercialisaient les ordinateurs à cette époque ne fournissaient avec leurs systèmes que les routines et sous-routines strictement nécessaires à leur opération, ainsi qu'à celle de leurs périphériques. Aussi, en fonction des desiderata de leurs clients, il s'offrait à ces entreprises deux possibilités : soit développer elles-mêmes les applications demandées, soit sous-traiter leur production à une société spécialisée (lorsque le client n'avait pas déjà lui-même opté pour cette dernière solution). Il arrivait également que de grands constructeurs d'ordinateurs chargent de telles sociétés de l'écriture de tout ou partie de l'*operating system* qu'elles destinaient à certaines de leurs machines.

Les entreprises dont il est question ici, longtemps avant que l'avènement d'Internet et de sa fameuse bulle spéculative ne popularise l'emploi de ce terme anglo-saxon, étaient appelées des start-ups. De fait, ces microsociétés montées avec un capital de départ souvent faible et des moyens matériels très limités, se caractérisaient par la surprenante petitesse de leurs effectifs. Une demi-dizaine d'employés représentait en général la moyenne communément constatée, au moins au cours de leur première année d'exercice. Un autre trait typique concernait le profil professionnel de leurs créateurs. Un parallèle limité pourrait être tiré ici entre l'établissement de ces petites firmes spécialisées dans l'écriture de softwares, durant la seconde moitié des années cinquante, et la création, sensiblement au même moment, de nouvelles entreprises dans le secteur de la production des composants électroniques. On se souvient par exemple qu'au mois de février 1956, William H. Shockley, l'un des inventeurs du transistor, avait démissionné des *Bell Telephone Laboratories* et qu'après avoir fait cela, il avait immédiatement créé son entreprise de microélectronique, le *Shockley Semiconductors Laboratory*. Ce schéma singulier, caractérisé par le fait qu'un petit nombre de scientifiques et/ou d'ingénieurs oeuvrant à la pointe d'un domaine de haute technologie quittaient les grandes compagnies pour lesquelles ils avaient jusque là travaillé afin de monter leur propre affaire, souvent avec des moyens financiers limités, se répéta encore plusieurs fois au cours des années qui suivirent. Ainsi Robert N. Noyce et Gordon Moore, deux des huit spécialistes qui, quelques temps auparavant, avaient déjà démissionné des *Bell Labs* pour aller fonder la division *Semiconductors* de *Fairchild*, quittèrent finalement ce fabricant pour établir l'*Integrated Electronic Corporation*...

Dans une certaine mesure, ce processus s'est également produit dans le secteur de la programmation, à partir du milieu des années cinquante. Les premières start-ups produisant

des logiciels spécialisés pour le compte d'utilisateurs ou de fabricants d'équipements informatiques apparurent entre 1955 et 1959. Parmi la quarantaine d'entreprises de ce genre qui virent le jour pendant cette période, la *Computer Usage Corporation* (C.U.C.), la *Computer Science Corporation* (C.S.C.) et l'*Applied Data Research Inc.* (A.D.R.) furent certainement celles qui eurent les trajectoires les plus remarquables. Si la *Computer Usage Corporation* a cessé ses activités en 1986, suite à une banqueroute, l'*Applied Data Research Inc.*, elle, a été cédée la même année à la firme *Ameritech* pour la somme de 215 millions de dollars. Quant à la *Computer Science Corporation*, elle existe toujours. Cette société emploie à ce jour 90000 personnes, dans plus de 80 pays différents et en 2004, elle a généré un bénéfice net de 519 millions de dollars.

Ainsi que nous l'affirmions plus haut, il semble exister certaines similitudes entre la façon dont les premières start-ups de la microélectronique furent créées et celle dont ces petites entreprises entièrement dédiées à la conception de programmes « sur mesure » furent établies.

2.2.6.8. La *Computer Usage Corporation*.

Chronologiquement, la première de ces sociétés fut la *Computer Usage Corporation*. Ce sont John W. Sheldon et Elmer C. Kubie, deux mathématiciens⁸⁹ spécialisés dans la programmation d'ordinateurs, qui fondèrent cette société au cours du mois de mars 1955. Ce fait intervint après que les deux hommes aient successivement démissionné du *Technical Computing Bureau* d'I.B.M. J. W. Sheldon avait assuré la direction de ce département de 1949 à 1953, puis en était parti en 1953. Il avait alors repris ses études supérieures à la *Columbia University*. Kubie connaissait fort bien l'ancien directeur du *Technical Computing Bureau*, puisqu'il avait lui aussi travaillé dans ce département et qu'il y était demeuré jusqu'en 1954. Voyant ses ambitions d'évolution professionnelle contrariées en dépit du rôle clef qu'il avait joué dans le développement de l'I.B.M. 650 *Magnetic Drum Data Processing Machine*⁹⁰, Kubie accepta un poste de responsable en recherche opérationnel chez *General Electric*. Il ne resta en réalité que peu de temps dans cette entreprise puisqu'au tout début de l'année 1955, Sheldon prit contact avec lui afin de lui proposer de monter une société indépendante, spécialisée dans la fourniture de services informatiques. En l'occurrence, il

⁸⁹ En plus d'être mathématicien, E. C. Kubie était également titulaire d'un diplôme d'ingénieur en électricité.

⁹⁰ Avec F. Hamilton et E. S. Hughes Jr., E. C. Kubie était l'un des principaux architectes de l'I.B.M. 650, le premier ordinateur qu'I.B.M. produisit en masse et qui fut bientôt affublé du surnom de « cheval de trait de l'époque moderne ».

s'agissait ici d'écrire des programmes à la demande, pour le compte d'entreprises ou d'organisations. L'un et l'autre avaient été formés à la programmation chez I.B.M., sur les systèmes produits par le géant industriel. Ils possédaient donc un savoir précieux, qu'il leur était possible de monnayer, pourvu qu'ils sachent faire montre de quelque disposition entrepreneuriale.

Le montant du capital de départ que Sheldon réunit pour cette création s'élevait à 40000 dollars. Cet argent provenait pour une large part de fonds privés et dans une moindre mesure de prêts financiers contractés auprès d'organismes bancaires. En 1955, il est vrai que 40000 dollars représentaient une somme relativement importante. Cependant, elle était très largement inférieure à ce qu'il aurait fallu dépenser pour être en mesure d'acquérir ou même de louer durablement un ordinateur peu performant. Aussi étrange que cela puisse paraître compte tenu de la place absolument centrale qu'occupait cet instrument au sein de leur processus de production – l'ordinateur représentait en effet pour eux un outil de travail en même temps que le dispositif auquel était finalement destiné le fruit de leur labeur - le fait de ne pas posséder un système informatique, pour des sociétés comme la *Computer Usage Corporation*, ne constituait pas un réel problème. Elles avaient en effet la possibilité d'utiliser la machine de l'entreprise qui les avait embauchées pour évaluer l'avancée de leurs travaux ou quand cette solution n'était pas envisageable – pour des raisons de trop grande distance géographique par exemple – de louer du temps machine à une firme ou à une organisation équipée d'un ordinateur. Ainsi, créer une compagnie d'écriture de programmes dans les années cinquante ne nécessitait certainement pas une mise de fond importante. Quant au matériel, et pour les raisons que nous venons précisément de mentionner, il pouvait sans problème aucun se voir réduit au strict minimum, à savoir des cahiers, des crayons, et de quoi corriger les erreurs. En dehors de l'ordinateur dont, encore une fois, on pouvait jusqu'à un certain point se passer, la chose la plus essentielle ici était les programmeurs.

Lorsque la C.U.C. démarra réellement ses activités, au mois d'avril 1955, ses effectifs étaient composés de 7 personnes: les deux fondateurs de la société, quatre programmatrices, et une secrétaire. Puisque la start-up ne possédait ni ordinateur ni locaux – toutes les opérations se déroulaient en effet dans l'appartement new-yorkais de Sheldon – l'essentiel des fonds levés lors de sa création put être consacré au traitement du personnel. Ce poste de dépense n'était pas le moindre puisqu'à cette époque, le salaire annuel moyen d'un programmeur pouvait avoisiner 4000 dollars. Au moins l'avenir financier de cette société pionnière se trouvait-il assuré pendant quelques mois, ce qui laissait un répit à ses créateurs pour constituer une clientèle. Ceux-ci se présentèrent bien plus vite qu'espéré. Etant donné la nature de leurs

antécédents professionnels, Sheldon et Kubie disposaient de nombreux contacts dans les milieux de l'ingénierie et des techniques. Aussi, firent-ils immédiatement jouer ce levier pour permettre à leur entreprise de commencer ses affaires. Grâce à cet entregent, la C.U.C. se vit bientôt confier par un groupe californien le développement d'un programme visant à simuler informatiquement l'écoulement radial d'un fluide dans les conduites d'un puit de pétrole. Ce contrat qu'elle remporta ne fut que le premier d'une longue série, laquelle conduisit progressivement la jeune société à diversifier et étoffer son domaine de compétences. Cantonnée dans un premier temps à l'écriture d'applications informatiques destinées au secteur de l'ingénierie – comme des logiciels pour la fabrication de réacteurs nucléaires ou encore la conception de circuits électroniques - elle s'efforça ensuite de remporter des offres de marchés passées par une clientèle issue du champ des sciences et de celui du commerce. Dans les années qui suivirent sa création la C.U.C. travailla en effet à la réalisation d'applications bureautiques et commerciales classiques, comme par exemple des logiciels de gestion d'inventaire, de fichier de salaires ou de comptes d'assurance, ainsi qu'à la mise au point de programmes scientifiques (simulations informatiques de phénomènes physiques complexes). A la même période, elle entama aussi une collaboration productive avec des fabricants d'équipements informatiques, développant notamment pour leur compte et à la demande des *Operating Systems*, des programmes de compilation, d'assemblage et d'interprétation.

Quelles qu'aient pu être les fonctions particulières qu'ils étaient appelés à remplir individuellement, tous ces programmes possédaient une spécificité intéressante. De la même manière qu'il avait existé, après la deuxième guerre mondiale, des *one kind computers*, c'est-à-dire des prototypes d'ordinateurs absolument uniques, ces logiciels étaient des pièces de code informatique taillées sur mesure. Il s'agissait donc, pour faire écho à l'expression consacrée, de *one kind software*. En effet aucune des entreprises ou organisations auxquelles ces programmes étaient destinés n'avait le même profil qu'une autre, quant bien même plusieurs d'entre elles auraient exercé la même sorte d'activités. La taille de la société cliente, le type et la marque du matériel informatique auquel elle recourait, la manière dont le travail y était organisé, la nature et le nombre de tâches et de fonctions dont on cherchait précisément à réaliser ici l'informatisation etc., représentaient autant de paramètres que les start-ups comme la *Computer Usage Corporation* devaient impérativement prendre en compte lors du processus de conception de chacune de leurs applications. Faute de cela, jamais celles-ci n'auraient été en mesure de correspondre aux prescriptions inscrites par les commanditaires dans le cahier des charges du projet. Pour établir ici une lointaine analogie avec le monde du

textile, on pourrait dire que les petits *software contractors* apparus au cours de la seconde moitié des années cinquante étaient aux sociétés désireuses d'acquérir des programmes utilitaires ce que les tailleurs étaient (et sont encore) aux personnes qui fréquentaient (et fréquentent) leurs ateliers. Dans l'un et l'autre cas, il s'agissait d'artisans hautement spécialisés qui réalisaient des commandes uniques – quoique parfois très similaires – pour des acquéreurs ayant tout à la fois des besoins et des exigences singuliers.

Dans le remarquable ouvrage qu'il a consacré en 2003 à l'histoire de l'industrie du logiciel, l'historien américain Martin Campbell-Kelly a montré que la manière dont ces start-ups travaillaient obéissait à un schéma d'opérations caractéristique. Dans le même passage l'auteur s'est également employé à rappeler quelles aptitudes essentielles ces petites entreprises devaient impérativement posséder pour être en mesure de faire, puis de tenir leur place sur ce marché commençant, mais bientôt appelé à connaître une ascension fulgurante :

« *Le business model consciemment ou inconsciemment adopté par ces faiseurs de programmes sur commande était identique à celui suivi par les contractants en ingénierie et en construction. Ces petites firmes travaillaient ainsi en répondant à des appels d'offre et en remportant des contrats, qu'elles exécutaient ensuite sur la base d'un coût fixé [au préalable] ou bien alors en s'engageant à respecter des contraintes de temps et de matériels [fournitures] strictes. Les dispositions critiques que les entreprises contractantes en logiciel devaient avoir étaient la capacité à exploiter le phénomène d'économie d'échelle, la capacité à correctement estimer les coûts [de développement], et la capacité à gérer convenablement le déroulement des projets. Une entreprise qui réussissait dans ce secteur tirait parti de l'économie d'échelle en se spécialisant dans un sous marché particulier [...]. En se concentrant sur ces niches étroites, les firmes avaient la possibilité de réduire les coûts de production en réutilisant le code développé pour un logiciel donné, au sein d'un nouveau projet ; en travaillant régulièrement dans un domaine d'application spécifique elles se trouvaient aussi à même de développer des compétences spéciale, [...]. Les profits susceptibles d'être réalisés dans le secteur de la programmation sur commande étaient étonnamment bas, ils représentaient typiquement moins de 15% des ventes, aussi les capacités à apprécier les coûts de production et à diriger l'exécution des projets représentaient-elles ici autant de qualités déterminantes.⁹¹».*

⁹¹ In [Campbell-Kelly, 2003], p.5.

Les start-ups développant des programmes sur commande apparaissent à une époque où le logiciel était encore considéré par la plupart des acteurs majeurs de l'industrie informatique comme une composante tout à fait secondaire de leur activité principale. Même si les grands fabricants d'ordinateurs avaient par ailleurs très bien compris, depuis le milieu des années cinquante, que le fait de mettre directement ou indirectement⁹² à la disposition de leurs clients des applications et des outils informatiques représentait un argument commercial extrêmement attractif, ces derniers tendaient pour la plupart à toujours considérer le *software*⁹³ comme un produit accessoire, sans autre valeur véritable que celle que nous venons d'énoncer. La représentation qu'on s'en faisait alors était donc celle d'un bien immatériel que le constructeur fournissait « gratuitement » avec sa machine, lorsque les fonctions logiques qu'il accomplissait étaient jugées sinon indispensables (routines nécessaires au fonctionnement de l'équipement informatique), du moins suffisamment importantes et génériques pour être susceptible d'intéresser une catégorie entière d'utilisateurs (compilateurs, interpréteurs, langages de programmation évolués et adaptés au domaine des sciences ou des affaires...). Lorsque tel n'était pas le cas, c'est-à-dire quand le locataire ou l'acheteur d'un ordinateur avait besoin d'un logiciel capable de réaliser des classes d'opérations très spécifiques, celui-ci devait s'appuyer sur ses ressources propres pour le développer – autrement dit disposer d'un département spécial employant un équipe de programmeurs, ce qui au fond n'était pas chose rare - ou bien alors émettre un appel d'offre, puis sous-traiter la production de ce programme à une société contractante. Comme l'a expliqué M. Campbell-Kelly, si une demande existait bel et bien pour des logiciels sur mesure à la fin des années cinquante et au début des années soixante, les pressions sous lesquelles les petites firmes productrices de tels programmes étaient appelées à travailler étaient considérables. A la grande difficulté inhérente au travail de programmation, venaient ainsi s'ajouter d'importantes contraintes de délais, de coût de production et, bien entendu, d'obligation de résultats. Trouver puis embaucher des programmeurs à la toute fin des années cinquante n'était certes plus aussi difficile que ça avait pu l'être au cours de la première moitié de cette même

⁹² En les distribuant gratuitement avec leurs ordinateurs, ou en mettant en place des structures permettant aux utilisateurs de tel ou tel type de mainframes de se rencontrer et de partager des applications, des outils de programmation et des informations sur le codage des machines informatiques.

⁹³ Mathématicien et statisticien, Directeur du *Department of Statistics and Data Analysis* de l'Université de Princeton, John Wilder Tukey a introduit pour la première fois le mot *software* dans un article scientifique paru en janvier 1958, dans une publication mensuelle spécialisée dans le domaine des mathématiques. Le logiciel s'y trouvait défini de la manière suivante : « *Today the "software" comprising the carefully planned interpretive routines, compilers and other aspects of automative programming are at least as important to the modern electronic calculator as its "hardware" of tubes, transistors, wires, tapes, tubes and the like.* ». In John W. Tukey « The Teaching of Concrete Mathematics », *American Mathematical Monthly*, Vol. 65, N°1, janvier 1958, pp 1-9.

décennie. Cependant ce premier obstacle majeur avait beau avoir été partiellement levé, le marché pouvait bien apparaître des plus ouvert et prometteur, le développement de logiciels sur commande demeurait encore et toujours une activité exigeante qui réclamait que l'on possède, outre évidemment des compétences techniques particulièrement pointues, des dispositions au moins aussi irréprochables concernant toutes les questions touchant à la gestion d'entreprise et au management de projets.

En 1960, la *Computer Usage Corporation* de John W. Sheldon et Elmer C. Kubie était déjà forte d'une soixantaine d'employés et, après avoir établi une succursale à Washington D.C., elle ouvrit son capital au public. Sept ans plus tard, cette compagnie employait plus de 700 personnes et possédait 12 bureaux disséminés sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis. Quant à ses revenus nets, ils devaient dépasser cette même année la somme de 13 millions de dollars. Les transformations décisives qui touchèrent le secteur de l'industrie informatique durant les années soixante-dix, ajoutées à une pression concurrentielle de plus en plus intense, affectèrent cependant très fortement les activités de l'entreprise. Au point d'ailleurs que les très lourdes pertes financières qu'elle enregistra au cours de cette période de mutations profondes lui furent fatales. Société pionnière si l'en fut en matière de développement de logiciels, la C.U.C., qui avait vu le jour en 1955, cessa finalement d'exister en 1986, suite à une banqueroute.

Les entreprises de programmation sur commande créées pendant la seconde moitié des années cinquante ne connurent cependant pas toutes le sort funeste de la *Computer Usage Corporation*. Certaines, telles l'*Applied Data Research Inc.* et la *Computer Sciences Corporation*, parvinrent ainsi à surmonter les crises et les changements qui touchèrent tour à tour le secteur eurent une réussite économique exemplaire. Pour la suite de notre propos, l'évocation de l'histoire de la première de ces deux entreprises se révélera fort intéressante à plus d'un point de vue.

2.2.6.9. L'*Applied Data Research Inc.*, les *Corporate Software*

***Products*, la crise du software et « l'*unbundling decision* » d'I.B.M.**

L'*Applied Data Research Inc.* (A.D.R.) fut fondée en 1959 par un septuor⁹⁴ de programmeurs, tous anciens employés de la *Remington Rand Corporation* (puis de la *Sperry Rand Corp.*). Ces sept informaticiens spécialistes des ordinateurs UNIVAC I et II décidèrent

⁹⁴ Il s'agissait, par ordre alphabétique, de : Sherman Blumenthal, Martin Goetz, Ellwood Kauffman, Dave McFadden, Bernard Riskin, Robert Wickenden et Stephen Wright.

d'établir le siège de leur nouvelle société dans la ville de Princeton. A l'instar de la compagnie fondée quatre ans auparavant par John W. Sheldon et Elmer C. Kubie, l'A.D.R. était une firme contractante en logiciels. Elle obéissait donc aux mêmes règles que ses concurrentes, répondant à des offres de marché passées par des organismes, des entreprises ou des constructeurs informatiques, et développant ensuite pour le compte de ces diverses catégories de clients des programmes dont les modalités de développement et les caractéristiques techniques étaient contractuellement spécifiées. Parmi les grandes compagnies ayant régulièrement recours aux services de l'*Applied Data Research Inc.* figuraient bien évidemment *Sperry Rand*, mais aussi *Honeywell*, la *Radio Corporation of America* et la *Bendix Corporation*. Outre les contrats qu'elle exécutait pour le compte de ces grands constructeurs de matériels informatiques et qui portaient en général sur l'écriture de systèmes d'exploitation et d'utilitaires informatiques, l'A.D.R. travaillait aussi fréquemment pour le gouvernement américain et ses diverses agences militaires, scientifiques, ou administratives.

Mais le point le plus important à propos de l'*Applied Data Research* ne concerne pas tant ce volet de son histoire. Si cette start-up se démarquait déjà en étant, avec la *Computer Usage Corporation* et la *Computer Sciences Corporation*, l'un des premières entreprises indépendantes dans le domaine de la production d'applications informatiques sur commande, elle devait encore se différencier de l'ensemble de ses concurrentes en devenant, dès l'année 1965, la première firme à proposer à la vente un programme comme un bien informatique à part entière. A cette époque on s'en souvient, les applications informatiques considérées comme nécessaires à l'opération des systèmes et celles regardées comme des standards par leurs utilisateurs étaient la plupart du temps directement fournies à leurs clients par les constructeurs d'ordinateurs. C'était donc des « *free fee products* », autrement dit des produits « gratuits », ou plutôt libres de charges, auquel le fait de louer ou de posséder une machine donnait normalement accès. On parlait alors de « *bundle*⁹⁵ » ou de « *bundling* », c'est-à-dire grossièrement de « paquet » ou de « groupage », pour évoquer cette pratique commerciale et la façon dont *hardware* et *software* se trouvaient systématiquement et indissociablement liés l'un à l'autre dans l'offre des grands fabricants. Lorsqu'au milieu des années soixante la société *Applied Data Research* introduisit AUTOFLOW, un outil de programmation capable,

⁹⁵ La pratique commerciale du *bundling* a légalement été définie comme suit : « *Il s'agit d'offrir un certain nombre d'éléments qui, du point de vue du consommateur, sont considérés comme nécessaires et interdépendants, dans le secteur informatique, sous un seul prix, sans détailler le coût individuel de chacun des éléments composant ladite offre* ». In [Campbell-Kelly, 2003], p. 109.

entre autres choses, de générer automatiquement des *flowcharts*⁹⁶ directement à partir du code source des programmes, elle s'écarta en fait de ce qui faisait office de modèle économique standard. Elle brisa en quelque sorte la règle en vigueur dans cet environnement où, sauf cas particuliers⁹⁷, la totalité des programmes utilitaires et applicatifs employés par les usagers d'ordinateurs provenaient de l'offre groupée proposée par les constructeurs de ces mêmes machines.

La chose peut a priori paraître complètement anodine en la période actuelle puisque chacun, à titre privé ou professionnel, peut aujourd'hui acquérir n'importe quel type de programme informatique, que ce soit par le biais des canaux de distribution normaux, ou bien par celui de la commande ou du téléchargement via Internet. Mais au milieu des années soixante, une société conceptrice de programmes indépendante qui, moyennant le paiement d'une licence d'utilisation, proposait un logiciel directement à des usagers d'équipements informatiques, c'était sans précédent. Cela revenait en effet à faire des logiciels - choses certes fonctionnelles, mais purement logiques, exclusivement informationnelles⁹⁸ - des produits de consommation indépendamment monnayables, au même titre par exemple que le coûteux hardware auxquels ils étaient par définition destinés et par habitude commerciale attachés. Pourtant, et ce n'est pas là l'élément le moins ironique qui devait caractériser cette histoire au dénouement résolument spectaculaire et décisif, c'est une série de refus émanant de la part de plusieurs grands industriels de l'informatique qui conduisit, ou plutôt qui força, l'*Applied Data Research* à commercialiser elle-même son fameux software AUTOFLOW.

En 1963, la *Radio Corporation of America* prit contact avec l'A.D.R. afin de soustraire à celle-ci l'étude et le développement d'un outil d'aide à la conception de logiciels, capable de générer automatiquement des *flowcharts*. Un prototype de ce système fut présenté aux responsables de la R.C.A. l'année suivante mais ces derniers le refusèrent aux motifs qu'il était par trop rudimentaire et défectueux. L'emploi de cette application fut également jugé malcommode par ses commanditaires initiaux⁹⁹. La R.C.A. ayant rejeté le travail des

⁹⁶ Les *flowcharts* sont des représentations graphiques de processus - des organigrammes ou ordinogrammes - que les programmeurs emploient dans le cadre de leur travail, afin notamment de le documenter, et d'aider au débogage.

⁹⁷ Trois cas de figure déjà évoqués pouvaient effectivement se présenter : soit les usagers de matériels informatiques se procuraient des *softwares* via les clubs d'utilisateurs qu'organisaient à leur intention certains grands fabricants, soit ils les concevaient eux-mêmes lorsqu'ils disposaient effectivement d'un département de programmation. Lorsque ce n'était pas le cas et que leur demande était par trop spécifique pour se voir satisfaite par les moyens d'approvisionnement courants, ils faisaient appel à des développeurs indépendants.

⁹⁸ A supposer bien entendu que l'on s'accorde ici à ne pas considérer le coût du support matériel sur lequel cette information se trouve initialement enregistré comme un paramètre pertinent.

⁹⁹ Martin A. Goetz, l'un des fondateurs de l'A.D.R. fut le manager du projet AUTOFLOW. Dans « How ADR Got Into the Software Products Business and Found Itself Competing Against IBM », article qu'il a consacré en

programmeurs de l'A.D.R., les responsables de cette entreprise décidèrent de démarcher plusieurs autres constructeurs informatiques afin de leur proposer leur nouveau logiciel. La réception qui lui fut alors réservée ne fut cependant pas meilleure que celle qu'il avait déjà reçue à la *Radio Corporation of America*. Manifestement cet outil de programmation se devait de subir quelques améliorations pour pouvoir un jour être susceptible d'intéresser sérieusement un fabricant d'ordinateurs. Ironie du sort, une nouvelle fois, c'est à Mike Guzik, un jeune programmeur qui venait de quitter la R.C.A. pour rejoindre l'*Applied Data Research*, que revint cette mission. Un semestre environ fut nécessaire à M. Guzik pour faire du prototype de l'A.D.R. un logiciel non seulement expurgé de ses anciens défauts, mais aussi extrêmement performant. Les perfectionnements apportés ici par Guzik devaient évidemment concerner en tout premier lieu le processus de création des *flowcharts*. Mais le programmeur ne s'arrêta pas là. Il fit en sorte d'améliorer la lisibilité des organigrammes de processus générés et introduisit aussi une fonction de production de listings de références croisées qui devait se révéler fort utile – et très appréciée des professionnels du codage informatique – lors des phases de débogage des programmes. Il s'agissait désormais d'une application aboutie dont le développement, selon Martin A. Goetz, avait coûté entre 5000 et 10000 dollars à l'entreprise.

Malheureusement les responsables de la R.C.A. ne se montrèrent pas plus intéressés par cette évolution du logiciel original qu'ils ne l'avaient été par le prototype qu'on leur avait auparavant présenté. Décidés coûte que coûte à rentabiliser leur investissement, les dirigeants de l'*Applied Data Research* prirent la décision alors complètement inédite de démarcher des possesseurs d'ordinateurs afin de leur proposer directement d'acquérir une licence d'utilisation pour leur programme de *flowcharts*. Jamais, dans toute l'histoire de l'informatique, une telle démarche n'avait été entreprise. La cible visée par l'A.D.R. était en l'occurrence constituée par les utilisateurs d'ordinateurs R.C.A. 501, des systèmes informatiques que leur généricité et la modularité de leurs éléments périphériques destinait à une large gamme d'usagers. Des descriptifs exposant les différentes qualités et caractéristiques d'AUTOFLOW – ainsi qu'était désormais désigné ce logiciel – furent donc rédigés puis rapidement adressés à cette centaine de clients potentiels. La question se posa

1988 à l'affaire déclenchée par la commercialisation directe de ce logiciel, il a ainsi indiqué que le prototype de cette application exigeait que chaque ligne écrite en langage assembleur comporte, dans sa section réservée aux commentaires, un caractère alphanumérique spécial correspondant à un code renvoyant au type précis d'instruction traité, absolument nécessaire à la production automatique des *flowcharts*. Cet article peut être librement consulté sur le site du *Software History Center* à l'U.R.L. suivant : www.softwarehistory.org/history/Goetz1.html. Par ailleurs il aussi fait l'objet d'une publication classique sous le titre de « Memoirs of a Software Pioneer » (Martin Goetz., in *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 24, n° 1, janvier- mars 2002, pp. 43-56.).

alors à ce moment de savoir sous quelles modalités il faudrait commercialiser ce produit logiciel de façon : 1°) à le définir et donc à l'identifier et le rendre discernable en tant que tel et ; 2°) à protéger légalement les droits à la propriété intellectuelle de la firme se trouvant à l'origine de son introduction sur le marché. Le problème n'était certes pas anodin, ni trivial d'ailleurs, dans une industrie où la quasi-totalité des logiciels disponibles étaient gratuitement fournis par les constructeurs ou bien partagés – c'est-à-dire copiés - par les utilisateurs via des groupes tels que le SHARE. La solution trouvée par les hommes de loi de l'A.D.R. devait consister non pas à vendre le logiciel lui-même, mais à louer le droit de l'utiliser ce dernier pendant une durée prédéfinie et sur un nombre de machines déterminé (ce qui rendait d'emblée illégal le fait de réaliser une copie de ce programme). Au motif que les contrats de location concernant cette catégorie de choses étaient parfaitement explicites à propos des limitations des droits des tiers contractants, les dirigeants de l'A.D.R., suivant en cela les préconisations de leurs avocats, choisirent de systématiquement désigner le programme AUTOFLOW en usant à son égard du terme « équipement » dans l'ensemble de ses documents contractuels.

Ainsi, curieusement, le tout premier programme commercialisé le fut en suivant des règles et des modalités qui appartenaient au monde du hardware : on ne l'achetait pas, on détenait pour une période donnée – en l'occurrence trois années - le droit de l'utiliser, tout comme on louait pour un temps un ordinateur et l'ensemble des services dont il s'accompagnait. Ensuite, selon la volonté de ses concepteurs et puisqu'il n'existait pas encore de précédent légal en la matière, AUTOFLOW se présentait officiellement comme un *équipement informatique*, au même titre par exemple qu'un mainframe ou une imprimante. Sur la centaine de compagnies utilisatrices de R.C.A. 501 avec lesquelles les gens de l'*Applied Data Research* avaient alors pris contact, deux seulement se montrèrent assez intéressées par AUTOFLOW au point d'en acquérir des exemplaires. La période de désappointement qui succéda à cet échec commercial ne dura guère puisque assez rapidement les dirigeants de l'A.D.R., Goetz en tête, en vinrent à penser que ce n'était pas à la qualité ni à l'utilité du programme qu'il était imputable, mais plutôt au nombre beaucoup trop faible d'utilisateurs de matériel informatique auquel ce dernier avait initialement été proposé. La solution la plus immédiatement envisageable, pour parvenir à rentabiliser enfin AUTOFLOW¹⁰⁰, consistait donc à identifier une communauté d'utilisateurs d'ordinateurs qui possédât deux particularités : 1°) être composée d'un grand nombre de membres afin de

¹⁰⁰ Aux coûts de développements initiaux, qui déjà n'étaient pas négligeables, s'ajoutaient désormais tous les frais directs et indirects liés au démarchage des utilisateurs d'ordinateurs R.C.A. 501.

mathématiquement multiplier les chances de succès et 2°) être susceptible de porter un réel intérêt au programme développé par l'A.D.R.

Tandis qu'I.B.M. s'apprêtait à mettre sur le marché les premiers modèles de sa gamme de compatibles *System/360*, le choix de Goetz et de ses compagnons se porta sur le groupe des utilisateurs d'I.B.M. 1401 *Data Processing System*. Il va de soi qu'au moment où la mise sur le marché des premiers machines du *System/360* n'était désormais plus guère qu'une question de mois¹⁰¹, le « *Business Computer* » transistorisé introduit en octobre 1959 par le géant de l'informatique n'était pas l'ordinateur le plus moderne et le plus performant de la place commerciale. Cependant au regard de Goetz et des autres, il possédait une qualité remarquable : son haut degré de diffusion auprès des utilisateurs. En l'espace d'une demi-décennie, plusieurs centaines d'exemplaires de cette machine avaient en effet été placées par I.B.M. dans un nombre équivalent de sociétés et d'organisations. Performante et compétitive en dépit de sa relative ancienneté, l'I.B.M. 1401 était par conséquent une machine répandue et appréciée et il était parfaitement raisonnable et légitime que de supposer que cet état de fait perdurerait encore longtemps, nonobstant la disponibilité annoncée des ordinateurs d'entrée et moyenne gamme du *System/360*, censés la remplacer elle et d'autres processeurs de la série 1400. Le portage de l'AUTOFLOW vers l'ordinateur d'I.B.M. et son langage de programmation assembleur *Autocoder* fut donc décidé. En une dizaine de mois on reprogramma ainsi le logiciel qui avait originellement été conçu autour du R.C.A. 501 en une application parfaitement adaptée aux spécificités architecturales du modèle 1401. Caractérisé par sa simplicité et ses faibles exigences en matière de ressources système, l'*Autocoder* était un des langages de programmation les plus fréquemment employés par la communauté des utilisateurs d'I.B.M. 1401 et si au bout de quelques années de service les programmes écrits au moyen de cet assembleur ne se comptaient quasiment plus, le moins que l'on puisse dire était qu'à l'inverse, les applications de *flowcharting* compatibles avec lui étaient toujours inexistantes.

Lorsque les représentants de l'*Applied Data Research* commencèrent à présenter AUTOFLOW aux possesseurs de modèles 1401, ceux-ci, dans leur large majorité, se montrèrent vivement intéressés le principe même de cette application. Pourtant il en fut peu pour investir effectivement. Le problème à la source de cette nouvelle déconvenue commerciale était le suivant. Depuis le début, AUTOFLOW avait été construit selon un schème opératoire impliquant que chaque ligne écrite en assembleur comporte, dans sa

¹⁰¹ De fait les livraisons des trois premiers modèles de la série *System/360* (les ordinateurs d'entrée et de moyenne gamme I.B.M. 30, I.B.M. 40 et I.B.M. 50), débutèrent à partir du milieu de l'année 1965.

section normalement réservée aux commentaires des programmeurs, un caractère alphanumérique spécial correspondant à un code renvoyant au type spécifique d'opération informatique effectuée dans ladite ligne. C'était en procédant à l'exploitation de ce code alphanumérique simple qu'AUTOFLOW était capable de générer automatiquement les différentes catégories de graphiques composant les ordinogrammes. Ceci étant posé, deux cas de figure étaient alors susceptibles de se présenter : 1°) soit une application devait être écrite intégralement en assembleur et dans ce cas, il ne restait plus aux programmeurs qu'à indiquer, dans le champ de commentaires réservé à cet effet, le code de l'instruction traitée dans chaque ligne de façon à ce qu'AUTOFLOW puisse ensuite travailler ; 2°) soit alors les programmeurs travaillaient sur la base d'une application existante afin de l'adapter ou de la transformer, ce qui impliquait qu'ils renseignent¹⁰² la *totalité* des lignes de code composant ce programme *déjà écrit* pour qu'AUTOFLOW puisse le traiter.

La première situation correspondait à un cas de figure trivial et ne posait pas à proprement parler de problème : puisque ici on supposait qu'un programme devait être écrit du début jusqu'à la fin, le processus d'annotation des éléments de codage alphanumériques nécessaires au fonctionnement d'AUTOFLOW pouvait être réalisé étape par étape, en toute cohésion avec le processus de programmation, sans que cela n'occasionne en aucune façon un surcroît de travail pour les codeurs. Il n'en allait pas exactement de même de la seconde situation, à vrai dire de loin la plus courante en ces temps où les applications informatiques abondaient et où les utilisateurs d'ordinateurs étaient plus enclins à travailler sur un code source déjà existant afin de l'adapter à leurs besoins courants que de développer un nouveau logiciel en partant de rien ou presque. L'intérêt principal de cette pratique désormais très répandue résidait évidemment dans le fait qu'elle permettait de réduire notablement la quantité de travail nécessaire à l'obtention d'un nouveau logiciel, tout en limitant de manière appréciable le coût et les risques inhérents au processus de sa production¹⁰³. Dans de telles conditions, la perspective d'avoir à réviser l'intégralité du code assembleur de ces applications pour lui adjoindre, ligne par ligne, les symboles codant pour AUTOFLOW ne pouvait raisonnablement pas être accueilli de façon favorable. Tous les bénéfices qu'on aurait pu tirer ici du réemploi de codes sources disponibles auraient en effet été perdus en raison à cause de la surcharge de travail occasionnée par ce remaniement.

¹⁰² C'est-à-dire qu'ils fassent figurer dans le champ de commentaires présent dans chaque ligne du programme le code alphanumérique nécessaire au fonctionnement d'AUTOFLOW.

¹⁰³ Puisque l'essentiel de ce code avait fait l'objet d'un développement antérieur et qu'en toute logique, il avait déjà été débogué.

Pour séduire les très nombreux utilisateurs d'I.B.M. 1401, l'*Applied Data Research* devait donc une nouvelle fois apporter des modifications à son programme de *flowcharts*. L'objectif, ici, devait consister à faire en sorte que l'AUTOFLOW puisse générer immédiatement des ordinogrammes à partir de programmes déjà écrits en *Autocoder*. En d'autres termes, il fallait amender AUTOFLOW de manière à ce qu'il puisse opérer directement sur les programmes qu'on lui soumettait, sans avoir à retravailler auparavant le code assembleur de ces derniers afin de le rendre exploitable (ou compatible si l'on préfère). Les programmeurs de l'A.D.R. recoururent donc à une astuce : plutôt que d'insérer un symbole alphanumérique codant pour l'élément graphique correspondant à l'instruction à instancier dans l'ordinogramme (le *flowchart*), comme c'était le cas jusqu'à présent, on transforma AUTOFLOW afin qu'il puisse traiter automatiquement le code opérationnel (*opcode*) qui représentait déjà cette instruction au sein de ce programme. Un peu comme c'est le cas avec certaines modalités d'adressage indirect, où une cellule mémoire d'adresse donnée contient un code numérique équivalant à l'adresse d'une autre cellule mémoire où l'on pourra effectivement trouver les informations recherchées, AUTOFLOW avait été reprogrammé pour faire usage à son propre compte des *opcodes* alphanumériques correspondant aux différentes opérations disponibles dans le jeu d'instructions de l'assembleur *Autocoder*. Cela signifiait deux choses. D'abord toute application écrite en *Autocoder* pouvait désormais être traitée directement comme une entrée par AUTOFLOW. Ensuite si le code assembleur d'un programme donné venait à être modifié pour une raison ou une autre – pour optimiser sa vitesse d'opération ou lui adjoindre une nouvelle fonctionnalité par exemple – ce programme pourrait être immédiatement et simplement transmis à AUTOFLOW pour que celui-ci produise un *flowchart* ou mette éventuellement à jour un ancien ordinogramme¹⁰⁴. L'ajout de ces capacités permit cette fois de donner pleine satisfaction à la communauté des utilisateurs d'I.B.M. et en l'espace de quelques mois, le logiciel créé deux ans auparavant à la demande des responsables de la *Radio Corporation of America* s'écoula à de nombreux exemplaires.

Maintenant que la question du succès commercial d'AUTOFLOW paraissait réglée, il émergeait encore un autre problème, plus grave celui-là, puisque s'il avait connu une issue défavorable, cela aurait signifié ni plus ni moins que la perte de l'*Applied Data Research*. L'I.B.M. de la première moitié des années soixante n'était en effet plus l'I.B.M. du milieu des années cinquante, celle qui, insuffisamment sûre de ses compétences dans le domaine de la

¹⁰⁴ Dans l'hypothèse où le programme en question aurait antérieurement fait l'objet d'un traitement par le logiciel de l'A.D.R.

programmation des systèmes, avait préféré rejeter l'offre de l'armée américaine qui lui proposait, via un contrat pourtant extrêmement lucratif, d'assurer la conception des différents logiciels du *Semi Automatic Ground Environment*. Entre-temps, elle avait considérablement étoffé et diversifié ses capacités en programmation. Consciente de l'importance commerciale que revêtait de plus en plus le logiciel pour les utilisateurs et pour l'industrie informatique en général, la société de Thomas J. Watson avait fait en sorte de rattraper son retard en la matière et s'était dotée d'outils (départements de programmation) et de vecteurs (groupe SHARE) réellement performants. Le remarquable travail réalisé par I.B.M. sur le réseau SABRE et celui, nettement plus laborieux, coûteux et préoccupant, qui fut entamé à partir de 1962 dans le but de mettre au point l'OS/360 - le très ambitieux système d'exploitation destiné aux ordinateurs du *System/360* - constituaient les plus sûrs témoignages des nouvelles aptitudes du géant industriel.

Comme nous l'avons signalé en débutant cette partie consacrée aux *Software Contractors*, si les grands constructeurs d'équipements informatiques faisaient souvent appel à des firmes indépendantes afin de sous-traiter l'écriture de certaines applications, il arrivait également qu'elles développent elles-mêmes des programmes, qu'elles proposaient ensuite en *bundle*, c'est-à-dire « gratuitement », avec le matériel qu'elles louaient ou vendaient à leurs clients. L'entreprise I.B.M. ne faisait bien entendu pas exception à cette règle commune. Un logiciel de *flowcharts* justement baptisé *Flowcharter* avait été mis au point en interne par les programmeurs d'I.B.M. au début des années soixante. Celui-ci, tout comme d'autres applications à vocation utilitaire ou professionnelle, était en conséquence « offert » aux clients lorsqu'ils optaient pour les ordinateurs de la marque. Les utilisateurs des ordinateurs de la série I.B.M. 1400 (à laquelle appartenait le modèle 1401) y recouraient à défaut de disposer d'un logiciel mieux conçu et plus performant¹⁰⁵. D'emblée AUTOFLOW fut largement supérieur à *Flowcharter*. Cependant, alors que l'application de l'*Applied Data Research* ne cessait de gagner en popularité auprès des utilisateurs de systèmes 1401, la probabilité d'une réponse d'I.B.M. – sous la forme d'un logiciel aux fonctionnalités similaires voire meilleures que celles du programme de l'A.D.R. – tendait à augmenter fortement.

A supposer que cette possibilité devienne réalité - chose qui au demeurant n'était qu'une simple affaire de temps - le successeur de *Flowcharter* et équivalent d'AUTOFLOW se trouverait de facto distribué gratuitement à l'ensemble des utilisateurs d'I.B.M. 1401. Or il

¹⁰⁵ En plus de ne pas fonctionner en mode automatique, *Flowcharter* était incapable de traiter directement le code assembleur des programmes comme une entrée. Il exigeait par conséquent que le programmeur prépare un lot spécial de feuillets informatiques pour chaque nouveau programme à traiter. Ce sont ces éléments additionnels qui lui permettaient de travailler.

est évident que si I.B.M. avait pu ainsi leur fournir un produit comparable à titre gracieux, ces derniers n'auraient jamais consenti à réinvestir plusieurs milliers de dollars dans une licence AUTOFLOW à l'issue de leurs trois premières années d'utilisation. Les dirigeants de l'*Applied Data Research* prirent très vite conscience de cela, en même temps d'ailleurs qu'un certain nombre de possesseurs d'I.B.M. 1401 qui, sans la perspective de l'arrivée imminente d'une nouvelle version du *Flowcharter* auraient pu, ou plutôt auraient dû, devenir des clients de la petite entreprise de logiciels. Sur le terrain ce phénomène se traduit par des ventes manquées ou des contrats qui tardaient de plus en plus à être reconduits...

Afin de se prémunir au mieux de ce qui s'annonçait pour eux comme un désastre économique certain, Goetz et ses associés firent une chose qui n'avait encore jamais été réalisée dans le secteur de l'industrie informatique depuis que celle-ci existait. Le 24 décembre 1968 ils déposèrent ainsi auprès des autorités compétentes une demande de brevet visant leur logiciel commercial AUTOFLOW. Jusqu'à cette date précise, aucune organisation, aucune entreprise n'avait présenté une requête de cette sorte dans le but de protéger légalement un produit dont l'essence était par nature informationnelle et organisationnelle et dont la matérialité n'était jamais rien de plus qu'accidentelle et ponctuelle. Concernant le dépôt de brevets portant sur des codes informatiques il n'existait à notre connaissance qu'un seul et unique précédent historique. Il était le fait du cofondateur et dirigeant de l'*Applied Data Research*, Martin A. Goetz, qui avait déposé le 9 avril 1965 un brevet visant à protéger non pas une application informatique destinée au secteur commercial, mais un algorithme de triage¹⁰⁶. Ce brevet intitulé « *A System Sorting* » fut officiellement délivré à la date du 23 avril 1968. Huit mois seulement après que cet événement se soit produit – ou plutôt huit mois après la création de ce précédent – M. A. Goetz déposa une nouvelle demande de brevet auprès de l'*U.S. Patent and Trademark Office*, toujours au nom de l'A.D.R., cette fois-ci pour le logiciel AUTOFLOW. Une fois cette action réalisée, la société A.D.R. avisa officiellement le géant I.B.M. qu'introduire sur le marché, ainsi qu'il avait planifié de le faire, une application capable de produire des *flowcharts* automatiquement reviendrait à violer le brevet qu'elle venait de déposer. Ce fut là le commencement véritable d'une épreuve de force qui dura près de 20 ans – les litiges ne cessèrent qu'en 1983 - mais dont les retombées à court, moyen et long terme modifièrent très notablement la physionomie de l'industrie informatique à l'échelle mondiale.

¹⁰⁶ Il s'agit de l'*U.S. Patent* n° 3380029.

Après qu'I.B.M. ait introduit les premiers modèles de sa gamme *System/360*, en 1965, les dirigeants de l'*Applied Data Research* décidèrent de réitérer avec cette famille de machines déjà promises à un franc succès ce qu'ils étaient déjà parvenus à réaliser avec les ordinateurs de la classe 1401. Ils mirent donc point un AUTOFLOW compatible avec l'assembleur commun aux différents ordinateurs du *System/360*, ainsi qu'avec le FORTRAN et le COBOL, deux langages de programmation de haut niveau dont ils savaient que l'usage allait nécessairement être très répandu parmi les usagers de ces nouveaux instruments informatiques. Le lancement des ordinateurs de la gamme *System/360* et le succès considérable que ceux-ci rencontrèrent immédiatement conduisit les principaux faiseurs d'applications informatiques personnalisées à modifier au moins en partie leurs pratiques courantes de production et de vente de logiciels. Les raisons qui motivèrent ces changements étaient les suivantes. Pour la moitié d'entre eux, les nouveaux compatibles d'I.B.M. étaient des ordinateurs relativement abordables¹⁰⁷. Il convient de préciser aussi que ces systèmes possédaient des caractéristiques technologiques qui les rendaient extrêmement attractifs aux yeux des très nombreux clients d'I.B.M. Leur processeur réalisé en *Solid Logic Technology*, leur mémoire à tores de ferrite ultrarapide, et aussi le fait qu'ils opéraient sur des mots de 32 bits (4 bytes de 8 bits) en faisaient des machines performantes, voire extraordinairement performantes. Qui plus est, grâce à une capacité intégrée d'émulation du microcode d'ordinateurs I.B.M. plus anciens, il en était certaines qui disposaient de la faculté de recevoir des applications qui n'avaient pas été originellement conçues pour elles. Ainsi le modèle 360/30 pouvait par exemple exécuter des logiciels programmés pour les ordinateurs de la famille 1400 tandis que le modèle 360/65, plus puissant, était capable d'exploiter ceux du *mainframe* scientifique 7094. Cette compatibilité descendante représentait bien évidemment un argument commercial de poids que la société I.B.M. ne se priva pas de faire valoir auprès de ses très nombreux utilisateurs afin de convaincre ceux-ci de procéder au renouvellement de leurs équipements, sitôt les systèmes 360 disponibles sur le marché. En effet et pour la première fois, le fait de remplacer des ordinateurs un peu anciens par des matériels beaucoup plus modernes n'impliquait pas que les programmes couramment employés sur les premiers doivent être réécrits en partie ou dans leur intégralité pour pouvoir être utilisés sur les seconds. Pour le plus grand soulagement d'I.B.M. qui, ne manquons pas de le rappeler, jouait là ni plus ni moins que son avenir

¹⁰⁷ Cette dernière affirmation valait pour les trois premières machines de la gamme 360, à savoir les modèles 30, 40 et 50. Ceux-là étaient censés remplacer progressivement les ordinateurs commerciaux de la série 1400. Les modèles de milieu de gamme 360/65 et 360/75, introduits en novembre 1965 et janvier 1966, visaient quant à eux les utilisateurs des machines de la série 7000. Plus spécialement destinés aux marchés scientifique et militaire, les ordinateurs haut de gamme de la famille 360 (360/67, 360/91, 360/95, 360/195) étaient aussi beaucoup plus coûteux que les autres. Ils furent graduellement introduits entre 1966 et 1971.

industriel, cet argument tant pratique qu'économique porta et les ordinateurs du *System/360* connurent un succès sans précédent dès le moment où le grand constructeur commença à les proposer à la vente.

Comme nous l'affirmions plus haut, les principaux *software contractors* du pays cherchèrent immédiatement à tirer partie de cette nouvelle donne en proposant des applications capables d'exploiter pleinement les performances des nouvelles machines. De fait si les compatibles 360 pouvaient exécuter des programmes élaborés pour des systèmes commercialisés à la fin des années cinquante, leur introduction, en 1965, n'en provoqua pas moins un accroissement et un changement progressifs de la demande en logiciels dans tout le pays et au delà. La très forte diffusion des ordinateurs 360 créa ainsi pour les *software contractors* une base élargie de consommateurs dont les besoins, parce qu'ils se recoupaient peu ou prou et concernaient de nouveaux systèmes informatiques dont l'intercompatibilité n'était pas la moindre des qualités, appelaient désormais la mise au point et la distribution d'applications *standardisées*. Cette transformation de la demande donna donc naissance à une nouvelle catégorie de logiciels que l'on dénomma *Corporate Software Products*¹⁰⁸. A la différence du logiciel conçu sur mesure – lequel se voyait réalisé dans le but de satisfaire les besoins informatiques spécifiques d'un utilisateur singulier employant un ordinateur de marque et de type particuliers – le *Corporate Software Product* était un programme qui pouvait être usité par un large nombre d'utilisateurs sans qu'il soit nécessaire de lui apporter à chaque fois de quelconques modifications. D'abord parce que ceux-là employaient tel ou tel modèle de la famille de compatibles *System/360* – les logiciels convenant à une machine convenaient donc à n'importe quelle autre - et ensuite parce que les programmes en question couvraient des classes de fonctions standard, comme celles requises pour la gestion de registres de salaires, de stocks de marchandises ou encore de comptes bancaires.

De façon générale, et en conservant toujours à l'esprit le fait que nous parlons là d'une époque où les constructeurs fournissaient gratuitement des suites de logiciels à ceux qui achetaient ou louaient leurs machines, le prix des *Corporate Software Products* oscillait entre 5000 et 100000 dollars, ce qui représentait des sommes nettement inférieures à celles

¹⁰⁸ L'expression *Corporate Software Products* supporte deux traductions. On peut ainsi parler de « produits logiciels collectifs », ce qui reflète le caractère standardisé de ces applications et aussi le fait qu'ils s'adressaient à une classe entière d'utilisateurs informatiques et non plus seulement à un utilisateur en particulier (ce qui en revanche était le cas des logiciels conçus à la demande). On peut également traduire *Corporate Software Products* par « produits logiciels pour entreprises » et identifier de la sorte la principale catégorie d'utilisateurs à laquelle ces programmes étaient destinés.

habituellement demandées pour les logiciels élaborés sur mesure¹⁰⁹. Notons encore que l'apparition de cette nouvelle catégorie de programmes ne signifia pas l'arrêt de la mise au point des applications conçues à la demande, notamment pour les gros systèmes scientifiques ou militaires. Cependant, avec des volumes de vente s'élevant entre plusieurs centaines et plusieurs milliers d'exemplaires – pour ce que l'on conviendra de nommer ici les best-sellers - elle instaura les bases organisationnelles et économiques d'une véritable industrie du logiciel, prête à se transformer en industrie de masse dès lors que les conditions technologiques et sociétales nécessaires à cela seraient effectivement réunies. Pour évoquer maintenant quelques exemples remarquables de *Corporate Software Products*, on pourrait citer la version *System/360* de l'AUTOFLOW¹¹⁰, dont deux milliers d'unités furent installées entre 1967 et 1970. On pourrait également faire mention du célèbre logiciel de gestion de fichiers *Mark IV*, conçu et vendu à partir de 1967 – respectivement pour les sommes de 500000 dollars et 30000 dollars - par la firme *Informatics*. Si les ventes du *Mark IV* peinèrent à décoller – seuls 44 exemplaires en avaient été vendus à la fin de l'année 1968 – cette tendance s'inversa très rapidement au point qu'on comptait 170 installations en 1969, 300 en 1970 et environ 600 en 1973. Jusqu'en 1983, le logiciel *Mark IV* demeura le logiciel le plus vendu au monde. Ses ventes cumulées dépassaient 100 millions de dollars. Mais tout ceci advint après qu'I.B.M. ait fait officiellement part de sa décision de procéder à l'*unbundling* de ses produits.

Le fait que l'*Applied Data Research* soit en passe de devenir détentrice d'un brevet protégeant son logiciel AUTOFLOW¹¹¹ n'empêcha pas la société I.B.M. de continuer à développer - ou bien à adapter lorsqu'elle disposait déjà d'une ancienne version - les programmes qu'elle distribuait ensuite à ses clients selon son habituelle pratique commerciale du *bundle*. Parmi les différents logiciels que la société présidée par Thomas J. Watson Jr. avait justement mis à jour dans le but de permettre leur fonctionnement sur les ordinateurs compatibles du *System/360* figurait le concurrent direct d'AUTOFLOW, le *Flowcharter*. C'est cela qui conduisit finalement les dirigeants de l'A.D.R. à émettre une plainte auprès du

¹⁰⁹ Le coût de ces logiciels se chiffrait le plus souvent en centaines de milliers de dollars. Les plus onéreux atteignaient un million de dollars. N'oublions

¹¹⁰ Parallèlement, l'A.D.R. continua à développer d'autres applications « ciblées », dont les plus plébiscitées furent sans nul doute LIBRARIAN, IDEAL, ROSCOE et MetaCOBOL LIBRARIAN était un logiciel destiné à assurer la récupération et la maintenance de programmes source. Une version de ce software capable de travailler en ligne - VOLIE pour VS *Online LIBRARIAN Extended* - fut également élaborée à la même époque. I.D.E.A.L. (pour *Interactive Development Environment for an Application's Life-cycle*) était un outil d'aide au développement d'applications. R.O.S.C.O.E. (*Remote Operating System Conversational Operating Environment*) était un dispositif de programmation en ligne, doté de capacités de time sharing. Enfin, MetaCOBOL était comme sa désignation l'indique un outil d'aide à la programmation en langage COBOL.

¹¹¹ Intitulé « Automatic System for Constructing and Recording Display Charts », ce brevet enregistré à l'U.S. Patent and Trademark Office sous le numéro 3533086 fut finalement délivré le 6 octobre 1970.

département américain de la Justice, en 1967-68. A ce moment il n'était cependant pas encore question de procès. Martin A. Goetz et ses associés s'appliquèrent à dénoncer ici le comportement clairement anticoncurrentiel de la firme I.B.M. et à l'accuser dans le même temps de détenir un monopole de fait sur le marché des logiciels, à cause de la gratuité des *softwares* que le géant de l'industrie informatique, via sa constante politique de groupement des matériels et des logiciels (*bundle*), s'ingéniait à fournir gracieusement aux utilisateurs de ses équipements. Une plainte de ce genre n'était pas la première que l'U.S. *Department of Justice* enregistrât à l'encontre d'I.B.M. et à dire la complète vérité, trois compagnies de software avaient déjà entamé des poursuites judiciaires contre le tout puissant industriel, pour les mêmes raisons que celles qui avaient poussé l'*Applied Data Research* à agir. Ces trois sociétés, auxquelles vint donc s'ajouter l'A.D.R., étaient la *Programmatics Incorporated*, la *Control Data Corporation* et la *Data Processing Financial & General Corporation*.

Après avoir rencontré et écouté des représentants de ces firmes, ainsi que de nombreux autres acteurs du secteur de l'industrie informatique nord américaine, la Division Antitrust de l'U.S. *Department of Justice* établit qu'I.B.M. détenait 70% des parts de marché du secteur de l'informatique aux Etats-Unis. En dépit de son énormité, ce chiffre n'avait pourtant rien d'illégal. Mais la même division conclut aussi au fait que les pratiques commerciales d'I.B.M. allaient à l'encontre de la législation anti-monopolistique du pays. Pour la troisième fois depuis qu'elle avait été créée, le gouvernement américain attaqua donc la firme de New York en justice le 17 janvier 1969, au motif qu'elle violait la section 2 du *Sherman Anti-Trust Act*. C'est l'U.S. *District Court, Southern District* de New York qui reçut la mission d'instruire cette affaire.

Différentes charges furent effectivement retenues ici contre I.B.M. mais au rang de cet ensemble d'accusations figurait notamment celle-ci. Les autorités américaines soutenaient ainsi que la société I.B.M., après avoir planifié de l'éliminer, s'était effectivement arrangée pour étouffer la concurrence émergente¹¹². Les activités de cette dernière faisaient en effet planer une menace sur le monopole industriel du géant. Pour parvenir à ses fins, la firme de New York avait imaginé puis mis en œuvre des stratégies économiques et commerciales qui, si elles n'avaient en soi rien de véritablement illégal, n'avaient strictement rien apporté de plus à sa clientèle en termes d'amélioration des services ou des équipements. Il fut également

¹¹² On reprochait par exemple à I.B.M. d'avoir pratiqué des tarifs préférentiels injustifiés auprès de clients institutionnels (Université, Collèges), de façon à prévenir l'implantation de concurrents dans ces établissements. Des locations à perte et des mensonges avérés sur les dates de disponibilité effectives de certains matériels présentés au public comme révolutionnaires – nous parlons ici des ordinateurs du *System/360* – furent également constatés.

constaté que ces stratégies n'avaient en rien contribué à améliorer la politique tarifaire habituellement pratiquée par I.B.M. De façon plus précise, c'était bien la pratique du *bundle* qui se trouvait visée ici. En autres choses on reprochait au géant de l'informatique d'avoir sciemment gêné, voire même empêché le développement de la concurrence dans le domaine des périphériques, des programmes et des services informatiques, en ayant instauré puis maintenu une politique tarifaire unique, axée sur le groupement systématique de l'offre des biens et des services. Les ordinateurs, les programmes et les services¹¹³ faisaient en effet l'objet d'un processus de commercialisation dans lequel ils étaient considérés et vendus comme un seul et unique produit (ou paquet de produits). Plus encore, les applications distribuées en *bundle* l'étaient soi-disant gratuitement... Dans de pareilles conditions et face à un adversaire aussi formidablement puissant que l'était I.B.M., il ne subsistait aucun doute quant au fait que toute forme de concurrence était vouée sinon à disparaître immédiatement, du moins à périr longtemps entre la simple survie et le pur anéantissement économique.

L'ouverture de cette instruction ne dissuada toutefois pas la société I.B.M. de persévérer dans la voie qui lui avait pourtant valu d'être conduite devant les tribunaux. Durant le mois de février ou de mars 1969, elle commença à distribuer à ses clients un nouveau programme baptisé C.R.B.E¹¹⁴. Or cette application très ciblée concurrençait directement le logiciel R.O.S.C.O.E.¹¹⁵, que l'*Applied Data Research* avait développé et qu'elle commercialisait à présent. Parce qu'elle menaçait directement la pérennité de son activité et qu'elle ne constituait certainement que la première d'une série d'attaques à venir sur le terrain peu fréquenté des logiciels spécialisés, l'introduction du programme C.R.B.E. poussa cette fois l'A.D.R. à prendre les devants, c'est-à-dire à attaquer directement I.B.M. en justice pour cause de détention de monopole dans le secteur de la production des applications informatiques. Pour comprendre les raisons de ce « mouvement offensif », il suffit de rappeler que les firmes indépendantes qui concevaient des logiciels dans les années 60 orientaient fréquemment leur politique de recherche et de développement sur des axes assez peu compétitifs. En tout cas cherchaient-elles à suffisamment se spécialiser et se différencier pour ne pas avoir à subir de plein fouet la concurrence des compagnies informatiques les plus puissantes lesquelles, lorsqu'elles ne leur confiaient pas la sous-traitance des applications les plus nécessaires et/ou les plus usitées, faisaient en sorte de les développer elles-mêmes. Le

¹¹³ Sous le terme générique de « services » il fallait entendre : l'ensemble des prestations liées à l'ingénierie des systèmes informatiques (installation, mise en route, etc.), la formation des personnels ainsi que la maintenance et la réparation sur site.

¹¹⁴ Pour *Conversational Remote Batch Entry*.

¹¹⁵ Pour *Remote Operating System Conversational Operating Environment*.

fait qu'à un moment donné I.B.M. propose à ses clients un logiciel tel que le C.R.B.E. en *bundle* ne pouvait être interprété par les gens de l'A.D.R. que comme une manifestation explicite de la volonté de ses dirigeants d'investir peu à peu ces petites niches économiques afin de réduire au silence ceux qui jusqu'ici les occupaient discrètement.

Déposée au cours du mois d'avril 1969, la plainte de l'*Applied Data Research* vint s'ajouter à l'épais dossier qui avait déjà été constitué devant les autorités judiciaires pour dénoncer et de tenter de mettre un terme aux pratiques monopolistiques d'I.B.M. Le procès qui opposa l'*Applied Data Research* à l'*International Business Machines Corporation* s'acheva finalement en août 1970, la partie plaignante recevant une somme de 2 millions de dollars à titre de dédommagement pour le préjudice économique qu'elle avait subi. Du point de vue de l'histoire de l'informatique, la chose la plus remarquable et la plus significative ici n'est bien entendu pas constituée par les détails de la bataille légale qui opposa (victorieusement) David à Goliath. Non. Ce qui est véritablement digne d'attention dans ce cas, c'est le tournant absolument radical qu'I.B.M. amorça en matière de politique commerciale au moment précis où ces événements se déroulèrent. Notre phrase est ainsi tournée car jamais la société I.B.M. ne reconnut officiellement l'existence d'un quelconque lien de cause à effet entre les différents procès pour pratiques antitrust auxquels elle dut faire face à la toute fin de la décennie soixante, et la décision assurément historique qu'elle prit – ou que la tournure négative des événements la contraignirent à prendre - à la même période. La stratégie de défense adoptée par ses représentants légaux consista toujours à présenter des arguments visant à dégager la responsabilité de la firme, eut égard aux faits qui lui étaient reprochés devant la loi. Parmi les différentes choses souvent entendues figurait notamment l'explication selon laquelle la ligne de conduite commerciale suivie par I.B.M. dans les années 50 et 60 avait en fait été dictée par la nécessité économique et la configuration du marché concerné. Et les défenseurs du géant industriel de mettre alors en avant l'obligation dans laquelle celui-ci s'était trouvé d'agir ainsi, c'est-à-dire d'adopter les modes opératoires qui se trouvaient aujourd'hui incriminés, afin de faire face au mieux aux grandes incertitudes qui caractérisaient le marché des équipements informatiques à ses débuts. Ses avocats devaient en outre ajouter qu'un des paramètres les plus incertains concernant ce nouveau secteur était représenté par le coût d'exploitation des ordinateurs. Coût d'exploitation dont une des parts – celle concernant la composante logicielle – était (soi-disant) encore plus mal connue que le reste... De là les avocats d'I.B.M. devaient évidemment conclure au fait qu'en instaurant la pratique du *bundle*, autrement dit en procédant au regroupement systématique dans son offre commerciale des équipements, des applications et des services informatiques,

la grande entreprise s'était d'abord et avant tout efforcée d'apporter une stabilité là où il n'y en avait que très peu ou pas du tout. Selon la défense, le *bundle* n'était donc en rien un dispositif destiné à consolider davantage encore le prodigieux empire d'I.B.M. tout en rendant peu à peu la concurrence exsangue... C'était en quelque sorte un outil commercial que l'on avait conçu et employé dans le but de conférer à un secteur économique naissant un socle solide sur lequel il puisse ensuite se développer et monter en puissance...

Au moment précis où les grandes lignes de sa politique marchande se trouvaient mises en cause devant les tribunaux, I.B.M. annonça donc officiellement sa décision de commercialiser et de facturer bientôt les matériels et les services informatiques, ainsi que les logiciels, de façon tout à fait indépendante. Une première déclaration faisant état de ce changement de cap imminent mais néanmoins historique fut faite par les représentants d'I.B.M. le 6 décembre 1968. Elle fut ensuite confirmée et expliquée publiquement dans le courant du mois de juin 1969. Un plan spécifiant les détails du découplage des matériels, des applications et des services informatiques put ainsi être présenté à cette occasion. La mise en application effective de cette « *unbundling decision* » - comme il est généralement coutume de désigner le mouvement opéré ici par I.B.M. - n'intervint quant à elle qu'au mois de janvier 1970.

Il ne nous appartient pas ici de tenter d'apporter une réponse aux questions suivantes : « l'*unbundling decision* » fut-elle oui ou non provoquée par l'énorme pression juridique qui pesait sur I.B.M. dans les années 1967-69 ? Le changement réalisé ici par le géant industriel représentait-il une avancée par lui librement et magnanimement consentie – ce qu'il s'efforçait de faire accepter - ou bien s'agissait-il au contraire d'un repli stratégique rapide et forcé refusant de se reconnaître comme tel pour des motifs légaux, commerciaux et économiques ? Bien qu'I.B.M. se soit toujours défendu du contraire, nombreux furent les observateurs qui se laissèrent cependant aller à conjecturer que le bénéfice premier et immédiat que le constructeur américain escomptait tirer ici de l'annonce de son changement de politique commerciale était l'abandon des poursuites engagées contre lui par le Gouvernement et certaines entreprises concurrentes. Dans l'ouvrage remarquable qu'il a consacré en 2003 à l'histoire de l'industrie du logiciel, M. Campbell-Kelly a produit deux passages de déclarations – le premier extrait du témoignage de Thomas J Watson Jr., la seconde des conclusions des avocats d'I.B.M. – qui donnent un assez bon aperçu de la ligne de conduite officielle adoptée par l'industriel au moment de l'instruction. Evoquant la situation à la fin des années 60, le *Chief Executive Officer* d'I.B.M. déclarait ainsi :

« Nous avons quelques clients extrêmement capables à cette époque, Lockheed, Boeing et quelques autres, qui pensaient qu'ils étaient meilleurs que nous dans la réalisation de certains des services que nous leur fournissions. Ils trouvaient onéreux d'avoir à payer pour ces services alors qu'ils pensaient être en mesure de faire mieux par leurs propres moyens¹¹⁶ ».

Quant aux avocats d'I.B.M., ils affirmaient la chose suivante:

« Il était naturel pour I.B.M. d'envisager l'unbundling à la fin des années soixante mais ça ne l'était pas auparavant. L'annonce, le 6 décembre 1968, de sa décision de procéder à ce dégroupage eut lieu avant que la plainte du gouvernement ne soit enregistrée dans les premiers mois de l'année 1969, mais, tout comme les études [portant sur la définition et la mise en œuvre de la nouvelle politique] d'unbundling l'avaient précédée, elle ne fut faite que quelque temps après les débuts de l'investigation de la Division Antitrust. Aucune preuve, dans les actes du procès ne suggère que les deux évènements [i.e. l'unbundling decision et le caractère imminent du procès] étaient liés¹¹⁷ ».

En 1955, le nombre total d'ordinateurs en service sur le territoire des Etats-Unis était de 240¹¹⁸ (246 pour le monde entier). L'industrie informatique amorçait sa montée en puissance, ses tendances et ses ressorts généraux étaient fort mal connus, aussi, compte tenu de ce contexte, des nouveautés et des incertitudes dont il pouvait être porteur, l'argument avancé ici par les défenseurs d'I.B.M. pouvait être jugé recevable. Cependant à la fin des années soixante, la situation avait considérablement évolué. Ainsi de 1965 à 1969, le nombre d'ordinateurs utilisés aux Etats-Unis fit plus que doubler, passant de 21600 unités à 46000¹¹⁹ (de 29600 à 72000 pour le monde entier et la même période de 4 ans). Si les mécanismes de l'économie du logiciel étaient encore relativement mal connus et mal documentés, force était néanmoins faite de constater qu'il s'agissait là d'un domaine d'activité désormais tout à fait viable. Quant à l'industrie informatique, celle-ci n'avait plus rien d'un secteur économique en phase embryonnaire. Les utilisateurs d'ordinateurs – les programmeurs en particuliers -

¹¹⁶ In Franklin M. Fisher, James W. McKie, et Richard B. Mancke, *IBM and the US Data Processing Industry: An Economic History*, New York, Praeger, 1983, p. 176. Citation reproduite in [Campbell-Kelly, 2003], p. 110.

¹¹⁷ Ibid., p. 177. Citation reproduite in [Campbell-Kelly, 2003], p. 110.

¹¹⁸ In Montgomery Phister Jr., *Data Processing: Technology and Economics*, Digital Press and Santa Monica Publishing Company, Santa Monica, Cal., 1979, Table II.1.26, p. 277

¹¹⁹ Ibid.

étaient de plus en plus nombreux et compétents et ils disposaient en outre d'outils performants qui leur permettaient d'assurer eux-mêmes le développement de certains de leurs programmes. Au regard de ces éléments, le raisonnement selon lequel il n'était pas « naturel », pour I.B.M., de mettre un terme à sa politique d'offre groupée avant la fin des années soixante nous semble être assez difficilement tenable...

Un autre argument défensif invoqué par les responsables d'I.B.M. pour justifier la soudaine décision d'*unbundling* avait trait à la part de plus en plus prépondérante que le poste logiciel occupait dans le budget global de recherche et de développement de la société. Au début des années soixante, ce poste représentait environ un vingtième de la totalité du budget R&D. A la fin de la même décennie cette quotité était passée à un tiers ! Ce serait à tort toutefois qu'on attribuerait cette augmentation on ne peut plus conséquente à un effort qu'aurait soudainement consenti à réaliser l'industriel de New York, dans le sens d'une diversification et d'une amélioration de la qualité des logiciels qu'il livrait « gratuitement » avec ses ordinateurs. Les logiciels fournis en *bundle* avec les machines d'I.B.M., ce sont là des choses parfaitement connues, n'étaient en effet réputés ni pour leur sophistication ni pour leur fiabilité. Et ce qui était vrai en 1960 le demeura jusque dans les années 1969-70. L'apparition et la montée en puissance lente mais irrésistible de petites firmes indépendantes travaillant d'abord comme *software contractors*, puis commercialisant directement auprès des utilisateurs d'ordinateurs des logiciels payants mais particulièrement aboutis – on songera ici en tout premier lieu à l'*Applied Data Research* et son générateur de flowcharts AUTOFLOW ou bien encore à *Informatics* et son programme de gestion de fichiers *Mark IV* – ne fut pas non plus l'élément moteur qui poussa I.B.M. à allouer de plus en plus de ressources humaines et financières au développement d'applications. La raison véritable de cet impressionnant accroissement fut en fait la très importante crise que connut le secteur du logiciel dans les années soixante.

Au début de la décennie soixante des systèmes informatiques abordables, équipés de processeurs extrêmement performants et de mémoires conjuguant rapidité et grande capacité, commencèrent à être commercialisés sur le marché civil par les constructeurs de matériels informatiques. Entre 1960 et 1965, c'est-à-dire l'année qui vit effectivement l'introduction des premiers ordinateurs de la gamme I.B.M. *System/360*, le niveau de performances qu'étaient capables d'atteindre les machines fut ainsi multiplié par cent. Pendant ce temps, leur coût ne cessa jamais de diminuer. Le problème central, ici, résidait dans le fait que l'aptitude des programmeurs à développer des logiciels capables de tirer partie de ces formidables progrès était bien loin d'égaliser le rythme de croissance frénétique que

connaissaient les performances des équipements. C'est donc de ce différentiel existant entre augmentation continue des capacités de traitement et de stockage des ordinateurs et relative stagnation de l'évolution des technologies de programmation que naquit cette crise du logiciel. De fait si certaines applications ne nécessitaient l'écriture que de quelques milliers de lignes de code, d'autres programmes, plus perfectionnés, exigeaient quant à eux l'écriture de dizaines de milliers de lignes de code¹²⁰. Pour les projets les plus ambitieux – qui souvent étaient aussi les plus cruciaux et les plus risqués – il pouvait même s'agir d'un million de lignes. Plus le nombre de lignes de code augmentait, plus le logiciel était complexe, et plus le risque de voir apparaître des problèmes importants, voire insolubles, s'aggravait.

En matière de catastrophes logicielles survenues au cours des années soixante, l'exemple de loin le plus connu est bien évidemment celui de l'OS/360. L'OS 360 – pour *Operating System 360* – était le système d'exploitation qu'I.B.M. destinait aux ordinateurs de sa gamme 360. En 1962 les planificateurs du géant de l'informatique évaluèrent que le coût de son développement atteindrait sans doute 125 millions de dollars. Quant à la durée nécessaire à sa programmation, ils l'estimèrent à trois années. L'avenir devait comme on le sait apporter un démenti cinglant à ces deux prévisions que le confort de la rétrospection et les exemplaires leçons tirées du passé nous autorisent peut-être un peu légèrement à qualifier de déraisonnablement optimistes. Un des principaux artisans du projet OS/360 était Frederick P. Brooks Jr. Ce titulaire d'un doctorat en sciences informatiques, ancien étudiant d'Howard Aiken à Harvard, avait rejoint I.B.M. en 1956 et participé, entre autres choses particulièrement remarquables, à la conception du superordinateur *Stretch* (ou I.B.M. 7030) et d'une version spéciale de cette machine singulièrement puissante, l'*Harvest* ou I.B.M. 7950, que la *National Security Agency*¹²¹ son commanditaire, réceptionna au mois de février 1962. F. P. Brooks joua également un rôle de tout premier plan dans la mise au point des ordinateurs du *System/360* puisqu'aux côtés des Dr. Gene Amdahl et Gerrit Blaauw, les deux scientifiques placés en charge de la conception de l'architecture de ces machines, il assumait la fonction de chef de projet. Son expérience catastrophique avec l'OS 360 est assurément une des choses qui, à la fin des années soixante, poussa Brooks à se faire l'un des plus fervents défenseurs et promoteurs de l'idée de la nécessité de la constitution d'une véritable ingénierie du logiciel. Qu'est-ce donc alors qui causa tellement de problèmes aux développeurs de l'OS 360 ? La

¹²⁰ C'était par exemple le cas des systèmes d'exploitation des ordinateurs introduits durant la seconde moitié des années cinquante.

¹²¹ L'*Harvest* était un *Stretch* spécialement optimisé pour le traitement des opérations de cryptanalyse conduites par la N.S.A. Pour s'acquitter de cette tâche, on l'équipa notamment d'éléments périphériques spéciaux. Il doit encore être précisé que l'*Harvest* ne pouvait pas opérer de façon indépendante (en raison notamment de son jeu d'instructions limité). Il était donc couplé en permanence au *Stretch* que possédait aussi la N.S.A.

programmation de ce système d'exploitation représentait de très loin le plus ambitieux chantier logiciel jamais entrepris dans le monde entier. En termes de vastitude et de ressources allouées, il surclassait tout ce qui avait pu être fait auparavant, y compris tous les travaux de programmation relatifs au S.A.G.E. Conçu en trois versions intégrant un nombre croissant de fonctionnalités, l'OS 360 était un système d'exploitation, ou plutôt une famille de systèmes d'exploitation¹²², pluri-modulaires. Le nombre et la complexité des fonctionnalités devant être prises en charge par l'OS 360, ajoutés au fait qu'en permanence, celui-ci était appelé à exécuter, suspendre, reprendre ou interrompre – bref contrôler – d'innombrables composants logiciels opérant de façon séquentielle et/ou concurrente, constituaient ici le cœur réel du problème. La programmation de ces multiples modules logiciels et, surtout, celle des instances de contrôle et d'intégration leur permettant de travailler de concert représenta un casse-tête informatique absolument sans précédent. Au total ce sont ainsi plus d'un million de lignes de code que les programmeurs travaillant à la composition de l'OS 360 durent écrire, avant, souvent, d'avoir à en déboguer un grand nombre. A l'origine et puisque jusque-là aucun chantier de programmation visant à mettre au point un logiciel aussi gros et complexe que promettait de l'être l'OS 360 n'avait encore été entamé, Brooks et les autres responsables du projet pensèrent que la façon la plus simple et la plus efficace de faire face à la tâche à accomplir consisterait à augmenter de façon conséquente les effectifs des programmeurs. Loin de tenir ses promesses, cette idée a priori aussi bonne qu'elle pouvait être élémentaire se révéla en réalité désastreuse dès lors qu'on la mit en application. Ce que, faute de disposer d'une expérience antécédente en la matière, on ne savait pas encore, c'était que les gros programmes informatiques tels que l'OS 360 n'étaient pas d'immenses constructions faites d'éléments structurels simples et identiques entre eux. Pour donner une idée claire du problème qui se posait ici aux concepteurs de l'OS 360, on pourra convoquer une analogie par ailleurs souvent employée afin d'illustrer ce cas, et ressortissant à la sphère de la construction des biens immobiliers.

Chacun conviendra sans peine qu'il est aisé, pourvu que le dessin d'un bâtiment à ériger soit relativement simple et que ses matériaux de base soient élémentaires et peu hétérogènes sur les plans matériel et géométrique, de réduire de manière appréciable le temps

¹²² Sous l'appellation d'OS 360, on désignait en fait trois systèmes d'exploitation ou programmes de contrôle. Le plus simple d'entre eux était le *Primary Control Program*. Le P.C.P. traitait les tâches de façon séquentielle. Le second, plus élaboré, fut appelé M.F.T. (pour *Multiprogramming with a Fixed number of Tasks*). Comme son nom l'indique cet OS autorisait la prise en charge d'un nombre *fixe* de tâches informatiques concurrentes. Enfin venait le M.V.T. (pour *Multiprogramming with a Variable number of Tasks*), qui lui autorisait le traitement simultané d'un nombre *variable* de tâches, ce qui supposait l'intégration d'une capacité à distribuer et redistribuer l'espace mémoire de manière dynamique.

nécessaire à sa construction en accroissant le nombre d'ouvriers qui lui sont affectés. Ceci ne paraît pas devoir être remis en cause. Or ce qui vaut ici de façon tellement évidente quant on parle de la construction d'une maison ou d'un bâtiment - c'est-à-dire de structures simples - ne s'applique absolument plus dès lors qu'il est question de programmes informatiques complexes. Ceux-là sont en effet composés d'une multitude de modules logiques possédant des fonctions et des tailles différentes, qui, lorsqu'ils se trouvent tour à tour chargés en mémoire pour y remplir leur office, sont appelés sinon à interagir dynamiquement les uns avec les autres, du moins à coexister pour une période de temps donnée au sein du même espace de stockage. Dès lors on voit bien que les faits de programmer autant de briques élémentaires aux tailles et aux fonctions hétérogènes, puis de créer une instance logicielle capable d'en superviser les mouvements – c'est-à-dire un programme de contrôle apte à orchestrer cet incessant ballet de processus en tenant toujours compte de la nécessité de gérer de manière optimales les zones de mémoire allouées et allouables en prévenant ou en résolvant les éventuels conflits logiciels – n'ont au fond que très peu de choses en commun avec celui consistant à élever un bâtiment. D'où il ressort que ce qui permettra de gagner un temps précieux d'un côté - à savoir augmenter le nombre d'ouvriers affectés au chantier de construction pour en hâter l'achèvement – ne sera strictement d'aucune aide dans l'autre. En fait cela engendrera des effets totalement contraires à celui attendu¹²³...

Et parmi tous les cas de figure qui pouvaient être envisagés dans le cas du développement de l'OS 360, c'est sans nul doute un des plus critiques qui advint effectivement. Alors que le projet accusait un retard de plus en plus marqué – au point que des OS « simplifiés » durent être réalisés pour permettre la commercialisation des ordinateurs du *System/360* dans les délais officiellement annoncés par le constructeur – le nombre de programmeurs affectés à son chevet ne cessa de croître. En 1966, un peu plus d'un millier d'employés d'I.B.M. travaillaient ainsi à la finalisation de l'ambitieux système d'exploitation des nouveaux ordinateurs de la marque. Or comme les analyses de Brooks¹²⁴ devaient le révéler plus tard, loin de permettre une résolution rapide des problèmes rencontrés, cette

¹²³ Ce phénomène est connu sous le nom de (pseudo) loi de Brooks, laquelle déclare en substance que « le fait d'ajouter des gens à un projet logiciel déjà en retard tend à le retarder encore davantage ».

¹²⁴ En 1975 Frederick P. Brooks Jr. a rédigé un ouvrage célèbre (réédité en août 1995 chez Addison-Wesley) dans lequel il a exposé ses réflexions concernant les problèmes spécifiquement attachés au développement des logiciels complexes, en se basant sur l'expérience qu'il avait acquise au cours du processus de programmation de l'OS 360. Intitulé *The Mythical Man-Month: Essays on Software Engineering*, cet ouvrage revient sur certains des événements ayant conduit à l'apparition d'une véritable ingénierie logicielle. Il n'est pas inintéressant de noter que sur la couverture de ce livre figure une gravure représentant trois dinosaures en train de patauger dans une sorte de marécage : l'allusion à la situation dans laquelle se trouvaient les équipes d'I.B.M. travaillant au développement de l'OS 360 est patente et on ne peut plus explicite.

augmentation des personnels ne fit en définitive que ralentir davantage encore un processus qui se trouvait déjà lourdement grevé par de très nombreuses difficultés d'ordre technique. Quant, après plus d'une année de retard, l'OS 360 fut enfin livré avec toute sa documentation aux utilisateurs de systèmes I.B.M. 360, il était encore très loin de posséder la stabilité qu'on était en droit d'attendre de lui. En vérité la correction des erreurs dont il était littéralement truffé réclama aux équipes d'I.B.M. et à ses usagers des années de travail. La chose ne fit bien entendu qu'ajouter au passif de l'OS 360, lequel se trouvait déjà être passablement catastrophique.

Après le programme astronautique Apollo, le *System/360* représente le deuxième projet technologique le plus coûteux entrepris au cours des années soixante. La mise au point de cette famille d'ordinateurs compatibles intégrant les technologies matérielles et logicielles les plus perfectionnées de l'époque engloutit en effet la somme incroyablement élevée de 5 milliards de dollars¹²⁵. A eux seuls et pour les raisons que nous venons de nous employer à analyser, le développement de l'OS 360 et des autres programmes nécessaires à l'opération des différents ordinateurs du *System/360* coûtèrent au constructeur américain quelques 500 millions de dollars. Outre le fait que cela représentait un dixième du coût total de l'opération, cette dépense était aussi quatre fois plus importante que ce qui avait été prévu en 1962 par les experts de l'industriel... A la lumière de ces éléments complémentaires on saisit peut-être beaucoup mieux pourquoi la part du budget total de R&D consacré par la société I.B.M. à la création et à l'évolution de ses programmes informatiques passa d'un vingtième à un tiers en à peine moins d'une dizaine d'années. Ainsi que nous avons déjà eu l'occasion de l'affirmer lorsque nous avons commencé à évoquer la crise qui frappa le secteur du logiciel au cours de la décennie soixante, l'essentiel des sommes allouées ici ne passa pas dans des recherches destinées à diversifier et/ou à perfectionner les applications qu'I.B.M. avait coutume de fournir en *bundle* à ses clients. Alors même que l'écart existant entre les performances des machines et les capacités des hommes à les programmer de façon réellement optimale ne cessait de s'agrandir, ces sommes d'argent formidables se virent pour leur très grande majorité investies dans le développement de programmes complexes – *i.e.* l'OS 360 et ses logiciels satellites - dont par la force des choses on avait grandement sous-estimé à quel point leur mise au point serait longue et littéralement truffée d'embûches. Alors certes, ce facteur ne fut peut-être pas complètement étranger à la décision que prit (soudainement) la direction d'I.B.M. de procéder au découplage de ses matériels et de ses logiciels, en 1968-69.

¹²⁵ En dollars de 1964, ce qui équivaudrait à quelques 28 milliards de dollars si l'on prenait pour base l'année 2004.

Cependant eut égard à la manière dont les choses furent publiquement présentées, eut égard aussi au fait que tout cela se produisit au moment précis où le nombre de procès pour monopole et concurrence déloyale engagés contre la firme de New York tendait à augmenter, eut égard encore au fait que, pendant toute la période dont il est question ici, les programmes fournis en *bundle* par l'industriel ne parvinrent certainement pas aux niveaux d'efficacité et de fiabilité que les sommes faramineuses consacrées à la recherche et au développement des logiciels auraient normalement dû leur permettre d'atteindre, on est en droit de penser qu'I.B.M. instrumentalisa le choc frontal que la crise du logiciel – via l'OS 360 et sa mise au point toute autant dispendieuse que calamiteuse - lui fit subir dans le but de justifier honorablement sa décision d'*unbundling*. Quant à la crise du logiciel, il fallu attendre la tenue des conférences de Garmisch, du 7 au 11 octobre 1968, et de Rome, du 27 au 31 octobre 1969, pour voir s'amorcer une réflexion concertée et structurée sur les problèmes qui se trouvaient à son origine ainsi que sur les solutions qui pourraient être envisagées afin de les résoudre. Ces deux évènements, l'un et l'autre organisés sous l'égide du N.A.T.O. *Science Committee*, furent respectivement intitulés *Software Engineering*¹²⁶ et *Software Engineering Techniques*¹²⁷. C'était là la manifestation la plus patente et la plus affirmée de la volonté émanant de toute une profession, de toute une industrie inscrite alors en pleine phase d'ascension, de transformer ce qu'il faut bien appeler son art en une discipline scientifique, avec son corpus théorique constitué et ses méthodologies propres. Une véritable ingénierie logicielle commença à se dégager de la somme de réflexions qui furent conduites ici. On présenta ainsi des outils et des processus de travail aboutis dont un, la méthodologie structurée, avait pour particularité de privilégier une approche rationalisée et descendante (top down design) de la conception des programmes. Véritable paradigme programmatique, celle-ci influença nombre des développements qui furent ultérieurement réalisés dans le champ de la production des applications informatiques. Par l'entremise de techniques de programmation structurée spécialement élaborées, on étendit ensuite son principe aux langages informatiques de haut niveau existants, comme le FORTRAN. Bientôt des langages informatiques écrits ou modifiés pour tirer pleinement partie des avantages offerts par la programmation structurée firent leur apparition. Le premier d'entre eux, imaginé afin de l'enseigner aux étudiants, fut le

¹²⁶ P. Naur et B. Randell, (éditeurs), *Software Engineering: Report of a conference sponsored by the NATO Science Committee*, Garmisch, Allemagne, 7-11 Oct. 1968, Bruxelles, *Scientific Affairs Division*, NATO (1969). Ce document est librement téléchargeable au format PDF et dans son intégralité à l'U.R.L. suivant : <http://homepages.cs.ncl.ac.uk/brian.randell/NATO/>.

¹²⁷ B. Randell et J.N. Buxton, (éditeurs). *Software Engineering Techniques: Report of a conference sponsored by the NATO Science Committee*, Rome, Italie, 27-31 Oct. 1969, Bruxelles, *Scientific Affairs Division*, NATO (1970). Ce document peut être téléchargé au format PDF : <http://homepages.cs.ncl.ac.uk/brian.randell/NATO/>.

Pascal¹²⁸. Un autre de ces langages est l'Ada¹²⁹, dont les plus récentes évolutions sont à ce jour encore employées par l'armée américaine (entre autres utilisateurs de premier plan).

Quoi qu'il en soit, une commission spéciale forte d'une centaine de membres fut constituée par I.B.M. afin d'étudier et de préciser les meilleures modalités possibles pour mettre en œuvre la stratégie de dégroupement qui avait été décidée, sachant que la détermination de cette nouvelle politique puis son application ne pouvaient être envisagées que dans le cadre strictement défini par deux contraintes à la fois indépassables et antinomiques: 1°) parvenir à conférer une image positive à la nouvelle politique d'*unbundling* dans le contexte très difficile des procès antitrust à venir et 2°) réussir à limiter au maximum les pertes de bénéfices que ce changement d'orientation inévitable allait forcément engendrer. Après avoir procédé à la distinction de deux classes majeures de programmes, les applications d'une part et les *Operating Systems*, les utilitaires et les outils de programmation de l'autre¹³⁰, décision fut prise de ne commercialiser à part des équipements informatiques que les *softwares* appartenant à la première de ces deux catégories.

Si les méthodes mises en places par I.B.M. depuis les commencements de l'informatique commerciale avaient contribué à renforcer le monopole que cette compagnie détenait depuis plusieurs décennies maintenant sur le marché mondial des équipements de traitement de l'information, sa décision de procéder au découplage des composants de son offre – ou pour être plus précis d'une partie seulement de ces composants – entraîna des conséquences plus que remarquables pour le marché naissant et grandissant (mais fort malheureusement contrarié jusqu'à ce point) du logiciel. On peut affirmer ici sans crainte de se montrer excessif que l'*unbundling decision* d'I.B.M. libéra littéralement le marché du logiciel à la fin des années soixante. Qu'à un moment donné la réorientation de la stratégie marchande d'un seul ait pu déterminer à tel point l'évolution d'un sous secteur entier de l'industrie informatique – en l'occurrence celui du software - constitue en soi une preuve du fait que cette stratégie, lorsqu'elle était effectivement appliquée, maintenait sous bride ce sous-secteur au plus grand bénéfice de son initiateur et maître d'oeuvre...

¹²⁸ Le Pascal fut développé en 1970 par le suisse Niklaus E. Wirth, Professeur d'informatique à l'*Eidgenössische Technische Hochschule* de Zurich. Le nom de ce langage informatique de type impératif et inspiré de l'ALGOL a bien entendu été choisi afin de rendre hommage au mathématicien français.

¹²⁹ Les différents corps d'armées américains utilisant à l'époque quelques 500 langages de programmation différents, le Département de la Défense américain (DoD) lança en 1974 une étude de faisabilité pour un langage unique, alliant polyvalence et puissance computationnelle. Après plusieurs années de travail, les équipes en charge du développement de ce langage commandé par les militaires mirent au point l'Ada. Ce nom fut choisi en hommage à la Comtesse Augusta Ada Lovelace.

¹³⁰ Selon la terminologie adoptée par cette commission spéciale, il s'agissait respectivement des programmes de *Type II* (applications) et de *Type I* (O.S., utilitaires, outils de programmation).

On peut ainsi dire qu'avec l'invention du transistor, des mémoires à tores de ferrite, des langages de programmation de haut niveau et de la puce électronique, l'*unbundling decision* qu'I.B.M. prit à la fin de l'année 1969 représente un des moments les plus décisifs de toute l'histoire de l'informatique. Quelques chiffres que nous nous apprêtons à produire incessamment suffisent à illustrer de façon on ne peut plus patente les répercussions positives qu'elle entraîna en des délais très brefs pour l'industrie du logiciel dans son ensemble.

Société	Revenus en millions de dollars.			Part de revenus activité software
	1968	1969	1970	
Applied Data Research	4200000 \$	6200000 \$	7200000 \$	100%
Computer Sciences Corporation	80000000 \$	109000000 \$	114000000 \$	90%
Informatics Incorporated	11500000 \$	16500000 \$	18400000 \$	74%
Planning Research Corporation	23000000 \$	57000000 \$	65000000 \$	88%
Programming Methods Incorporated	2300000 \$	4300000 \$	6700000 \$	80%
System Development Corporation	53400000 \$	60800000 \$	55600000 \$	94 %

C'est évidemment une moindre chose que de reconnaître le rôle essentiel de catalyseur que le changement de politique commerciale amorcé en 1969-70 par I.B.M. joua, relativement à la croissance extraordinaire enregistrée à ce moment par cette industrie. Dans le tableau¹³¹ présenté ci-dessus, nous avons fait figurer les revenus, pour les années 1968, 1969 et 1970, de quelques-uns des principaux *software contractors* américains de la décennie soixante, sachant que la plupart d'entre eux étaient également producteurs de services informatiques. Par souci de clarté, nous avons fait uniquement apparaître les entreprises dont la part de revenus spécifiquement attachée à l'activité de programmation représentait 70% au moins de leurs revenus généraux. Comme il est possible de le constater toutes ces entreprises – à l'exception de la *System Development Corporation* en 1970¹³² – ont enregistré une hausse significative de

¹³¹ D'après Frost & Sullivan, *The Computer Software and Services Market*, Frost & Sullivan, 1971, pp. 107-108. Tableau reproduit dans son intégralité in [Campbell-Kelly, 2003], pp. 66-61.

¹³² Une très grande partie des revenus de la *System Development Corporation* découlait depuis sa création en 1957 de contrats passés avec l'U.S. *Department of Defense*, la N.A.S.A. et d'autres grandes organisations gouvernementales américaines. Les années 1968-69 correspondirent rappelons-le au moment précis où cette

leurs revenus au cours des années 1969 et 1970 (comparativement aux chiffres enregistrés en 1968). Cette augmentation globale constituait ainsi la traduction quantifiée, au sein de la réalité du *Software Business*, du grand pas en arrière effectué par la société I.B.M. en raison du « couperet juridique » qui menaçait désormais de s'abattre sur elle (1968), mais aussi de sa décision historique de facturer désormais séparément les différents produits qui composaient jusqu'alors son offre informatique groupée.

Concernant encore l'*unbundling decision*, on peut dire qu'une de ses conséquences fondamentales fut de sanctionner véritablement et irrévocablement le changement de perspective ou de représentation de l'objet logiciel qui, sous l'impulsion de quelques petites firmes de software particulièrement novatrices et audacieuses – l'*Applied Data Research* et *Informatics* pour ne pas les citer - avait commencé à se faire jour dans l'industrie informatique américaine au cours des années 1965-66. Aux idées de « *free fee programs* » et de *bundle* succéda ainsi la notion marchande discriminante ou identificatrice de « *software product* ». Celle-ci devait désormais définir le logiciel comme un produit informatique à part entière et le placer de ce fait sur le même plan que les ordinateurs et leurs périphériques. A présent les programmes devraient être achetés, de la même façon que l'on achetait par exemple une imprimante à haute vitesse ou bien une unité lectrice de bandes magnétiques. Que leur unique épaisseur matérielle ait consisté dans celle, casuelle, de leur support, autrement dit qu'ils aient continué à n'être rien d'autre que des séries de bits spécifiquement organisés dans la perspective de l'accomplissement de telle ou telle fonction ne devait strictement rien changer à l'affaire ici.

Pareille requalification de la notion de logiciel ne pouvait que provoquer une transformation notable de la nature des rapports qui unissaient ceux qui développaient les programmes et ceux qui, en aval de la chaîne, y recourraient dans le cadre de leurs activités professionnelles. Jusqu'à la fin des années soixante, la pratique quasi institutionnelle du groupement des matériels et du logiciel avait figé ces relations dans un schème d'une grande simplicité. « Gracieusement » fournis par les constructeurs de systèmes – bien qu'ils ne soient pas toujours développés par leurs soins – les programmes informatiques parvenaient sans plus de formalités à leurs utilisateurs finaux par l'intermédiaire des habituels réseaux de distribution commerciale. Ceux, extrêmement vastes et efficaces, qui avaient été mis en place

organisation à but non lucratif née de la *RAND Corporation* devint une entreprise privée. Si celle-ci enregistra une hausse substantielle de ses revenus en 1969, une baisse s'ensuivit, en 1970. Nous tendons à penser que cette diminution des performances de la S.D.C. peut être imputée à son changement de statut et à son entrée de plain-pied dans une compétition économique à laquelle elle n'était sans doute pas complètement préparée. Malgré tout cela, on voit parfaitement que les revenus de la S.D.C., en 1970, étaient largement supérieurs à ceux de 1968.

par les constructeurs quelquefois des décennies auparavant, afin de promouvoir, vendre et installer leurs machines¹³³.

Outre le fait que cette pratique était singulièrement économique – pour l'évidente et simple raison qu'elle dispensait les industriels d'avoir à assumer pour les programmes des frais de promotion, d'emballage (*packaging*), d'acheminement et d'installation spécifiques - elle possédait pour eux une autre vertu extrêmement appréciable. Ainsi face à une offre logicielle restreinte (voire parfois même inexistante) et payante émanant d'une concurrence de toute façon limitée à la portion congrue, la gratuité des programmes offerts par les constructeurs informatiques avec leurs équipements leur garantissait de la part de leurs clients, fatalistes, une certaine forme de mansuétude. Une application ou un outil de programmation s'avérait inabouti et/ou bogué ? Nul ne songeait trop à en faire reproche à celui qui l'avait procuré puisque l'application ou l'outil en question l'avait été sans que son fournisseur ne perçoive en échange une quelconque contrepartie financière (directe s'entend). Par ailleurs, encore une fois, la relative rareté de solutions alternatives, pour ce qui était des logiciels, ne laissait généralement d'autre choix aux usagers que celui consistant à se satisfaire de ce que leurs fournisseurs d'équipements informatiques attirés leur proposaient avec les systèmes qu'ils leurs louaient ou qu'ils leur vendaient. Ainsi la gratuité qui caractérisait les logiciels que les grands constructeurs informatiques, I.B.M. en tête, fournissaient à leurs clients, se situait-elle dans une certaine mesure à l'exact opposé de la relation marchande forte – pour ne pas user ici de termes tels que « captatrice » ou « asservissante » – qui liait par ailleurs les deux parties quant aux équipements mis en jeu. La montée en puissance progressive et la multiplication graduelle des *software contractors*, tout au long des années soixante, changea peu à peu cette donne. En 1965, on ne comptait qu'une grosse quarantaine de développeurs de logiciels et/ou de fournisseurs de services informatiques indépendants aux U.S.A. A côté de ces entreprises dont quelques-unes employaient jusqu'à une centaine de programmeurs, il existait cependant un nombre indéterminé de petites firmes dont les effectifs ne dépassaient pas quelques personnes. Deux ans plus tard, le nombre de sociétés spécialisées dans les services et le développement d'applications informatiques possédant pignon sur rue avait déjà subi une formidable inflation puisqu'il était passé à environ 2800. Le nombre toujours plus important d'ordinateurs installés dans le monde et l'*unbundling* décision d'I.B.M. ne firent bien entendu qu'amplifier cette tendance. Mais d'autres facteurs jouèrent encore fortement en faveur de cette explosion du marché du logiciel standardisé. La diffusion croissante

¹³³ Ainsi du réseau de vente d'I.B.M., dont les points les plus anciens dataient de l'époque où la firme commercialisait exclusivement des appareils de traitement de l'information électromécaniques.

d'ordinateurs commerciaux dotés de fonctionnalités informatiques de plus en plus pratiques et perfectionnées, comme le time-sharing et la capacité à gérer la multiprogrammation – au demeurant deux choses dont étaient capables certaines des machines du *System/360* – amenèrent les sociétés de programmation existantes à développer des compétences inédites tandis que d'autres firmes, telles l'*American Management Systems (A.M.S.)*, faisaient leur apparition et se spécialisaient dans l'exploitation de ces nouveaux créneaux spécifiques. Tandis que les usagers d'équipements informatiques se faisaient plus ou moins lentement à l'idée que désormais, il leur faudrait payer pour obtenir ce qu'ils se trouvaient autrefois en mesure d'obtenir gratuitement, les ventes de logiciels n'eurent de cesse d'augmenter.

Durant l'année 1971 eurent lieu les premiers *I.C.P. Directory Million Dollar Awards*. Cette cérémonie initiée par Larry A. Welke, le créateur et éditeur de l'*International Computer Programs Directory*, une sorte de catalogue répertoriant les entreprises de software et leurs productions depuis 1966, avait pour objectif de récompenser – et donc de faire connaître et reconnaître aux yeux de la communauté économique – toutes les sociétés de programmation dont les ventes de logiciels avaient dépassé un million de dollars¹³⁴. Au final, et alors que le concept de cet évènement avait involontairement été donné à L. A. Welke par Jim Stone, un consultant de la firme d'analyse financière *Quantum Sciences* qui, discutant avec le fondateur de l'I.C.P.D., avait dévalorisé l'idée même de l'existence d'une industrie du logiciel en prétendant qu'aucune application informatique n'avait encore généré de profit égal ou supérieur à un million de dollars, on s'aperçut que 29 produits informatiques avaient déjà franchi ce cap « mythique ». En 1974 une nouvelle catégorie/récompense fut créée afin d'honorer trois applications et les firmes qui les avaient conçues. *Total* de *Cincom*, *AUTOFLOW II* de l'*Applied Data Research* et *Mark IV* d'*Informatics* furent les premiers programmes informatiques dont les ventes rapportèrent plus de dix millions de dollars. S'il était encore besoin d'un quelconque cérémonial pour adouber l'industrie du logiciel, les reconnaître, elle et ses lettres de noblesse, après l'évènement décisif que fut l'*unbundling decision* d'I.B.M., alors l'I.C.P. *Million Dollar Awards* initié par L.A. Welke fut celui-là.

2.2.7. Time-sharing et réseaux: C.T.S.S., le projet M.A.C., MULTICS et UNIX, ARPANET, NSFNET et le modèle de l'intelligence augmentée.

¹³⁴ Comme chacun le sait fort bien, ce nombre, lorsque associé au dollar, possède une portée symbolique particulièrement forte aux Etats-Unis.

2.2.7.1. Le *time-sharing*: genèse du concept et premières réalisations (C.T.S.S.).

Lorsqu'on la traduit en français, le sens de l'expression *time-sharing* est généralement rendu au moyen de la locution « temps partagé ». Il est possible de donner une première définition de la notion de temps partagé en disant qu'un système informatique opérant sous cette modalité particulière possède la capacité d'être utilisé par plusieurs utilisateurs de manière *simultanée*. Il convient en outre – et surtout - d'ajouter que le dispositif est organisé et programmé de telle sorte qu'il fonctionne en permanence en donnant l'illusion à chacun de ses usagers qu'il est le seul et unique utilisateur du système pendant tout le temps où il est installé à la console d'un de ses terminaux pour travailler. Pour parvenir à ce résultat, c'est-à-dire en substance « faire croire » à chacun des utilisateurs de la machine que les ressources matérielles et logicielles de cette dernière lui sont intégralement allouées pendant toute la durée de sa session de travail, on exploite l'important différentiel qui de facto existe entre le temps qui est nécessaire à l'être humain pour accomplir une tâche simple – par exemple frapper une touche donnée sur un clavier alphanumérique – et celui, véritablement infime en proportion, qu'il faut à un ordinateur pour exécuter un très grand nombre d'instructions élémentaires¹³⁵. Impliquant de manière constante de très nombreux échanges dynamiques de flux informationnels entre l'unité arithmétique et logique de l'ordinateur et ses dispositifs mémoriels centraux et périphériques, ainsi qu'énormément de procédures d'interruption et de reprise d'exécution de tâches dont il est obligatoire de conserver systématiquement la trace en mémoire afin de pouvoir efficacement administrer les files d'attente des programmes en cours d'exécution, ce mode opératoire informatique exige une organisation et une gestion optimales des demandes d'accès faites à l'ordinateur par ses utilisateurs (ou plutôt par leurs applications). Tout cela nécessite en conséquence la mise au point d'un programme spécial, en l'occurrence un système d'exploitation, capable de prendre en charge l'ensemble de ces opérations en fonction de la spécificité des tâches à réaliser et des caractéristiques de la machine dont il est appelé à assurer le fonctionnement en temps partagé. Comme le note Jérôme Ramunni, la conception d'algorithmes permettant de réaliser ce genre de tâches informatiques complexes relève d'une discipline dont l'essor avait justement été rendu possible par l'apparition de l'ordinateur, à savoir la recherche opérationnelle¹³⁶.

¹³⁵ Ce nombre dépend évidemment de l'époque et de la machine qui sont considérées.

¹³⁶ In [Ramunni, 1989], p.174.

Une première description avérée du concept de temps partagé a été faite par l'américain Robert W. Bemer¹³⁷, en 1957, dans un article paru dans un numéro de la revue *Automatic Control Magazine*. Cette publication fut suivie deux ans plus tard par deux autres textes que les spécialistes de l'histoire de l'informatique considèrent habituellement comme autant de « pierres blanches » sur la voie de la réalisation de l'idée de time-sharing¹³⁸. Portant la date du 1^{er} janvier 1959, le premier de ces écrits était une note intitulée *Memorandum to P. M. Morse Proposing Time Sharing : A Time Sharing Operator Program for our Projected IBM 709*¹³⁹, signé de la main de l'américain John McCarthy. Comme spécifié dans son titre, ce document était adressé à M. Philip McCord Morse, lequel occupait alors la fonction de Directeur du *Computation Center Interchange* du *Massachusetts Institute of Technology*. On connaît certainement beaucoup mieux John McCarthy pour le rôle décisif qu'il a joué dans le champ de l'intelligence artificielle – en plus d'avoir proposé cette appellation paradoxale à l'occasion de la fameuse conférence sur l'I.A. qui se tint au *Dartmouth College* en 1956 il fut également l'inventeur du langage Lisp¹⁴⁰ - qu'en tant que pionnier de l'informatique en temps partagé. Pourtant l'influence de J. McCarthy dans ce domaine ne fut pas moins importante que celle qu'il eut l'occasion d'exercer par la suite dans le secteur de la formalisation et de la modélisation informatique des processus cognitifs supérieurs. Nous nous devons toutefois de préciser ici que le même John McCarthy, cette fois dans une communication présentée en 1983 à l'Université de Stanford et intitulée « Reminiscences on the History of Time-

¹³⁷ Ingénieur aéronautique de formation, R.W. Bemer est par la suite devenu un spécialiste renommé en informatique. Tout au long de sa carrière, il a travaillé pour plusieurs grandes organisations et compagnies (*Rand Corporation*, I.B.M., *Honeywell*, Compagnie des Machines Bull). L'informatique dans son ensemble lui est redevable d'importantes contributions. Il participa ainsi à la création du C.O.B.O.L., co-développa l'*American Standard Code for Information Interchange* (il est notamment à l'origine de la séquence « escape » et du caractère backslash du code A.S.C.I.I.). Il travailla encore à l'établissement du standard de 8 bits pour les mots informatiques alors qu'il occupait un poste au *Programming Research Department* d'I.B.M. Enfin Bemer fut le premier à mettre publiquement en garde la communauté d'utilisateurs d'ordinateurs contre les risques que le fameux bug de l'an 2000, qu'il avait détecté en 1959 en réalisant une étude sur les possibilités d'informatisation des travaux généalogiques pour le compte de L'Église de Jésus-Christ des Saints des Derniers Jours, faisait courir aux données. C'était dans un éditorial intitulé « What's the Date », paru dans un numéro de 1971 du *Honeywell Computer Journal* (une revue dont il était par ailleurs l'éditeur). Le gouvernement américain étant alors trop occupé avec la crise politico-militaire du Vietnam, son appel ne put être entendu. Cela n'empêcha pas Bremer de réitérer officiellement ses mises en gardes en 1979, dans un article cette fois publié dans le numéro de février de la revue *Interface Age*.

¹³⁸ On verra un peu plus loin qu'un de ces deux textes est peut-être considéré à tort comme un repère dans l'histoire du time-sharing.

¹³⁹ John McCarthy, *Memorandum to P. M. Morse Proposing Time Sharing: A Time Sharing Operator Program for our Projected IBM 709*, Stanford University, 1er janvier 1959. Une libre consultation en ligne de ce document est possible à l'adresse suivante : <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/timesharing-memo/timesharing-memo.html>.

¹⁴⁰ Basé sur le Lambda Calcul créé par le mathématicien et logicien Alonzo Church, le Lisp (*List Processing*) a été créé au M.I.T. en 1958, par John McCarthy (puis implémenté pour la première fois sur un I.B.M. 704 par Steve Russell, le créateur de *Spacewar*, premier jeu informatique de l'histoire). Ce langage de programmation de haut niveau (puis ses variantes telles *Scheme* ou *Common Lisp*), a toujours été étroitement associé au champ de l'intelligence artificielle depuis sa création.

Sharing »¹⁴¹, a affirmé que ses idées concernant la notion de time-sharing étaient en réalité apparues beaucoup plus tôt que cela. D'après ses souvenirs, celles-ci remonteraient en réalité à l'année 1955. Evidemment, il s'agit là d'affirmations qui, si elles ne bénéficiaient pas d'éléments corroboratifs émanant de tiers désintéressés, devraient être prises pour ce qu'elles sont. Et on sait combien l'histoire de l'informatique regorge littéralement d'histoires à propos d'individus qui prétendent concurremment – à tort ou à raison d'ailleurs – être à l'origine d'un concept ou d'un artefact révolutionnaires. Or ici les propos de J. McCarthy, en plus d'être confirmés par les travaux qu'il entama dès son arrivée au M.I.T. à l'automne 1957, se sont vus partiellement certifiés par le témoignage de l'auteur du second texte important que nous évoquions plus haut, le britannique Christopher Strachey. Celui qui, en 1965, devait prendre la tête du nouveau *Programming Research Group* de l'*Oxford University Computing Laboratory* après avoir conçu en 1952 un logiciel de jeu de dames que d'aucuns considèrent comme le premier programme d'intelligence artificielle¹⁴², fut en effet aussi le premier à prononcer une conférence sur le thème du time-sharing. S'il n'y eut pas de querelle entre l'américain et l'anglais concernant la paternité du concept de time-sharing, tous les deux jouèrent à peu près au même moment un rôle déterminant dans sa formulation. Aussi lorsqu'il s'agit de tenter de prendre la mesure de l'exactitude des assertions du premier, le témoignage du second peut-il être considéré comme un élément utile.

Dans « Reminiscences on the History of Time-Sharing », J. McCarthy prétendait donc que ses premières idées concernant le time-sharing dataient (peu ou prou) de l'année 1955. Le Professeur Donald E. Knuth, auteur des quatre célèberrimes volumes de la série *The Art of Computer Programming*, a compté parmi les lecteurs émérites de cet article. Après avoir pris connaissance du contenu de ce document D. E. Knuth était curieux de savoir qui, au juste, avait fait quoi aux commencements du time-sharing. Il a donc adressé un courrier à son collègue anglais C. Strachey afin que celui-ci lui fasse part de ses vues sur la question. Bien que relativement concise, la réponse que C. Strachey fit à D. E. Knuth comporte quelques informations fort intéressantes¹⁴³. Après lui avoir rappelé à qu'il était le rédacteur de « Time

¹⁴¹ John McCarthy, « Reminiscences on the History of Time-Sharing », in *I.E.E.E. Annals of the History of Computing*, vol. 14, n° 1, janvier-mars 1992, pp. 19-24. Cet article est également consultable en libre accès sur le site du *Formal Reasoning Group* (dont J. McCarthy est un des membres éminents) de l'Université de Stanford : <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/timesharing/timesharing.html>.

¹⁴² C. Strachey avait mis au point ce programme de jeu de dames en utilisant le *Ferranti Mark I* du *Computing Machine Laboratory* de l'Université de Manchester. On sait que pour ce travail, C. Strachey reçut les encouragements d'Alan M. Turing.

¹⁴³ Cette réponse de C. Strachey à D. E. Knuth figure en appendice du texte de « Reminiscences on the History of Time-Sharing » qui est consultable sur le site du *Formal Reasoning Group* de l'Université de Stanford (<http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/timesharing/timesharing.html>).

Sharing in Large Fast Computers »¹⁴⁴, conférence qu'il prononça pour la première fois à Paris à l'occasion de l'*International Conference on Information Processing* de 1959, C. Strachey indiquait à son correspondant que, dans son texte, la notion de time-sharing était comprise selon l'acception qui en était alors la plus répandue. Pour lui, et pour un grand nombre de membres de la communauté informatique de l'époque, ce concept ne renvoyait pas à la définition que nous avons donnée en commençant cette partie et qui était aussi celle à laquelle se référait des gens comme J. McCarthy, mais elle équivalait plutôt à la notion de multiprogrammation. Rappelons que par multiprogrammation, on entend une méthode au moyen de laquelle il est possible de partager dynamiquement les différents organes centraux d'un ordinateur (C.P.U., mémoire vive), entre plusieurs processus informatiques en minimisant leurs temps d'attente respectifs pour accéder aux périphériques du système. Ici, il s'agit donc encore et toujours d'optimiser l'exécution de programmes, mais à la différence du time-sharing (au sens de McCarthy), on ne considère cette amélioration de l'effectuation des processus informatiques que du point de vue de la machine et de son opération. On ne se préoccupe en aucun cas de l'utilisateur (ou des utilisateurs) de l'ordinateur.

C'était cette signification que Christopher Strachey visait dans sa conférence du mois de juin 1959, lorsqu'il employait l'expression « time-sharing » dans le titre et le corps de son texte. Ce qui pouvait laisser croire le contraire et qui amène en général ceux qui s'intéressent à ce aspect de l'histoire de l'informatique à penser que C. Strachey fut un pionnier du time-sharing au même titre que J. McCarthy, Herbert M. Teager, Jack B. Dennis, Doug Ross, Robert M. Fano ou Fernando J. Corbató (à l'époque tous chercheurs ou étudiants au M.I.T.), c'est qu'il envisageait la possibilité de réaliser le processus de multiprogrammation sur un ordinateur *pendant* qu'un programmeur se trouvait assis à la console de ce même ordinateur, en train par exemple de travailler au débogage d'un quelconque programme. Or c'est une chose que d'évoquer cette possibilité (laquelle implique un certain nombre de programmes et un informaticien interagissant sur une même machine, le tout sous la supervision d'un logiciel de contrôle), et une autre chose que d'imaginer une configuration matérielle et logicielle au fond assez similaire, à ceci près qu'elle inclue cette fois *plusieurs* programmeurs, tous raccordés au même ordinateur par l'entremise de périphériques terminaux. Ces deux façons de comprendre la notion de time-sharing étaient l'une et l'autre en cours à la fin des années cinquante. L'acception à laquelle Christopher Strachey l'entendait dans son intervention du

¹⁴⁴ C. Strachey, « Time Sharing in Large Fast Computers », in *Proceedings of the International Conference on Information Processing*, UNESCO, juin 1959, pp. 336-341.

mois de juin 1959 – et qui en réalité est équivalente au concept de *multitasking*¹⁴⁵ - était cependant bien plus répandue, et par le fait même nettement plus courante, que celle visée par John McCarthy dans son mémorandum du 1^{er} janvier 1959. En même temps qu'il paraît minimiser l'importance de son rôle dans l'émergence du time-sharing (au sens précis où nous avons défini ce terme), C. Strachey ne dément pas non plus le fait que les idées de J. McCarthy sur ce sujet aient été antérieures, comme l'a affirmé ce dernier dans « Reminiscences on the History of Time-Sharing », à l'année 1959. Sa présence et ses travaux au M.I.T., à compter de l'automne 1957, corroborent parfaitement cela. Il nous reste maintenant à saisir et à comprendre les raisons précises qui conduisirent John McCarthy à imaginer une modalité de fonctionnement informatique aussi novatrice que pouvait l'être le time-sharing, en plein milieu des années cinquante. Pour cela il nous sera nécessaire de considérer deux des principaux modes d'accès aux ordinateurs qui étaient en vigueur avant que le principe du time-sharing n'apparaisse et ne se diffuse : la « vacation » et le *batch processing*.

Les pratiques informatiques de la décennie cinquante étaient essentiellement placées sous le sceau de la rareté. Rareté des hommes d'abord, car, comme nous l'avons vu précédemment, fort peu nombreux étaient ceux qui étaient capables de faire fonctionner – c'est-à-dire de programmer – les calculateurs électroniques à programme enregistré. Rareté des matériels ensuite. La mise sur le marché des UNIVAC 1, premiers ordinateurs commerciaux de l'histoire, avait beau eu clore d'une assez belle manière l'informatique des pionniers – celle des premières et dispendieuses expérimentations en laboratoire – le nombre de systèmes en usage dans le monde n'était que de 1460 en 1957 (contre 755 l'année précédente). Avec 1260 machines installées sur leur territoire en 1957 (contre seulement 700 en 1956), les Etats-Unis étaient de très loin (et en toute logique) la nation la mieux pourvue de toute la planète¹⁴⁶. Il est évident que cette situation provoquée par une insuffisance conjointe des moyens matériels et humains devait par la force des choses dicter leurs formes respectives aux premières pratiques informatiques. La demande des utilisateurs en moyens de calcul électronique étant alors très largement supérieure aux ressources matérielles capables de les satisfaire, des solutions durent être imaginées afin d'optimiser l'usage ainsi que la distribution du précieux temps machine. Le *batch processing* - « traitement par lots » en français - était certainement la plus utilisée. Aux commencements de l'informatique, l'emploi des

¹⁴⁵ Ou traitement (pseudo) simultané de processus informatiques multiples.

¹⁴⁶ In Montgomery Phister Jr., *Data Processing: Technology and Economics*, Digital Press and Santa Monica Publishing Company, Santa Monica, Cal., 1979, Table II.1.26, p. 277

ordinateurs « en vacation » était la seule façon, pour ceux qui avaient besoin de tester un programme et/ou d'en connaître les résultats, d'avoir accès à une machine. Ce mode d'utilisation consistait à réserver souvent fort longtemps à l'avance une tranche de temps machine, typiquement une demi-heure ou une heure, sur un ordinateur appartenant le plus souvent à une grande organisation (e.g. un centre de recherches universitaire ou encore une compagnie industrielle). Outre le fait que cette pratique pouvait être payante¹⁴⁷, son rendement et sa productivité, en termes d'utilisation effective du système et de résultats obtenus, était en général peu élevés. La majeure partie du temps machine concédé ou acheté se voyait ainsi consacrée au débogage in situ du programme essayé ou bien encore à l'analyse des données générées en sortie de dispositif. Dans une grande majorité de cas, la période de temps où l'ordinateur travaillait véritablement ne représentait donc qu'une part fort peu importante de la totalité du temps machine alloué ou acquis. Cette façon de procéder fort peu économique comportait qui plus est un grave défaut : celui de faire naître et d'entretenir des rivalités et des frustrations parmi tous ceux – et ils étaient en général nombreux – qui aspiraient à utiliser concurremment la si rare et si précieuse machine. Du fait de ses imperfections par trop nombreuses l'utilisation des ordinateurs « en vacation » céda progressivement le pas à la méthode du *batch processing* au cours de la seconde moitié des années cinquante.

Avant l'avènement du time-sharing et des réseaux informatiques le *batch processing* – expression que l'on traduira par « traitement par lots » en français – était certainement la plus répandue des techniques de partage de ressources informatiques. Remarquons qu'elle fut essentiellement promue par la société I.B.M. En plus d'être alors la plus puissante des firmes industrielles spécialisées dans la production d'ordinateurs, ce qui sous-entendait que la très grande majorité des systèmes informatiques en activité sur la planète étaient issus de ses unités de production, cette entreprise avait derrière elle une très longue expérience dans le domaine du traitement mécanographique de l'information. Or le mode opératoire auquel obéissait le *batch processing* empruntait certaines de leurs caractéristiques aux pratiques et aux techniques qui avaient jadis prévalu dans ce secteur. Visant à augmenter le niveau de rendement de ces instruments de calcul formidablement coûteux qu'étaient les mainframes, la

¹⁴⁷ Pour le cas où un utilisateur accrédité et venu de l'extérieur aurait souhaité disposer pendant un laps de temps défini de l'ordinateur d'une grande université par exemple. Tous ceux qui avaient besoin de recourir à un mainframe ne disposaient en effet pas nécessairement des moyens financiers qui leur auraient permis d'en faire l'acquisition. Quant à ceux dont les besoins en ressources informatiques n'étaient qu'occasionnels, il va de soi que le fait d'investir dans la location ou l'acquisition d'un ordinateur n'aurait absolument pas été rentable pour eux. Pour ces catégories d'utilisateurs, l'achat d'une tranche de temps machine sur le système informatique d'une institution ou d'une entreprise représentait donc une solution pratique et relativement économique.

méthode du traitement par lots nécessitait deux choses tout à fait spécifiques. Pour commencer, un aménagement matériel caractéristique. Le système informatique et l'ensemble de ses éléments périphériques se trouvaient ainsi installés au sein d'un *computation center*. Souvent hébergés par des universités, des organisations gouvernementales ou encore des grandes structures commerciales ou industrielles, ces centres de calcul, hormis des locaux, possédaient leurs propres équipes d'informaticiens et de techniciens. La plupart du temps, ils disposaient également de personnels administratifs. Quant aux utilisateurs/clients qui aspiraient à faire usage des moyens informatiques disponibles dans les *computation centers*, ils devaient pour ce faire s'acquitter du paiement d'une certaine somme d'argent, puis respecter le protocole rigoureux qui réglait la présentation, la remise et la récupération du travail (*job*) qu'ils désiraient voir exécuté par le *mainframe*. Inspiré comme nous l'avons indiqué de méthodes qui avaient cours à l'époque où les machines mécanographiques étaient employées pour traiter l'information, le *batch processing* réclamait que les tâches suivantes soient successivement réalisées:

- 1) Le client écrivait son programme puis inscrivait le code correspondant à ce job et aux données qui devaient être traitées sur des cartes perforées¹⁴⁸.
- 2) Ce jeu de cartes était apporté par le client au centre de calcul. Là il était confié à un opérateur installé dans la zone d'accueil de l'installation¹⁴⁹.
- 3) Une fois réceptionnés un certain nombre de jeux de cartes perforées, les opérateurs du système procédaient à leur assemblage en lot (*batch*). Habituellement, un lot était formé pour une période de temps donnée, par exemple une semaine. Durant cet intervalle temporel les programmes exécutés par l'ordinateur du centre de calcul demeuraient inchangés (sauf exception rare), seules les données sur lesquelles ils étaient appelés à opérer étaient modifiées.
- 4) Au groupe (ou lot) de programmes ainsi constitué, les opérateurs du centre adjoignaient un programme supplémentaire, le *batch executive*. Se présentant

¹⁴⁸ L'expression consacrée était *deck of card* soit littéralement « jeu de cartes ».

¹⁴⁹ Il arrivait que cette procédure s'effectue dans une sorte de sas (ou encore au travers d'une fenêtre), ceci afin d'éviter que les interactions entre clients et opérateurs ne finissent par perturber la climatisation de la pièce où était installé le mainframe du centre.

lui aussi sous la forme d'un lot de cartes perforées, sa fonction consistait à charger séquentiellement les programmes des clients dans la mémoire du mainframe et à assurer leur exécution successive. Il s'agissait donc d'un moniteur d'enchaînement des tâches, qui opérait de concert avec les programmes système résidant normalement en machine (comme par exemple la séquence de code en charge de la supervision des opérations d'entrée/sortie).

- 5) Après traitement du lot courant, les opérateurs du système récupéraient les sorties perforées puis séparaient les uns des autres les groupes de cartes correspondant aux résultats de chaque *job* soumis à la machine.
- 6) Le client revenait au *Computation Center* afin de récupérer les cartes correspondant au programme qu'il avait initialement remis, de même que celles codant pour les solutions obtenues après traitement. Un compte rendu exposant le détail du déroulement des opérations qui le concernaient était en général fourni au client.

Comme de bien entendu, la méthode du traitement par lots possédait aussi bien des avantages que des inconvénients. Au rang de ses atouts figurait par exemple le fait qu'elle permettait d'optimiser notablement l'emploi des ordinateurs installés dans les centres de calcul. Le schéma opératoire sur lequel reposait le *batch processing* impliquait en effet une succession mécanisée – ou plutôt électronisée - des procédures combinées en lot. A peine une tâche donnée se voyait-elle achevée que le traitement du *job* occupant l'emplacement suivant dans le lot de programmes soumis à l'ordinateur pouvait être immédiatement lancé. En raison de l'automatisation de leur enchaînement, le débit du système, en d'autres termes le nombre de travaux informatiques qu'il était en mesure de traiter par unité de temps, se trouvait donc amélioré. Cette stratégie de groupement systématique des tâches informatiques autorisait une diminution du coût du traitement informatique des données, laquelle bénéficiait à tous ceux qui confiaient la réalisation de leurs travaux aux *Computation Centers*. Un autre avantage ici tenait au fait qu'une grande partie du travail relevant normalement de la compétence des opérateurs était assurée par le système informatique lui-même. En éliminant autant que faire se pouvait l'homme (fut-il éminemment compétent) de la boucle de traitement, il devenait possible d'accroître plus encore le niveau de rendement de la machine. Le *batch processing* et le haut niveau d'automatisation de l'effectuation des processus informatiques qu'il supposait

par définition n'allaient cependant pas sans désavantages de taille. D'abord, c'est logique, une fois son programme et ses données déposés au centre de calcul, l'utilisateur/client ne pouvait plus prétendre à exercer quelque contrôle que ce soit sur eux. Ne disposant tout simplement pas d'un accès physique au système – donc ne pouvant intervenir sur son programme au moment où celui-ci était chargé puis exécuté - il se devait d'attendre patiemment que l'ordinateur du centre ait terminé de traiter le lot de programmes et de données au sein duquel son paquet de cartes perforées avait été intégré avant de pouvoir recueillir, le cas échéant¹⁵⁰, les résultats qu'il espérait. Ceci signifiait que le temps de réponse des centres de calcul – autrement dit le délai moyen qui s'écoulait entre le moment où le programme et les données à traiter étaient déposés au centre et celui où l'on pouvait récupérer les résultats produits après traitement informatique - était relativement important. Bien qu'en règle générale le rythme d'une ou deux passes par jour ait constitué la norme en matière de charge de travail, il n'était pas exceptionnel que le résultat de tâches confiées au matin d'une journée par un client soit remis à celui-ci par les opérateurs du *Computation Center* au lendemain de ce jour. S'il est vrai qu'il pouvait paraître trop long à ceux qui espéraient les sorties d'un programme informatique, le temps d'attente moyen constaté dans les centres de calcul était de toute façon très inférieur à celui qu'il fallait endurer pour disposer ne serait-ce que d'une heure de temps machine sur un système informatique opéré sous le régime de la vacation. A l'aune de ce qui se passait autrefois, cela pouvait être vu comme un progrès, donc comme un avantage caractéristique de la méthode du *batch processing*.

Sur le plan strictement opérationnel, une des plus grandes faiblesses du schème sous-tendant le traitement par lots était le risque de voir un dysfonctionnement logiciel provoqué par un des programmes chargés en mémoire affecter la stabilité générale du système (voire même occasionner son effondrement pur et simple). Un programme bogué pouvait par exemple lire plus de cartes perforées qu'il n'était nécessaire ou bien encore entrer dans une boucle infinie. Lorsque de tels cas de figure se produisaient, les opérateurs de l'ordinateur du centre de calcul se trouvaient contraints d'interrompre totalement son fonctionnement jusqu'à ce que le problème incriminé soit localisé et corrigé. Pendant ce temps, aucun travail ne pouvait être exécuté. Il pouvait aussi arriver que les instructions d'une application utilisateur interfèrent avec plus ou moins de gravité avec les programmes résidents du système. Ceux-là mêmes dont la fonction consistait à assurer le bon fonctionnement de la machine, en contrôlant notamment le déroulement et la synchronisation de toutes les opérations qui

¹⁵⁰ Encore fallait-il que ledit programme soit exempt de bogues et qu'il se comporte comme prévu.

survenaient entre ses différents organes (internes et périphériques). Peu à peu, des solutions spécifiques furent définies puis mises en œuvre sur les systèmes fonctionnant en *batch processing* afin de réduire la fréquence d'occurrence de ce type d'incidents. Ces schémas de protection empêchaient par exemple que des programmes au comportement erratique n'accèdent à certains emplacements de la mémoire centrale de l'ordinateur. Ces zones d'enregistrement réservées – c'est-à-dire interdites aux applications non critiques – devaient servir exclusivement au stockage du code informatique nécessaire à l'opération de ce dernier. Assez efficaces et bénéficiant peu à peu de perfectionnements supplémentaires, ces mesures de protection permirent de sécuriser les machines utilisées dans les *Computation Centers* et elles contribuèrent ainsi à prolonger l'usage du traitement par lots.

Deux ans avant que John McCarthy n'arrive au *Massachusetts Institute of Technology*, Philip M Morse avait compris que les jours du *Whirlwind*, l'ordinateur développé au sein de la prestigieuse institution par Jay Forrester et auquel lui et son équipe avaient un droit d'accès limité¹⁵¹, étaient comptés. Le professeur de physique qui avait assuré la direction du M.I.T. *Committee on Machine Methods of Computation* depuis 1952 avait alors pris les devants en multipliant les contacts avec la société I.B.M.¹⁵². A cette époque le géant de l'informatique cherchait en effet à intensifier son implantation dans les grands pôles universitaires américains. Sous certaines conditions, en l'occurrence la mise en place de partenariats professionnels étroits avec les équipes de recherche des organismes bénéficiaires, l'industriel se proposait de favoriser le développement de centres de calcul en fournissant gracieusement aux intéressés des systèmes informatiques performants. Un accord put finalement être conclu entre les représentants d'I.B.M. et ceux du M.I.T., qui prévoyait que le fabricant procurerait sous peu et gratuitement un *Data Processing System* de type 704¹⁵³ à l'institut de recherche technologique. Dans la foulée de la conclusion de ce contrat Philip M. Morse commença à rencontrer les responsables des différentes universités de la Nouvelle Angleterre afin de leur proposer de constituer un consortium. Il était prévu que les membres de cette future

¹⁵¹ Les tranches de temps machine allouées à Philip Morse et son groupe allaient d'une demi-heure à une heure par journée, et deux heures par nuitée. Ces séances de travail étaient souvent interrompues car le *Whirlwind* était sujet à de fréquents problèmes de fonctionnement.

¹⁵² Le choix d'I.B.M. semblait ici aller de soi, ainsi que l'indique assez clairement la déclaration suivante de Philip Morse : « *We had contributed a lot to IBM's progress: Forrester's core memory and some of the Whirlwind team had helped develop the Fortran compiler. Besides, I suggested, if students learn about computers on an IBM machine, they will be more likely to prefer IBM later.* ». In Larry Owens, « Where Are We Going, Phil Morse ? Changing Agendas and the Rhetoric of Obviousness in the Transformation of Computing at MIT, 1939-1957. », in *I.E.E.E. Annals of the History of Computing*, vol. 18, n° 4, 1996, p. 35.

¹⁵³ Le *mainframe* I.B.M. 704 *Data Processing System* était une des premières machines équipées en série d'une unité arithmétique et logique capable de travailler en virgule flottante. Elle était également pourvue d'une unité d'enregistrement interne réalisée en tores de ferrite.

association pourraient bénéficier de plages de temps machine réservées sur l'I.B.M. 704 que le M.I.T. s'apprêtait à recevoir. Une fois le *Consortium of the New England Colleges* effectivement mis sur pied, de nouvelles rencontres furent encore organisées. Celles-ci devaient mettre en présence les gens du M.I.T., d'I.B.M., ainsi que ceux des Universités de la Nouvelle Angleterre qui avaient adhéré au consortium.

L'objectif principal de ces réunions visait à définir les modalités d'utilisation du système informatique que l'on s'apprêtait à installer au cœur du *Computation Center*. C'est en définitive en faveur du principe des trois huit que les parties intéressées se prononcèrent ici. Il fut par conséquent décidé qu'un tiers du temps machine attribuable reviendrait aux équipes du M.I.T., tandis que celles des universités appartenant au *Consortium of the New England Colleges* et à I.B.M. hériteraient des deux autres tiers disponibles. Au fur et à mesure que le projet prenait tournure P. M. Morse fit en sorte de remplacer les personnels de l'*Office of National Research* - jusque-là attachés au programme *Whirlwind* et qui désormais se trouvaient sur le départ - par des employés d'I.B.M. Le fabricant d'ordinateur accepta par ailleurs de prendre financièrement en charge une partie de la construction des infrastructures des *Compton Laboratories*, les nouveaux bâtiments qui devaient abriter les locaux du *Computation Center* dirigé par P. M. Morse, mais aussi ceux du *Laboratory for Nuclear Science* et du *Research Laboratory of Electronics*¹⁵⁴.

Quant John McCarthy, qui occupait à cette époque un poste de professeur assistant en mathématiques au *Dartmouth College* vint au M.I.T. *Computation Center* à l'invite de l'Alfred P. Sloan *Foundation*, l'ordinateur 704 D.P.S. promis par I.B.M. et le système de partage du temps machine reposant sur le principe des trois huit étaient déjà en opération depuis quelques mois déjà. Voyons bien qu'il s'agissait ici d'un procédé fondamentalement basé sur le traitement par lots qui, grâce à une distribution tripartite du temps machine quotidiennement disponible, autorisait les différentes parties habilitées à fréquenter le nouveau centre de calcul du M.I.T. à disposer chacune leur tour de l'I.B.M. 704 de façon équitable et relativement indépendante¹⁵⁵. Cela signifiait que les trois tours d'utilisation

¹⁵⁴ A deux reprises au moins dans son histoire, le *Massachusetts Institute of Technology* avait été appelé à collaborer de cette façon avec un grand acteur industriel américain (ou plutôt sa branche mécénat). En 1939, le M.I.T. *Department of Electrical Engineering* (alors présidé par Vannevar Bush), avait ainsi signé un contrat de deux ans avec la *Carnegie Institution* afin de mettre en place un *Center of Analysis*. Trois ans auparavant (1936), un accord similaire portant sur une durée de trois années avait également été signé entre ce même département d'ingénierie électrique et la *Rockefeller Foundation*. Il s'agissait ici de fabriquer un analyseur différentiel électromécanique - indifféremment désigné sous les noms de *Rockefeller Analyser* et de *Caldwell Machine* - doté d'un équipement de câblage intégré qui permettait à ses opérateurs de modifier sa configuration afin de résoudre tel ou tel problème (un peu comme cela se faisait sur l'E.N.I.A.C.).

¹⁵⁵ A la différence des autres centres de calcul où les clients devaient confier les paquets de cartes représentant leurs programmes et leurs données à des opérateurs résidents, les utilisateurs du système informatique du M.I.T.

journaliers étaient parfaitement distincts les uns des autres et que si partage de temps il y avait, celui-ci s'effectuait selon l'ordre de la stricte succession et non selon ceux de la simultanéité et de l'interactivité.

Dès son arrivée au M.I.T. *Computation Center*, John McCarthy débuta ses travaux sur le time-sharing. Il semblerait que cette recherche ait été motivée à l'origine par l'intense sentiment de frustration que le chercheur avait éprouvé face à la presque totale absence d'interactivité qu'offraient les systèmes informatiques de cette époque. Pour leur grande majorité, ces machines étaient en effet opérées selon le régime du *batch processing*, ce qui interdisait d'emblée tout contact direct entre l'individu qui soumettait un programme et l'ordinateur sur lequel celui-ci était traité. Quant bien même cette personne aurait pu disposer d'un tel accès, le principe même du traitement par lot empêchait qu'elle puisse intervenir sur son programme pendant tout le temps que durait un cycle de traitement. Or cette complète impossibilité d'intervention prohibait le fait que l'on puisse modifier une application pour la corriger durant son exécution, comme durant celle des différents programmes du lot dont elle ne représentait qu'un des éléments constitutifs. Cette importante contrainte excluait toutes sortes d'intervention, y compris le débogage du logiciel en temps réel, une capacité dont on sait qu'elle revêtait à l'époque une portée cruciale dans le domaine de l'intelligence artificielle. Pour McCarthy le time-sharing paraissait donc représenter la solution idéale – en ceci qu'elle paraissait implémentable facilement et pour un coût parfaitement supportable – pour contourner cet écueil intolérable et optimiser davantage encore le modèle d'utilisation du précieux temps machine. Comme il devait le rappeler dans l'article qu'il a consacré en 1983 à l'histoire de l'informatique en temps partagé, « Reminiscences on the History of Time-Sharing », l'idée selon laquelle ce principe de fonctionnement inédit devrait impérativement s'appuyer sur un dispositif de gestion des interruptions logicielles s'imposa à lui à la fois avec force et immédiateté. Les connaissances et compétences de McCarthy en matière d'électronique et de hardware informatique étant de son propre aveu très limitées à cette époque, il proposa alors aux personnels d'I.B.M. chargés de veiller sur le D.P.S. 704 une solution qui, si elle n'était pas la plus économique et la plus élégante sur le plan de l'ingénierie, permettait néanmoins de donner convenablement corps à son idée en apportant

Computation Center bénéficiaient d'un accès direct à la machine de l'institution. L'I.B.M. 704 étant un mainframe à cartes, le principe du traitement par lots était fréquemment utilisé pour en optimiser le temps d'emploi.

un minimum de modifications matérielles au « *Hulking Giant*¹⁵⁶ ». Un des éléments clefs du système d'interruption proposé ici par McCarthy était un télétype *Friden Flexowriter* (il envisageait pour l'avenir le même type de système, mais doté cette fois de trois *Flexowriters*). La fonction de ce dispositif d'acquisition lui-même dérivé de l'I.B.M. *Typewriter Selectric*, consistait à piloter des relais connectés au mainframe. Lorsque ces relais électroniques étaient actionnés grâce au télétype, l'ordinateur basculait en « mode piégé¹⁵⁷ », lequel permettait d'occasionner les suspensions et reprises de procédures nécessaires au fonctionnement en temps partagé. Assez rapidement la firme I.B.M. donna son aval à ce projet¹⁵⁸ et c'est un ingénieur de la firme, Arnold Siegel, qui fut chargé de seconder John McCarthy dans la réalisation de ce matériel spécial. Dans le même temps toutes les modifications requises furent apportées aux différents programmes d'exploitation de l'I.B.M. 704 afin que celui-ci puisse recevoir les signaux de contrôle provenant du *Flexowriter* auquel il devait être relié.

Au mois de décembre 1958 eut lieu la première démonstration publique d'un système informatique opérant en temps partagé. Organisée dans le cadre d'une réunion du M.I.T. *Industrial Affiliates*¹⁵⁹ cette démonstration baptisée « *time stealing* » - soit « vol de temps » si l'on traduit ici cette dénomination ad litteram - devait présenter l'I.B.M. 704 et son appareillage spécial de gestion d'interruptions à un parterre d'observateurs professionnels installés dans une salle sise au 4^{ème} étage du bâtiment du *Computation Center*. Le déplacement physique du mainframe, de ses unités périphériques et du télétype *Flexowriter* dans les étages du building étant absolument impossible (pour des motifs qu'il n'est certainement pas besoin ici de commenter), l'intégralité de la démonstration élaborée et conduite par McCarthy fut retransmise aux intéressés par l'entremise d'un circuit de télévision interne. L'application choisie pour illustrer la séance était un Lisp, langage de programmation imaginé par McCarthy et développé par son assistant Steve Russell.

¹⁵⁶ Soit littéralement le « géant pataud ». Tel était le surnom donné par les premiers hackers du M.I.T. à l'I.B.M. 704 D.P.S. installé dans le bâtiment n°26. Concernant ce point anecdotique, on pourra consulter [Lévy, 1994], pp. 8, 15, 20, 23 et 48.

¹⁵⁷ L'expression dont John McCarthy fait usage dans son article est « *trapping mode* ».

¹⁵⁸ On se souviendra ici que la politique commerciale pratiquée par la compagnie I.B.M. interdisait alors strictement aux utilisateurs des équipements qu'elle proposait à la location d'apporter à ces derniers de quelconques modifications matérielles. Toute la logistique, notamment l'entretien et les réparations des systèmes informatiques, devait impérativement être assurée par des personnels qualifiés d'I.B.M. L'accord conclu entre l'industriel et le M.I.T. devait donc être réglé grâce à une disposition administrative spécifique désignée par le sigle R.P.Q. (*Request for Price Quotation*). Cette procédure permettait à un client de l'industriel de lui soumettre une demande de modification technique concernant ses matériels standards. Après examen de la requête, I.B.M. pouvait accéder ou non à la demande particulière du client, sans pour autant lui garantir le coût de cette modification. La R.P.Q. fut mise au point suite à une demande faite par l'avionneur *Boeing*, qui désirait disposer d'un appareillage spécial permettant de raccorder un I.B.M. 704 D.P.S. à une soufflerie aérodynamique.

¹⁵⁹ Filiales industrielles du *Massachusetts Institute of Technology*.

Le principe du « *time stealing* », lequel, pour l'occasion, devait être présenté aux membres de l'assistance comme une simple ébauche de ce que pourrait être véritablement le time-sharing, était le suivant. En premier lieu, l'I.B.M. 704 du centre était placé en opération afin de traiter un lot de programmes dont le temps d'exécution individuel, selon les souvenirs de J. McCarthy, était d'environ une minute¹⁶⁰. Cette activité de *batch processing* était prioritaire sur toutes les autres tâches informatiques. Une petite application spéciale était en même temps chargée dans une zone basse de la mémoire principale du système. La fonction de ce logiciel consistait à récupérer des entrées¹⁶¹ réalisées par un opérateur à partir du télétype *Flexowriter* raccordé au mainframe, puis à charger ces dernières dans une de ses mémoires tampon (tambour magnétique, buffer). Du point de vue du fonctionnement du mainframe, cette collecte s'effectuait de façon entièrement transparente, c'est-à-dire qu'elle n'affectait en aucune manière la tâche de *batch processing* qu'il était en train de réaliser au moment même où elle avait lieu. Lorsque le traitement d'un des programmes (*job*) appartenant au lot touchait à sa fin, et avant que l'ordinateur ne commence l'exécution de l'application occupant l'emplacement suivant au sein de ce même lot, la petite application initialement chargée en mémoire principale prenait temporairement la main, récupérait toutes les entrées effectuées depuis le télétype et enregistrées jusqu'à ce point, et démarrait leur traitement. Quant celui-ci était achevé ou bien lorsque le lancement du prochain *job* dans le lot était sur le point d'être accompli, elle s'interrompait et rendait la main à la tâche prioritaire. Le cycle se répétait ainsi et pendant tout ce temps, l'opérateur travaillant sur le télétype pouvait continuer à entrer les données alphanumériques nécessaires à l'exécution du programme sur lequel il était en train de travailler sans que jamais cela ne perturbe la tâche de traitement par lots simultanément exécutée par l'ordinateur. De manière plus générale, c'est-à-dire d'une façon qui n'implique pas nécessairement que l'ordinateur sur lequel il était mis en œuvre soit en train de traiter un lot de programmes, le « *time stealing* » répondait mutatis mutandis au schéma opératoire suivant:

- Un programme A quelconque se trouve en cours d'exécution sur un ordinateur (notons encore qu'il peut très bien ne pas s'agir d'une tâche de *batch processing*).

¹⁶⁰ D'après le chercheur cette relative brièveté et la régularité qu'elle supposait facilitèrent la démonstration.

¹⁶¹ Prises une à une, ces entrées correspondaient à des caractères alphanumériques. Une fois agrégées, elles représentaient des instructions en Lisp, ou bien encore des données devant passer en traitement.

- Un programme B, dont on sait que le temps de traitement sera peu important, doit être exécuté dans les délais les plus brefs.
- L'exécution du programme A est interrompue à l'instant t et l'ensemble des données informatiques descriptives relatives à l'état de son exécution à cet instant est automatiquement enregistré sur un support d'enregistrement rapide C (par exemple une bande magnétique à haute vitesse de défilement).
- Après que ce dernier ait été chargé en mémoire centrale de l'ordinateur, l'exécution du programme B est lancée, jusqu'à achèvement total ou partiel (auquel cas le cycle, plus complexe, nécessitera d'être réitéré jusqu'à complétion).
- L'ensemble des données informatiques descriptives relatives à l'état de l'exécution du programme A à l'instant t est chargé en machine à partir du medium d'enregistrement C.
- Une fois cette restauration achevée, l'exécution du programme A est relancée exactement à partir du point où elle avait été interrompue, à l'instant t .

Si la démonstration organisée dans le courant du mois de décembre 1958 par McCarthy et Russell fut une réussite, l'implémentation de leur système de time-sharing devait quant même demeurer relativement rudimentaire. Pour que l'on puisse réellement commencer à parler de système informatique opérant en temps partagé, les concepts informatiques clefs qui avaient été mis en œuvre ici, de même que leur réalisation logicielle et leur intégration au sein du schéma global de fonctionnement de l'ordinateur, devaient encore faire l'objet d'un important travail de raffinement. Le début de l'année 1959 fut marqué par la survenance de deux événements importants. Pour commencer, le 1^{er} janvier, John McCarthy adressa à Philip M. Morse, Professeur et Directeur du M.I.T. *Computation Center*, un document intitulé « Memorandum to P.M. Morse Proposing Time Sharing ». Le sous-titre que portait ce rapport était : *A Time Sharing Operator Program for our Projected IBM 709*¹⁶². Dans cette note de quelques pages, McCarthy proposait donc de concevoir un système d'exploitation dont la spécificité résidait dans le fait qu'il devait être capable d'opérer en temps partagé. Toujours

¹⁶² On peut traduire ce sous-titre par « Un système d'exploitation en temps partagé pour notre futur I.B.M. 709 ».

dans la lignée de la motivation qui l'avait initialement amené à s'investir dans cette recherche le chercheur affirmait que cet *Operator Program*, comme il l'appelait, permettrait de réduire très notablement la durée de temps machine nécessaire à l'exécution d'une tâche donnée. Décrit dans ses grandes lignes, cet O.S. était destiné à l'ordinateur qui, sous peu, devait remplacer le mainframe 704 D.P.S. du M.I.T. *Computation Center*. En introduction de son travail le scientifique émettait l'hypothèse que ce nouveau système informatique – en l'occurrence il s'agissait de l'I.B.M. 709 *Data Processing System* – serait très vraisemblablement livré au centre de calcul aux alentours du mois de juillet 1960. A compter de la date de réception de ce rapport et à supposer que son contenu soit effectivement pris en compte de manière sérieuse par son destinataire, le M.I.T. et ceux de ses partenaires qui avaient le pouvoir d'agir ici disposeraient grosso modo d'une période d'une année et demie pour solutionner les problématiques soulevées par son auteur, c'est-à-dire en définitive concrétiser ses principales idées et recommandations. Dans le sommaire de son rapport, McCarthy émettait un certain nombre de remarques – en fait 5 - quant aux bénéfices que le centre de calcul du M.I.T. et I.B.M. pourraient tirer du développement et de la mise en place du système de time-sharing qu'il proposait. Dans cette même partie il abordait également les dispositions que l'institut de technologie devrait impérativement et immédiatement prendre pour rendre possible sa réalisation:

1. « *Nous devrions être en mesure d'effectuer une avancée majeure dans l'art d'utiliser un ordinateur en adoptant un système d'exploitation en temps partagé pour notre [I.B.M.] 709.* »
2. « *Un tel système réclamera beaucoup de travail préparatoire. Celui-ci doit commencer sans plus attendre* »
3. « *Le travail d'expérimentation utilisant la liaison entre le télétype Flexowriter et le dispositif de gestion du temps réel équipant le 704 nous sera d'une certaine utilité mais nous ne pouvons attendre trop longtemps ses résultats si nous souhaitons disposer d'un système d'exploitation en temps partagé qui soit opérationnel en juillet 1960* ».

4. « *La coopération de la société I.B.M. est ici très importante, mais celle-ci devrait tirer grand avantage de sa participation au développement de cette nouvelle manière d'utiliser un ordinateur* ».
5. « *Je pense que des personnes du M.I.T. extérieures à l'équipe du Computation Center sont susceptibles de se montrer intéressées par ce système et les problèmes d'ingénierie qu'il recouvre*¹⁶³ ».

Et le scientifique de poursuivre sa présentation en détaillant d'une part le genre d'équipements nécessaires à la mise en place d'un ordinateur travaillant en temps partagé et d'autre part les différentes difficultés soulevées par cette modalité de fonctionnement – en prenant bien soin de la distinguer de la forme très particulière de time-sharing développée pour les systèmes opérant en temps réel - ainsi que les concepts informatiques éventuellement envisageables pour les solutionner. Selon McCarthy les matériels requis pour faire de l'informatique en time-sharing étaient :

- a. « *Un terminal*¹⁶⁴ *et un dispositif d'affichage (les télétypes Flexowriters représentent une option mais il se peut qu'il existe mieux et moins cher)* ».
- b. « *Un dispositif d'interruption – nous l'aurons.* ».
- c. « *Un système d'échange pour assurer la liaison entre l'ordinateur et les instruments externes. Ceci est le problème d'ingénierie le plus substantiel, mais I.B.M. devrait le résoudre*¹⁶⁵ ».

Puis, comme il a été indiqué plus haut, John McCarthy précisait quelles étaient les dissemblances qui existaient entre le modèle de time-sharing dont il proposait ici la réalisation et celui qui était en service depuis un certain temps déjà sur des systèmes informatiques comme le *Semi Automatic Ground Environment*. D'après lui, sur les systèmes opérant en temps réel :

¹⁶³ John McCarthy, « Reminiscences on the History of Time-Sharing » in *I.E.E.E. Annals of the History of Computing*, vol. 14, n° 1, janvier-mars 1992, pp. 19-24, cf. 4^{ème} partie: *Summary*.

¹⁶⁴ L'expression employée ici par McCarthy est « *interrogation device* ».

¹⁶⁵ John McCarthy, « Reminiscences on the History of Time-Sharing » in *I.E.E.E. Annals of the History of Computing*, vol. 14, n° 1, janvier-mars 1992, pp. 19-24, cf. 3^{ème} partie: *The Problem of a Time-Sharing Operator System*.

« ...les programmes qui partageaient l'ordinateur pendant toute la durée d'une session [étaient] supposés occuper des zones prédéfinies de la mémoire¹⁶⁶ ». De la même façon, ils « [étaient] supposés être déjà exempts de bogues et avoir été écrits tous ensemble comme un système¹⁶⁷ ».

On voit donc que dans cette forme singulière de temps partagé, le code des logiciels mis en œuvre et les interactions de chacun d'entre eux avec les autres programmes et les organes de la machine sur laquelle tous se trouvaient exécutés avaient fait l'objet d'un important effort d'optimisation au cours de leur développement. Les programmes avaient été conçus ensemble, à la manière d'un tout intégré. Dans la perspective d'un fonctionnement commun au sein d'un environnement critique, les erreurs qu'avait éventuellement pu comporter leur code avaient fait l'objet d'une procédure d'éradication soigneuse. Afin de prévenir encore tout risque d'interférence – et donc tout surgissement d'un problème informatique – entre ces programmes pourtant spécialement élaborés pour travailler de concert, chacun, lorsqu'il était chargé en machine, se voyait alloué une zone mémoire réservée. Au moins pour une période de temps donnée, toutes les cellules mémoire composant cet emplacement étaient inviolables par une autre implication. Cet ensemble de précautions pris lors de l'élaboration de ces programmes et de leurs modalités d'interaction possédait certes l'avantage de rendre extrêmement stable le système informatique sur lequel ils étaient exécutés. En retour bien sûr ce système était relativement peu ouvert: on ne pouvait ainsi introduire un nouveau programme ou modifier substantiellement l'une des applications composantes sans avoir à remanier aussi la délicate totalité dont il ou elle participait. Ce qui était rendu absolument nécessaire par la nature expérimentale ou stratégique des fonctions que remplissaient à cette époque les systèmes informatiques fonctionnant en temps réel ne pouvait certainement pas être envisagé dans le cadre de la future installation informatique du M.I.T. *Computation Center*. Le principe du centre de calcul en time-sharing impliquait que des utilisateurs aux objectifs souvent disparates fassent concurremment exécuter par une même machine des programmes de nature hétérogène – pas toujours les mêmes évidemment – développés indépendamment les uns des autres (c'est-à-dire non conçus dans une perspective d'intégration). Aucune mesure de protection préventive, comme par exemple l'allocation anticipée de zones mémoire réservées pour chacune des applications chargées en machine ne

¹⁶⁶ Ibid.

¹⁶⁷ Ibid.

pouvait par conséquent être envisagée dans de telles conditions. Le système de time-sharing que McCarthy avait ici en tête se devait donc d'être particulièrement souple et robuste, de sorte à pouvoir fonctionner parfaitement quelles que soient les caractéristiques des applications qui seraient présentées au futur ordinateur 709. Mis à part le fait que leur code informatique pouvait très bien ne pas avoir été expurgé de toutes ses imperfections avant qu'on ne procède à leur exécution, chacun de ces programmes représentait en effet une entité logique créée séparément et caractérisée par un ensemble d'attributs propres (une fonction et une structure spécifiques, une taille donnée, etc.). Comme devait le remarquer McCarthy, dans ce cas précis, il s'agissait donc de « *s'occuper d'une population continûment changeante de programmes, dont la plupart recelait des erreurs*¹⁶⁸ ». Aussi l'*Operator Program* dont il était question ici devait-il toujours pouvoir remplir son rôle au sein d'un environnement informatique variable et incertain, c'est-à-dire en définitive être en permanence capable de distribuer de manière dynamique et optimale les ressources de l'ordinateur sur lequel il était installé, en fonction de l'évolution de la situation qui était rencontrée. Le chercheur se livrait ensuite à une identification des principales difficultés techniques liées à la mise au point d'un pareil système de time-sharing, non sans systématiquement proposer des éléments de réflexion susceptibles de contribuer à les résoudre. Au nombre de trois ces problèmes (et leurs possibles moyens de résolution), étaient les suivants :

1. « *Allocation automatique des zones de la mémoire entre les programmes. Ceci nécessite que les programmes soient assemblés sous une forme autorisant [ce type de] redistribution et qu'ils possèdent un entête qui permette à l'Operator Program de les organiser [dynamiquement], eux, ainsi que leurs données et leur utilisation des sous-routines partagées* ».
2. « *La récupération [reprise des procédures] à partir des interruptions et des processus travaillant en boucle. Les meilleures solutions pour ces problèmes exigent :*
 - *que l'on transforme les instructions d'arrêt en instructions de « piégeage ». Ceci ne nécessite qu'une transformation mineure de la machine (au moins sera-ce le cas sur le 704).*

¹⁶⁸ Ibid.

- *que l'on dote l'ordinateur d'une horloge externe opérant en temps réel ».*
3. *« Empêcher qu'un mauvais programme [i.e. une application boguée] ne détruise les autres programmes :*
- *Ceci pourrait être résolu assez facilement avec un champ mémoire « piège » bien que la modification [matérielle nécessitée ici] puisse ne pas être réalisable. Sans cela, il existe des solutions logicielles qui, si elles sont moins satisfaisantes, pourraient néanmoins être assez bonnes. Elles incluent :*
 - *« des « versions » [de langages de programmation] peuvent être écrites de façon à ce que les programmes qu'elles produisent ne puissent outrepasser les limites des zones d'enregistrement qui leur ont été assignés. Une modification tout à fait mineure permettrait de faire cela avec le Fortran ».*
 - *« des checksums¹⁶⁹ pourraient être utilisées dans le cas des programmes écrits en langage machine ».*
 - *« On peut favoriser le développement de techniques de programmation qui rendent peu probables la destruction des autres programmes. On tend à s'inquiéter exagérément à propos de cette question. Ce risque peut en fait être ramené à celui, actuel, de voir un programme anéanti par*

¹⁶⁹ Par le terme « checksum » on désigne un procédé informatique classique, basé sur un système d'addition de chiffres, qui est employé pour vérifier si une erreur est apparue lors d'un transfert de données ou dans le code d'un programme.

une erreur commise par la machine ou un opérateur¹⁷⁰ ».

Les trois problèmes majeurs identifiés par John McCarthy représentaient en quelque sorte des points de passage difficiles mais néanmoins obligés pour qui entendait sérieusement concevoir un système d'exploitation capable de gérer une multitude de procédures informatiques lancées simultanément par différents utilisateurs, sur le même ordinateur. Quels que puissent être les modèles informatiques que l'on imaginerait afin d'implémenter un dispositif en temps partagé, ceux-là devraient donc impérativement prendre en compte ces points de résistance et intégrer des éléments logiciels capables de les réduire. Pour claire qu'ait été sa vision des difficultés liées à l'implémentation de cette technologie en gestation, et pertinentes aussi les pistes de travail qu'il avançait afin de les solutionner, le time-sharing ne constituait cependant pas la préoccupation professionnelle fondamentale de John McCarthy. Quoique lié de manière organique aux ordinateurs, à leur architecture et à leur programmation, son centre d'intérêt premier et prioritaire différait de ces questions d'ordre foncièrement technique.

Le second évènement qui devait marquer le début de l'année 1959 avait précisément à voir avec ce dernier fait. C'est en effet ce moment que Philip M. Morse choisit pour demander à un John McCarthy de plus en plus accaparé par ses recherches en intelligence artificielle¹⁷¹ s'il serait d'accord pour confier une partie au moins de ses responsabilités dans le domaine du développement du time-sharing à Herbert M. Teager. Ce jeune professeur assistant en électronique venait tout juste de prendre ses nouvelles fonctions au *Department of Electrical Engineering* et il faisait résolument montre d'un très vif intérêt concernant ce secteur de recherches. A compter de cette date, c'est donc Herbert M. Teager qui reprit officiellement les travaux sur l'informatique en temps partagé que John McCarthy avait entamés depuis qu'il

¹⁷⁰ Ibid.

¹⁷¹ Au mois de mai 1958, John McCarthy et Marvin L. Minsky avaient proposé à Jerome Wiesner, le Directeur du M.I.T. *Research Laboratory in Electronics* (R.L.E.), de démarrer un projet de recherche en intelligence artificielle (à vrai dire il s'agissait du premier projet de ce genre dans l'histoire de la prestigieuse institution). Les deux hommes qui se connaissaient depuis longtemps et avaient l'un et l'autre joué un rôle déterminant dans la mise en place et la conduite du *Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence* (avec Nathan Rochester d'I.B.M. et Claude E. Shannon des *Bell Labs.*), obtinrent de manière quasiment immédiate l'aval du Directeur du R.L.E. Peu de temps après avoir reçu l'accord de J. Wiesner ils créèrent donc l'*Artificial Intelligence Group*. Précurseur de l'*Artificial Intelligence Laboratory* (entité que l'on connaît certainement beaucoup mieux sous le nom d'*A.I. Lab.*), l'*Artificial Intelligence Group* devait disposer à ses débuts d'un budget de fonctionnement relativement confortable (en l'occurrence 50000 dollars). La somme d'argent allouée à l'*A.I. Group* provenait intégralement des caisses du R.L.E., une structure dont on sait que l'essentiel de ses fonds était principalement d'origine militaire. M. L. Minsky et J. McCarthy assurèrent la co-direction de l'*A.I. Group* jusqu'au départ de ce dernier pour l'Université de Stanford, en 1962. « »

était arrivé au M.I.T., en 1957. Ce transfert de responsabilités, pour ne pas dire cette passation de pouvoir, ne signifiait pas pour autant que ce dernier se désengageait complètement de la question du time-sharing. Cependant, à partir de ce point, son implication directe dans ce type de projet serait moindre et son rôle tendrait à changer de nature, revêtant notamment un aspect plus théorique et administratif qu'autrefois.

Reprenant ici un des projets de McCarthy, la première grande réalisation concrète d'Herbert M. Teager consista à concevoir pour le nouvel I.B.M. 7090 du M.I.T. *Computation Center* le système de time-sharing à trois télétypes *Flexowriter*¹⁷² que le co-fondateur de l'A.I. Group avait imaginé quelque temps après son arrivée au *Massachusetts Institute of Technology*. Si l'*Office of National Research* et la *National Science Foundation* apportèrent leur contribution financière à ce programme, les choses ne se passèrent cependant pas sans difficultés pour Teager. Initialement celui-ci se heurta à de notables résistances de la part de la société I.B.M. Dans un premier temps au moins, les responsables de l'entreprise devaient en effet voir d'un assez mauvais œil ce projet qui nécessitait que l'on apporte de nombreuses modifications à des équipements qui comptaient parmi les plus performants et les plus récemment introduits sur le marché. Par la suite toutefois, la position de l'industriel s'assouplit et à l'immense surprise de John McCarthy¹⁷³, *Big Blue* finit par accéder aux différentes requêtes qu'avait formulées son successeur. Concrètement, cela se traduisit par une augmentation tout à fait significative de la capacité nominale de la mémoire principale du mainframe 7090 D.P.S. Afin que celle-ci soit en mesure de supporter sans difficulté les très nombreux processus informatiques nécessités et/ou gérés par le système de time-sharing, on ajouta ainsi pas moins de 32768 mots supplémentaires¹⁷⁴ à la structure d'enregistrement interne de l'ordinateur (laquelle comportait déjà un nombre équivalent de mots). Ce module mémoire additionnel n'était pas une unité à tores 7302 *Model 1* standard. A la demande de Teager et suivant les recommandations faites par McCarthy dans son mémorandum de janvier

¹⁷² Dans « Reminiscences on the History of Time Sharing », John McCarthy affirmait être au courant du fait que H. M. Teager avait entrepris ces travaux de transformation sur le nouvel I.B.M. 7090 reçu par le centre de calcul du M.I.T. En revanche il disait ne pas savoir si son successeur avait effectivement mené cette tâche à son terme (la période où tout cela est advenu correspond grosso modo au moment où McCarthy est parti pour l'Université de Stanford). Cela semble bien avoir été le cas. Fernando J. Corbató, Marjorie Merwin Daggett et Robert C. Daley ont donné une description générale de l'I.B.M. 7090 modifié par Teager et son équipe dans un article publié en mai 1962 (« Experimental Time-Sharing System », *An Experimental Time-Sharing System for the IBM 7090, Computation Center, Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, Massachusetts, 2 mai 1962, p. 4.). Cet article est librement consultable sur le site de l'*Electrical Engineering & Computer Science Department* de l'Université d'Harvard : <http://www.eecs.harvard.edu/cs261/papers/corbato62.pdf>

¹⁷³ C'est là un fait dont l'intéressé fait mention dans son article « Reminiscences on the History of Time Sharing ».

¹⁷⁴ Sur cet ordinateur la longueur des mots informatiques était de 36 bits.

1959, il avait été pourvu par les ingénieurs d'I.B.M. d'une capacité de protection et de réallocation dynamique des programmes.

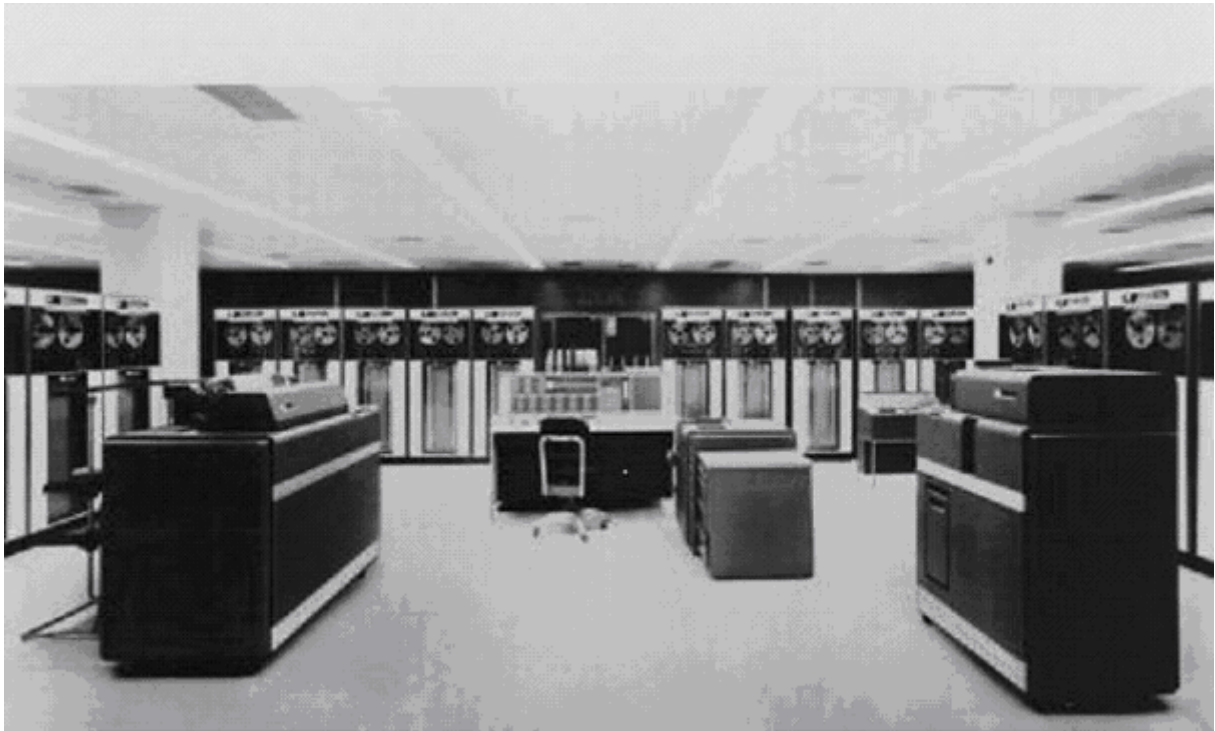


Photo 1 : un mainframe I.B.M. 7090 *Data Processing System* , tel que celui qui fut installé au M.I.T. *Computing Center* au début des années soixante. *Image Courtesy of the IBM Corporation.*

Le fait qu'I.B.M. accepte finalement d'apporter les transformations qu'il demandait à l'ordinateur 7090 du centre de calcul du M.I.T. ne devait toutefois pas signifier qu'Herbert M. Teager en avait terminé avec les complications. Ses pairs du centre de calcul du M.I.T., y compris McCarthy semble-t-il, estimaient en effet que le projet du jeune professeur assistant, non content d'être ambitieux - trop sans doute – manquait dramatiquement de précision. Pour Teager, le scepticisme affiché par quelques-uns de ses collègues marqua les débuts d'une situation d'isolement qui par la suite ne cessa de s'amplifier.

Au cours de l'année 1960 et alors qu'ils se préparaient à célébrer le centenaire de la création de la prestigieuse institution, les responsables du *Massachusetts Institute of Technology* établirent une commission d'études composée d'Albert G. Hill, Directeur du M.I.T. *Lincoln Laboratory*, de Philip M. Morse, Directeur du M.I.T. *Computing Center*, et du Professeur Robert M. Fano. Mise en place à l'initiative de Gordon Brown, le Doyen de l'*Electrical Engineering Department*, les missions principales de ce groupe de travail devaient consister d'une part à encourager et développer les usages de l'ordinateur au sein du M.I.T. et d'autre part à fournir une appréciation des besoins futurs de l'établissement en matière de

ressources informatiques. Cette commission créa à son tour un groupe d'étude chargé de l'examen des questions d'ordre technique. Baptisé *Long Range Computation Study Group* (L.R.C.S.G.), c'est-à-dire littéralement « Groupe d'étude sur l'informatique à long terme », celui-ci était présidé par Herbert M. Teager et réunissait John McCarthy et Marvin L. Minsky, co-directeurs de l'A.I. Group, Fernando J. Corbató, Directeur Associé du *Computation Center* et Wesley A. Clark, chercheur membre du *Lincoln Laboratory* et futur co-concepteur du mini-ordinateur LINC (*Laboratory INstrument Computer*). Etaient également associés à ce comité technique Douglas Ross¹⁷⁵, mathématicien cofondateur du *Computer Application Group* de l'*Electrical Engineering and Computer Sciences Department* et Jack B. Dennis, maître assistant au même *Electrical Engineering and Computer Sciences Department* et programmeur principal de l'ordinateur TX-0¹⁷⁶ du *Research Laboratory in Electronics*.

La première réunion du *Long Range Computation Study Group* (avril 1960) vit émerger un consensus fort parmi ses membres: tous s'accordaient en effet parfaitement à reconnaître que le time-sharing représentait la solution idéale pour l'informatisation future du M.I.T. Toutefois, en même temps que se dégageait cet assentiment partagé devait aussi se faire jour une profonde dissension au sein du comité. Si le concept de time-sharing remportait ici l'ensemble des adhésions, les avis ne manquaient en effet pas de diverger singulièrement quant aux modalités qui seraient idéalement à son implémentation. Sur ce point le problème présentait en fait un double aspect. D'une part, il fallait déjà s'entendre sur une solution informatique à long terme. Ce serait celle qui bien entendu conviendrait le mieux aux besoins projetés de l'institut de technologie. D'autre part avant que ladite solution – en l'espèce il s'agissait de l'informatique opérée en temps partagé - ne puisse effectivement être mise en

¹⁷⁵ Douglas Ross avait fait partie des tout premiers programmeurs du Whirlwind, au début des années cinquante. En 1959, il s'était illustré en créant l'*Automatically Programmed Tool*, langage et système de programmation permettant la programmation automatique et la conduite numérique de machines outils. Douglas Ross est par ailleurs connu pour le rôle clef qu'il a joué dans le développement du *Computer-Aided Design* (C.A.D.), c'est-à-dire la création assistée par ordinateur.

¹⁷⁶ Rappelons que le *Lincoln Laboratory* prêta à long terme le TX-0 au *Research Laboratory in Electronics* au cours du mois de juillet 1958. A l'origine, nous nous en souvenons, le TX-0 était un prototype d'ordinateur spécialement conçu par le M.I.T. *Lincoln Laboratory* afin de tester une unité centrale de traitement transistorisée ainsi qu'une mémoire à tores de ferrite de grande capacité. Cet ordinateur était par ailleurs équipé d'un télétype *Flexewriter* qui permettait à ses utilisateurs de ne pas avoir à employer de cartes perforées pour entrer leurs programmes dans la machine. De longues bandes de papier préparées au moyen dudit télétype remplaçaient ici les habituelles cartes. Ce dispositif conférait au TX-0 une capacité d'interaction homme-machine rudimentaire: lorsqu'un programme était exécuté par le TX-0, son programmeur conservait ainsi toujours la possibilité d'agir « en ligne » sur l'un et l'autre. Quant le R.L.E. prit possession du TX-0 (ce dernier étant remplacé au *Lincoln Laboratory* par le TX-2), celui-ci était dépourvu de programmes. Dennis développa donc pour elle un certain nombre d'applications utilitaires au rang desquelles un langage assembleur et un programme de débogage (le FLIT, pour *FLexewriter Interrogation Tape*). Lorsque la société D.E.C. fit don d'un mini-ordinateur P.D.P. 1 au R.L.E., en 1960, ce sont J. B. Dennis et ses étudiants qui développèrent des extensions matérielles et logicielles spéciales, pour doter cette machine d'une véritable capacité de travail en temps partagé.

œuvre, les départements concernés du M.I.T. devraient impérativement se doter de nouveaux moyens matériels. Ceux-là permettraient à leurs personnels de procéder aux différentes batteries d'expériences et de tests qu'ils estimeraient être indispensables dans le cadre de ce projet. Acquérir des équipements informatiques « intermédiaires » dont la puissance et le caractère récent annonçaient ceux des dispositifs censés supporter le futur système de time-sharing apparaissait donc ici comme une condition absolument nécessaire à la conduite du programme. C'était précisément là que se situait le foyer d'origine du désaccord qui allait plus tard amener H. M. Teager à claquer la porte du L.R.C.S.G. En effet si tous les membres du comité admettaient sans conteste que l'achat d'un nouvel ordinateur représentait en quelque sorte un passage obligé, l'unanimité était loin de se faire quant aux possibles façons de réaliser un tel investissement. Deux factions ne devaient cesser de confronter leurs vues ici. D'abord celle, ultra minoritaire puisqu'il se trouvait en situation de complet isolement au sein du comité, d'Herbert M. Teager. La position du jeune scientifique consistait à dire que le M.I.T. devait faire l'acquisition d'un ordinateur récent, figurant déjà au catalogue d'un grand fabricant. Le second groupe, majoritaire, était emmené par John McCarthy. L'idée que le père du LISP et ceux qui le suivaient s'employaient à mettre en avant était celle qui privilégiait le développement d'un tout nouveau système informatique. Deux pistes concurrentes étaient alors évoquées pour la fabrication de cet ordinateur: soit on la réaliserait en interne, au M.I.T., soit on pourrait la sous-traiter à un grand constructeur informatique... Lors de la deuxième réunion du L.R.C.S.G., au mois de décembre 1960, aucune des deux parties en présence ne consentit à revenir sur ses positions. Herbert M. Teager présenta à nouveau ses idées en déployant cette fois devant les membres du comité technique différents arguments en faveur de l'acquisition d'un I.B.M. 7030 D.P.S. Aux yeux de McCarthy et des autres experts du comité, le choix de cette machine, loin d'être neutre, était hautement révélateur des vues par trop ambitieuses (et toujours vagues semble-t-il) que nourrissait le chercheur. En effet le *Data Processing System Model 7030* était la nomenclature civile qu'I.B.M. avait choisie pour désigner son superordinateur *Stretch*. La grande entreprise américaine l'avait conçu pour le *Los Alamos Scientific Laboratory*, après qu'elle ait essuyé un échec commercial cinglant face à son concurrent *Sperry Rand/UNIVAC* dans le cadre de l'offre de marché que l'*University of California Livermore Radiation Laboratory* avait faite pour le développement d'un ordinateur extrêmement puissant, spécialement élaboré pour l'effectuation de calculs scientifiques¹⁷⁷. Mis à part le fait que le coût de cette machine promettait d'être exorbitant (près de 8 millions

¹⁷⁷ Il s'agissait du *Livermore Automatic Research Computer* ou L.A.R.C.

de dollars), le projet de recherche de Teager fut soumis à un examen serré et encore une fois, on le jugea à la fois trop imprécis et ambitieux. Isolé et désavoué, Teager prit alors la décision d'abandonner la présidence du L.R.C.S.G., laquelle revint désormais à J. McCarthy. Deux rapports terminaux furent rédigés, le premier par Teager¹⁷⁸, le second par les rapporteurs du *Long Range Computation Study Group*¹⁷⁹. En fin de compte c'est sur le deuxième projet – celui présenté par McCarthy et la majorité des membres du comité d'étude – que se porta le choix des instances dirigeantes du M.I.T.

A ce moment précis, il existait par conséquent deux projets concurrents de système d'exploitation informatiques basés sur le principe du time-sharing au M.I.T. *Computation Center*. Celui d'Herbert M Teager, dont nous avons décrit plus haut les grandes lignes, et celui de F. J. Corbató, dont nous allons à nouveau parler sous peu. Les deux hommes avaient débuté leurs travaux respectifs sur l'I.B.M. 704 du centre de calcul à la fin des années cinquante, puis ils les avaient poursuivis en utilisant les différents successeurs de cet ordinateur à tubes : d'abord l'I.B.M. 709, puis les I.B.M. 7090 (1962) et 7094 (1963). Devait encore venir s'ajouter à ces deux efforts tout aussi précoces que déterminants le travail de développement que Jack B. Dennis avait entrepris sur le temps partagé au M.I.T. *Research Laboratory in Electronics*. Bénéficiant ici des conseils avisés de J. McCarthy, Dennis avait commencé ses recherches en utilisant l'ordinateur TX-0 que possédait le R.L.E. Le prototype prêté par le M.I.T. *Lincoln Laboratory* se révélant fort peu adapté à cette catégorie de tâches informatiques, il les avait ensuite continuées avec le mini-ordinateur P.D.P.-1 que la petite société D.E.C. avait gracieusement cédé au laboratoire de recherches en électronique, en 1960.

Quoique initié en dehors des installations du M.I.T., un quatrième et dernier programme ayant pour objectif la mise au point d'un système informatique doté d'une capacité d'opération en temps partagé était également conduit au sein de la petite firme d'ingénierie en recherche acoustique B.B.N. On sait fort bien la nature étroite des liens qui existaient entre cette société appelée par la suite à se spécialiser dans les hautes technologies informatiques et le *Massachusetts Institute of Technology*. Leo L. Beranek et Richard H. Bolt y avaient autrefois été professeurs. Quant à Robert B. Newman, le dernier des co-fondateurs de l'entreprise de consulting, il avait suivi les cours d'architecture acoustique dispensés par R.H. Bolt au cours des années quarante. Sur l'impulsion du chercheur et consultant Joseph

¹⁷⁸ Herbert M. Teager, « M.I.T. Computation - Present and Future », rapport du M.I.T., non publié, Cambridge, Massachusetts, 1961.

¹⁷⁹ Dean N. Arden et al., « Report of the Long Range Computation Study Group », rapport du M.I.T., non publié, Cambridge, Massachusetts, 1961.

C.R. Licklider, lequel était extrêmement écouté au sein de la petite firme de conseil¹⁸⁰, B.B.N. avait fait l'acquisition d'un ordinateur LGP-30¹⁸¹ au cours du dernier trimestre de l'année 1958. Avant de prendre part au projet S.A.G.E. en qualité de spécialiste du facteur humain dans le réseau militaire – donc en dernier lieu de l'interaction homme-ordinateur - J.C.R. Licklider, psychologue de formation, avait joué un rôle déterminant dans l'établissement du M.I.T. *Lincoln Laboratory*. Alors qu'en 1959 B.B.N. testait un prototype de P.D.P.-1 fourni par la jeune compagnie D.E.C., le même Licklider, inspiré par les travaux du mathématicien et père de la cybernétique Norbert Wiener¹⁸², initia une série de séminaires interdisciplinaires dont l'objectif consistait à mener une réflexion approfondie sur la notion de système. Ce travail réalisé dans le cadre d'une recherche faite pour le compte de l'*Air Force Office of Scientific Research* eut par la suite des retombées extrêmement importantes sur la conception que les membres de la communauté informatique se faisaient des relations homme-machine. Reprenant certaines des idées formulées à l'occasion de ces réunions de l'année 1959, Licklider exprima sa vision de ce que vers quoi devait à terme tendre l'informatique – à savoir une interactivité, une interdépendance et une simplification de l'usage grandement accrues - dans « Man-Computer Symbiosis¹⁸³ », un article capital publié pour la première fois au mois de mars 1960.

C'est au cours de cette même année 1960 que John McCarthy devint également consultant pour le compte de la compagnie B.B.N. Là, il présenta ses idées et les travaux qu'il avait effectués au M.I.T. sur le principe de l'informatique en time-sharing à J.C.R. Licklider

¹⁸⁰ Comme le démontre clairement le contenu d'un entretien accordé en 1996 par Leo Beranek à Janet Abbate, historienne à l'I.E.E.E. *History Center Oral History Program*. Dans le cadre de cette entrevue ce dernier devait ainsi déclarer: « After only a few months at BBN, he [J.C.R. Licklider] asked me for an allocation of money to purchase a Royal-McBee, LGP-30 computer, which could be programmed and data entered by means of a punched paper tape. Although Licklider could not tell me what he was going to do with it, I agreed to spend the \$25,000 required [...] I decided it was worth the risk to spend \$25,000 on an unknown machine for an unknown purpose because I had confidence in Lick. Not long after, we helped make beta tests on DEC's prototype PDP-1 and subsequently bought the first one for a little less than \$150,000 ». In « Leo Beranek, Electrical Engineer », an oral history conducted in 1996 by Janet Abbate, I.E.E.E. History Center, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, U.S.A. Ce document est librement consultable en ligne sur le site de l'I.E.E.E.: http://www.ieee.org/organizations/history_center/oral_histories/transcripts/beranek.html

¹⁸¹ Le LGP-30 (*Librascope General Precision 30*) était un « petit » ordinateur à tubes et tambour magnétique fabriqué par la société californienne *Royal Precision Electronic Computer Company*. Introduit sur le marché en 1956, il coûtait 40000 dollars. Son coût peu élevé, sa compacité, sa faible consommation énergétique, firent que cette machine se vendit très bien (selon les estimations diversement disponibles son fabricant écoula en effet entre 300 et 500 exemplaires du LGP-30).

¹⁸² En 1948 J.C.R. Licklider, alors encore enseignant à Harvard, avait assisté aux réunions du cercle de Wiener en compagnie de ses collègues Walter A. Rosenblith et Fred Webster.

¹⁸³ Joseph C.R. Licklider, « Man-Computer Symbiosis », in I.R.E. *Transactions on Human Factors in Electronics*, vol. HFE-1, mars 1960, p. 4-11. Ce document a fait l'objet d'une nouvelle publication in *Digital Systems Research Center*, « In Memoriam: J.C.R. Licklider 1915-1990 », Palo Alto, Californie, *Digital Equipment Corporation*, Rapport de recherche n°61, 7 août 1990, pp. 1-19. Cet article peut être consulté et téléchargé sur internet. On le trouvera notamment aux adresses suivantes : <http://www.memex.org/licklider.pdf> et <http://gatekeeper.dec.com/pub/DEC/SRC/research-reports/abstracts/src-rr-061.html>.

et Edward Fredkin. Très intéressé par les réalisations antérieures de McCarthy, Edward Fredkin – ancien pilote de chasse de l’U.S.A.F. qui en 1956 s’était vu réaffecté au M.I.T. *Lincoln Laboratory* par l’armée de l’air américaine avant d’accepter finalement un poste chez Bolt, Beranek & Newman - proposa alors de transformer le D.E.C. P.D.P.-1 que possédait désormais la société d’ingénierie afin de lui permettre de fonctionner en temps partagé. Cette idée rencontrant un écho favorable auprès des dirigeants de B.B.N., Edward Fredkin prit alors contact avec Ben Gurley, l’ingénieur en chef de D.E.C qui avait imaginé l’architecture du P.D.P.-1, pour lui proposer de concevoir les différents équipements nécessaires à l’accomplissement de cette nouvelle fonction. La *Digital Equipment Corporation* et Ben Gurley acceptèrent le principe de cette collaboration et réaliseront les matériels demandés par B.B.N. Edward Fredkin et John McCarthy, eux créeront différents programmes pour le mini-ordinateur P.D.P.-1, dont un assembleur, le F.R.A.P. (pour *FRedkin Assembly Program*) et *Colossal Typewriter*, un éditeur de textes développé en 1961-62 par McCarthy et Roland Silver, un employé de B.B.N.

Le lancement de ce nouveau projet de time-sharing – le quatrième à être effectivement démarré au cours de la période 1957-61 – marquera un tournant décisif pour la société B.B.N. A partir de ce moment précis la « troisième université¹⁸⁴ » tendra en effet à se spécialiser dans les technologies de l’informatique et, ne cessant dès lors plus de gagner en renommée, elle continuera à recruter ses collaborateurs (permanents ou occasionnels) parmi les meilleurs chercheurs de la discipline¹⁸⁵.

Les années 1960-61 virent encore se produire plusieurs événements séminaux, d’ordre théorique et/ou prospectif, qui contribuèrent à amplifier davantage l’intérêt certain que les universités, les fabricants d’ordinateurs, les forces armées et quelques sociétés commerciales, prêtaient déjà de plus en plus aux principes du temps partagé et de l’informatique distribuée. Au début du mois d’avril 1961, le *Massachusetts Institute of Technology* célébra son centenaire. A cette occasion, le mathématicien, économiste et informaticien Martin Greenberger mit sur pied une importante série de conférences sur le thème de « l’ordinateur et du futur ». Intitulé *Centennial Symposia on Management and the Computer of the Future*, ce cycle d’interventions vit se succéder sur l’estrade une dizaine de conférenciers, tous plus

¹⁸⁴ Pour reprendre ici le titre du troisième chapitre de *Where Wizards Stay Up Late: The Origins of the Internet*, ouvrage originellement paru chez *Simon & Schuster* en 1996 (réédité chez *First Touchstone Edition* en 1998) que Katie Hafner et Matthew Lyon ont consacré aux origines du réseau des réseaux informatiques. Le surnom de « troisième université » était quelquefois donné à la société d’ingénierie B.B.N. tant elle regroupait en son sein de chercheurs et d’étudiants brillants, tous évidemment issus de l’une ou de l’autre des deux universités « restantes », à savoir Harvard et le M.I.T.

¹⁸⁵ Y compris dans le champ naissant de l’intelligence artificielle puisque après John McCarthy, Marvin L. Minsky accepta lui aussi un poste de consultant chez B.B.N.

renommés les uns que les autres. Priront ainsi tour à tour la parole le physicien et nouvelliste britannique Sir Charles Percy Snow¹⁸⁶ ; l'ingénieur électronicien John Pierce des *Bell Telephone Laboratories* (celui-ci avait conçu *Telstar 1*, le tout premier satellite de communication actif qui serait lancé le 10 juillet 1962 de Cape Canaveral par un vecteur de type Delta) ; Jerome Wiesner, Directeur du M.I.T. *Research Laboratory of Electronics* et désormais conseiller scientifique du Président J. F. Kennedy ; le Professeur John G. Kemeny¹⁸⁷ (*Dartmouth Mathematics Department*), ancien du projet Manhattan, collaborateur de John von Neumann et Richard P. Feynman, et futur créateur, avec Thomas E. Kurtz, du *Dartmouth Time-Sharing System* (1963-64) et du langage de programmation BASIC (1964) ; le Professeur Alan J. Perlis¹⁸⁸, actuel Président du *Department of Mathematics* du *Carnegie Institute of Technology* (C.I.T.), diplômé du M.I.T., ancien du projet *Whirlwind* (1948-49) et de l'*Aberdeen Proving Ground Ballistic Research Laboratory* (1951), il avait dirigé le *Computing Laboratory* de la *Purdue University* (1952-56) avant de devenir Directeur du *Computation Center* du C.I.T. (1956-60) et de prendre part pendant cette même période à l'élaboration du langage de programmation de haut de niveau ALGOL ; le Professeur Robert M. Fano, membre influent du M.I.T. *Department of Electrical Engineering and Computer Science* et de la commission d'étude sur les besoins informatiques futurs de l'Institut de Technologie du Massachusetts ; le Docteur Joseph C.R. Licklider, ancien chercheur au *Psycho-Acoustics Laboratory* de l'Université d'Harvard, cofondateur du M.I.T. *Lincoln Laboratory* et membre du M.I.T. *Electrical Engineering Department*, auteur du fameux article « Man-Computer Symbiosis » et Vice-président (depuis 1957) de la société de conseil en

¹⁸⁶ La participation de l'auteur de *The Two Cultures and the Scientific Revolution* à ce symposium sur l'ordinateur peut se comprendre de deux façons, par ailleurs tout à fait complémentaires l'une de l'autre. D'abord parce que l'évènement historique réunissait des chercheurs d'horizons et de disciplines divers dont certains, tels Wiener ou Licklider, avaient fait de la transdisciplinarité et de l'ordinateur des outils fondamentaux de leur recherche. Un pareil contexte était donc particulièrement opportun pour considérer la question de la possibilité d'un dialogue véritable entre spécialistes, c'est-à-dire finalement la question de l'existence d'un terrain conceptuel et langagier interdisciplinaire mutuellement assimilé et clairement partagé. Ensuite parce que *Scientists and Decision Making* - l'intervention de Pierce - avait pour objectif de réfléchir sur la place qu'occupait le scientifique, en tant que spécialiste ou expert de sa discipline, dans le processus de prise de décision officielle. Cette thématique ayant directement à voir ici avec l'ordinateur, elle concernait désormais la quasi-totalité des champs de la recherche, y compris et surtout les plus sensibles, comme le secteur du nucléaire (civil et militaire) et le domaine de l'aérospatiale. Pierce et les autres avaient bien conscience de vivre une révolution scientifique majeure dont l'ampleur et les conséquences, supputaient-ils, pourraient être au moins aussi importantes que l'avaient été celles de la première révolution industrielle. Aussi espéraient-ils que les nouvelles problématiques amenées par l'ordinateur seraient traitées par les autorités et la société avec tout le sérieux nécessaire et défendaient-ils également l'idée d'un élargissement de la participation des scientifiques aux processus décisionnels, affirmant qu'un accroissement du nombre des experts consultés permettrait de réduire les risques d'erreur.

¹⁸⁷ J.G. Kemeny devait s'intéresser ici à la manière dont l'ordinateur pourrait permettre de concevoir la librairie du futur.

¹⁸⁸ Dans son intervention Alan J. Perlis abordait le thème de la transformation du monde de l'enseignement supérieur et de la recherche par l'ordinateur.

ingénierie Bolt, Beranek et Newman. Enfin, *last but not least* comme ont coutume de dire les américains, les pères de la cybernétique et de la théorie mathématique de l'information, Norbert Wiener (M.I.T. *Mathematics Department*) et Claude E. Shannon (*Bell Telephone Laboratories/M.I.T. Mathematics Department*), furent également conviés à venir s'exprimer ici sur le thème du devenir de l'ordinateur lors de cette conférence.

Un point de convergence déterminant, une synergie d'idées cruciale commença à se dessiner en ce haut lieu des sciences et de la technologie nord-américaine, regardant la forme qu'il conviendrait très sûrement de conférer à l'avenir au schéma de relations existant entre l'ordinateur et l'être humain. Les points de vue exprimés notamment par Snow, Licklider et Wiener différaient quelque peu dans leur tournure - puisque les sujets tour à tour abordés par ces scientifiques de renom s'inscrivaient certes sur un fond thématique commun mais n'étaient pas exactement les mêmes – cependant tous manifestaient l'idée selon laquelle il était désormais nécessaire d'œuvrer à la définition et à la mise en place d'un nouveau modèle de l'informatique et de ses pratiques. Cette manière inédite de concevoir les rapports homme/machine reposait essentiellement sur les trois grandes idées suivantes :

1°) Il s'agissait d'abord, en développant toutes les interfaces matérielles et logicielles nécessaires à cela, de placer véritablement l'ordinateur au service de l'homme pour que ce formidable outil de traitement de l'information puisse pleinement le seconder dans l'exécution de ses tâches, l'aider dans le processus de son développement intellectuel, et, comme vecteur de partage et de transfert informationnel, contribuer aussi à faciliter grandement les communications interhumaines¹⁸⁹. S'inscrivant dans la droite continuité de la ligne de pensée que Vannevar Bush avait ouverte en juillet 1945 avec son article visionnaire « As we may think », la conception que J.C.R. Licklider se faisait de l'informatique future et à laquelle des chercheurs comme Douglas C. Engelbart ou Ivan E. Sutherland ne tarderaient pas à participer avec un succès certain, était caractérisée par son approche résolument « symbiotique ». En d'autres termes une volonté forte se trouvait ici à l'œuvre qui ambitionnait d'accroître l'interactivité et l'accessibilité des machines informatiques de manière à maximaliser le degré d'intégration qui était susceptible d'exister entre ces systèmes électroniques et leurs utilisateurs. Loin de la pratique du *batch processing* qui coupait complètement ce dernier de la machine en faisant la part belle à un petit clergé d'experts choisis, l'abord proposé par Licklider entendait instaurer un partenariat, voire une sorte de mutualisme cognitivo-

¹⁸⁹ Ce point supposait que des réseaux informatiques soient établis et que l'on dispose d'ordinateurs et de périphériques capables d'opérer en time-sharing.

technologique généralisé, entre l'humain et l'ordinateur. Il s'agissait là de perspectives extraordinairement innovantes qui, par la suite, devaient être appelées à jouer un rôle essentiel dans le processus de diffusion de l'ordinateur au sein de l'espace social.

2°) L'ordinateur, aussi puissant, universel et prometteur qu'il puisse être, était et demeurait une machine. Aussi avertissait Wiener, convenait-il de ne pas s'en remettre aveuglément à lui. Le fait que les instruments informatiques soient capables de soulager l'homme de certaines de ses tâches, à commencer bien sûr par les plus rébarbatives et/ou les plus complexes, avec toute l'efficacité qu'on leur connaissait, représentait une chose éminemment appréciable. Toutefois, cela ne dispensait aucunement l'être humain du devoir de soumettre sa fascinante création à une surveillance conjuguant minutie et constance. Selon le père du courant cybernétique l'utilisation grandissante de l'ordinateur ne supprimait pas la nécessité de l'exercice de la pensée, tout au contraire. Le bon usage de cet instrument au mode opératoire algorithmique, c'est-à-dire en dernier lieu mécanique, *exigeait* de l'intelligence. Il exigeait même plus d'intelligence. En conséquence l'homme devait impérativement rester « dans la boucle » et, pour ainsi dire, ne jamais cesser d'accompagner la machine.

3°) Les sciences actuelles et leurs multiples applications technologiques se trouvant désormais renforcées et accélérées de façon tout à fait impressionnante par la puissance de l'ordinateur, toute décision importante les regardant elles et leurs possibles conséquences sur l'ordre politico social devrait (idéalement) être prise de manière *démocratique*, c'est-à-dire être prise collégalement, par une assemblée regroupant non seulement les représentants des autorités compétentes mais aussi un nombre si possible important de spécialistes reconnus pour leur expérience et leurs capacités dans les disciplines regardant les questions examinées.

Les différentes perspectives et pistes de réflexion ouvertes par ces penseurs devaient trouver leur pleine expression technologique durant la période des années soixante (grâce aux incessants progrès enregistrés dans le domaine de la miniaturisation électronique, à la montée en puissance des mini-ordinateurs, du time-sharing, des réseaux, des interfaces et des périphériques informatiques ergonomiques, des langages de programmation réellement accessibles, etc.). Leur convergence graduelle mais irrépressible, sur fond de crise militaire au Vietnam et de climat social de plus en plus porté à la contestation politique, allait quant à elle favoriser l'émergence d'une nouvelle informatique – nommée la troisième – caractérisée

notamment par une forte décentralisation, une volonté affirmée d'employer les nouveaux moyens informatiques pour permettre la libre circulation de l'information au sein de la société, une tendance marquée de l'individu à s'approprier l'ordinateur non seulement pour lui-même mais aussi comme instrument destiné à servir ses propres fins politiques et idéologiques, et l'émergence d'une classe d'utilisateurs – il s'agira d'abord de hackers ou/et de personnes issues de la communauté des radioamateurs - extrêmement compétents dans les domaines de l'électronique et de la programmation. Nous reviendrons sur la question des conditions de possibilité de cette révolution informatique ainsi que sur les circonstances de son déroulement un peu plus tard. Pour l'heure, il nous faut faire retour ici à notre propos, c'est-à-dire revenir au symposium organisé en avril 1961 par Martin Greenberger, à l'occasion de la célébration du centenaire du *Massachusetts Institute of Technology*.

John McCarthy, qui occupait alors la fonction de co-directeur du M.I.T. *Artificial Intelligence Group* et venait de succéder à Herbert M. Teager à la tête du M.I.T. *Long Range Computation Study Group* ne faisait pas partie des orateurs prévus à l'origine pour cette conférence. Le désistement inopiné de l'un d'entre eux amena cependant les organisateurs de l'évènement à se tourner vers le concepteur du langage LISP dans le but de savoir si celui-ci serait d'accord pour remplacer au pied levé le conférencier défaillant. McCarthy accepta ici la proposition qui lui était faite et, prenant la parole en qualité de membre du comité de réflexion sur les futurs besoins du M.I.T. en moyens informatiques, il choisit d'exposer à l'assemblée les lignes principales de ce qui constituait en quelque sorte son second cheval de bataille après l'intelligence artificielle, c'est-à-dire l'informatique en temps partagé. Bien qu'il fit clairement référence ici à la conférence que Christopher Strachey avait prononcée en juin 1959 à l'occasion de l'*International Conference on Information Processing* – ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, le sens exact que les deux hommes prêtaient à la notion de time-sharing différait quelque peu – la présentation de John McCarthy, en faisant la lumière sur les équipements et protocoles logiciels qui sous-tendaient le temps partagé et en insistant aussi sur les formidables possibilités informatiques recelées par ce nouveau mode opératoire, concourut très fortement à populariser ce thème. Le fait que l'assistance compte dans ses rangs plusieurs savants illustres, autrement dit autant d'acteurs et de décideurs influents au sein de la communauté scientifique américaine, permit également de conférer ses lettres de noblesse au principe du time-sharing.

La période où se déroulèrent les cérémonies de commémoration du centenaire du *Massachusetts Institute of Technology* correspondit également à celle où le Professeur

Fernando J. Corbató, assisté de deux des membres de son équipe¹⁹⁰, démarra ses travaux sur le time-sharing au M.I.T. *Computation Center*. Se conformant ici aux recommandations exprimées dans le rapport remis à Albert G. Hill par les membres du *Long Range Computation Study Group* - exception faite d'Herbert Teager s'entend - le chercheur et ses collaborateurs commencèrent à travailler au développement d'un système d'exploitation en temps partagé expérimental. La mise au point de cet *operating system* fut entreprise et réalisée par F. J. Corbató sur l'I.B.M. 709 du *Computation Center* au cours d'un laps de temps s'étendant grosso modo du printemps 1961 au printemps de l'année suivante. Cette période de l'année 1962 vit en effet le constructeur I.B.M. livrer et installer un exemplaire de son mainframe modèle 7090 - un ordinateur 36 bits à C.P.U. transistorisé et mémoire centrale à tores de ferrite - au centre de calcul du M.I.T. Assez rapidement, Corbató et ses collaborateurs écrivirent une version amendée de leur système d'exploitation afin que celui-ci puisse fonctionner sur la nouvelle machine. L'I.B.M. 709, l'I.B.M. 7090, puis l'I.B.M. 7094 - c'est-à-dire l'ordinateur que le fabricant livra au M.I.T. pendant l'année 1963 en remplacement de son modèle 7090 - étaient des systèmes informatiques configurés à l'origine pour travailler selon le régime opérationnel privilégié par I.B.M. et bon nombre de ses clients institutionnels, commerciaux et industriels, à savoir le traitement par lots. Or nous l'avons vu, c'est principalement le sentiment d'insatisfaction provoqué par les lourds défauts inhérents à la méthode du *batch processing* qui conduisit des scientifiques comme John McCarthy à tenter d'imaginer une solution informatique alternative.

Il était bien entendu évident que pendant que Corbató effectuait ses travaux et ses expériences sur le time-sharing, l'ordinateur du M.I.T. *Computing Center* devait impérativement continuer à travailler comme à l'accoutumée, c'est-à-dire à traiter de nombreux programmes par lots. La machine devait donc conserver un rendement élevé ce qui signifiait que les ralentissements qu'elle était susceptible de subir devaient rester aussi limités que possible. Ce faisant et puisqu'il n'était absolument pas envisageable de consacrer l'intégralité des ressources d'un mainframe aux seules recherches sur l'informatique en temps partagé, le mode opératoire principal - ou si l'on préfère par défaut - des différents ordinateurs successivement placés en service au centre de calcul du M.I.T. demeura le *batch processing* jusqu'à ce que le time-sharing devienne une réalité effective. Pour F. J. Corbató cet état de choses signifiait principalement que son programme de gestion du temps partagé devait nécessairement posséder la capacité de cohabiter en machine avec le système d'exploitation

¹⁹⁰ Ces deux chercheurs du M.I.T. *Computation Center* étaient Marjorie M. Daggett et Robert C. Daley.

de base de l'ordinateur – en l'occurrence il s'agissait du *Fortran-Fap-BSS Monitor System* ou F.M.S. - sans que jamais cela n'entraîne pour ce dernier de perturbations véritablement nuisibles. Une conséquence notable de cette contrainte de compatibilité logicielle fut le nom que Corbató choisit de donner à son système. Il le baptisa en effet *Compatible Time-Sharing System*¹⁹¹ (C.T.S.S.), ce qui en français peut être traduit par l'expression « système compatible en temps partagé ».

La toute première démonstration du *Compatible Time-Sharing System* eut lieu sur l'I.B.M. 709 du M.I.T. *Computation Center* au cours du mois de novembre 1961. Il s'agissait là encore d'une version extrêmement peu aboutie du C.T.S.S. mais pour rudimentaire qu'elle ait pu être, elle était stable et permit à trois opérateurs interactifs¹⁹² et un utilisateur en mode *batch* de se partager simultanément les ressources du mainframe pendant tout le temps que dura l'exercice. Au cours de cette expérience les temps d'attente utilisateurs constatés furent de l'ordre d'une à deux minutes, toutefois les importantes améliorations apportées par la suite au C.T.S.S. permirent de réduire ce délai à deux ou trois secondes seulement. Pour nous autres, modernes usagers de l'ordinateur personnel désormais habitués à des fréquences d'opération supérieures à 3 gigahertz, ces temps de latence ne peuvent manquer de paraître interminables. Aussi, pour qu'elles puissent véritablement faire sens à notre endroit, ces minutes et ces secondes doivent impérativement être mises en regard des heures, voire des jours d'attente que le traitement par lots imposait littéralement et systématiquement à cette époque. Dans des circonstances comme celles-ci, il est évident que le gain de temps permis par un système d'exploitation tel que le C.T.S.S. était formidablement élevé. F. J. Corbató présenta pour la première fois le *Compatible Time-Sharing System* en mai 1962, à l'occasion de la *Spring Joint Computer Conference* de San Francisco. Dans le début de son intervention sobrement intitulée « An Experimental Time-Sharing System », le conférencier décrivait ainsi dans leurs grandes lignes les principes directeurs de son O.S. tout en donnant à son auditoire quelques détails techniques d'ordre général à propos de l'informatique en temps partagé :

« La technique de base pour un système en time-sharing consiste à avoir de nombreuses personnes utilisant simultanément l'ordinateur par l'entremise de consoles avec un programme de supervision du temps partagé qui exécute séquentiellement chaque application utilisateur en un bref [temps d'] accès ou quantum de calcul. Cette séquence, qui dans le cas le plus élémentaire est une simple technique de répartition de charges entre les applications,

¹⁹¹ On traduira *Compatible Time-Sharing System* par Système d'exploitation à temps partagé compatible.

¹⁹² C'est-à-dire travaillant sous C.T.S.S.

devrait survenir suffisamment souvent de façon à ce que chaque programme utilisateur stocké dans la mémoire à haute vitesse soit exécuté pendant un quantum [de calcul], cela au moins une fois par temps de réaction humain approximatif (± 2 secondes). De cette façon, chaque utilisateur voit l'ordinateur totalement réactif [à ses] frappes de touches régulières, chacune d'entre elles ne requérant que des calculs triviaux ; pour les cas non triviaux, l'utilisateur constate une réduction graduelle du temps de réponse, qui est proportionnelle à la complexité du calcul nécessité par la réponse, à la lenteur de l'ordinateur, et au nombre total d'utilisateurs actifs [sur la machine]. Il devrait être clair, cependant, que si n utilisateurs effectuent une demande de service au même instant, chacun d'entre eux, en moyenne, ne pourra bénéficier de la vitesse effective de l'ordinateur que dans une proportion déterminée par le rapport $1/n$. Durant les phases de débogage des programmes, lorsqu'un niveau d'interaction élevé est atteint, ceci ne devrait pas constituer un obstacle puisque normalement, la somme de calculs requise pour chaque réponse de l'ordinateur [sur des tâches de ce type] est moindre comparée au besoin de production ultime¹⁹³. ».

Corbató devait principalement mettre l'accent ici sur l'importance fondamentale revêtue par le différentiel de temps de réactivité existant entre l'homme et l'ordinateur¹⁹⁴. C'est en effet sur cet intervalle décisif, et la capacité que l'on pouvait avoir à définir un modèle programmatique et chronométrique permettant de l'exploiter de façon optimale, que reposait l'une des vertus les plus essentielles du *time-sharing*, à savoir l'illusion que chacun des usagers travaillant sur un système informatique opéré selon ce régime pouvait éprouver d'être seul à l'utiliser, et donc de disposer entièrement ou presque de sa pleine puissance de calcul. Et F. J. Corbató de poursuivre son propos de façon fort intéressante puisqu'en plus de revenir sur certains des avantages les plus évidents du *time-sharing*, il s'employait également à en présenter quelques autres, peut-être moins immédiatement perceptibles par des non-spécialistes, mais assurément tout aussi capitaux. Nous citons encore le chercheur:

¹⁹³ In Fernando J. Corbató, Marjorie Merwin-Daggett, Robert Daley, « An Experimental Time-Sharing System », in *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference*, 1-3 mai 1962. San Francisco (Californie), *American Federation of Information Processing Societies*, 1962, Vol. 21, pp. 335-344. Le texte de cette conférence peut être librement consulté sur les *Larch Pages* du M.I.T., à l'adresse suivante: <http://larch-www.lcs.mit.edu:8001/~corbato/sjcc62/>. Une version numérisée de ce même texte est également disponible ici au format PDF: www.simson.net/ref/lcs_35/Corbato_Experimental_timesharing.pdf

¹⁹⁴ Corbató évaluait ce différentiel de temps de réactivité à environ deux secondes. La conférence ayant été prononcée au mois de mai 1962, on peut légitimement supposer que cette valeur a été estimée sur la base des performances moyennes soit de l'I.B.M. 709 (utilisé au M.I.T. *Computing Center* jusqu'au printemps 1962) soit sur celles de son successeur, l'I.B.M. 7090 (entré en service au même printemps 1962).

« Non seulement un tel système en temps partagé permet d'améliorer la capacité à programmer de manière conventionnelle de un à deux ordres de grandeur, mais il pourrait aussi donner naissance à plusieurs nouvelles formes d'usage de l'ordinateur. Il pourrait ainsi y avoir une reformulation graduelle de nombreuses applications issues des domaines des sciences et de l'ingénierie de telle sorte que les programmes qui contiennent actuellement des arbres de décision devant être déterminés à l'avance soient éliminés et remplacés par des programmes où les branches de décision seraient spécifiées uniquement lorsque cela s'avèrerait nécessaire. Un autre champ d'application important est celui des machines d'apprentissage, lequel, malgré sa trivialité computationnelle, est susceptible de tirer naturellement parti des consoles du système de time-sharing avec cet avantage additionnel que des programmes d'enseignement plus élaborés et plus adaptatifs pourraient être employés. Enfin, comme le prouve l'existence de nombreux petits ordinateurs commerciaux, il existe de multiples applications dans le secteur des affaires et de l'industrie où il serait avantageux de disposer de puissantes installations de calcul implantées dans des endroits isolés, avec seulement un investissement incrémentiel de capital lié à [l'acquisition de] chaque console. Mais il est important de réaliser que même sans les applications mentionnées ci-dessus, l'avancée majeure en programmation permise par le time-sharing serait d'une valeur immédiate pour les installations informatiques des universités, des laboratoires de recherche et des firmes d'ingénierie, secteurs d'activité où le débogage de programmes représente un problème de premier ordre¹⁹⁵ ».

A l'issue de cette séquence introductive Fernando J. Corbató devait énumérer 13 problèmes techniques généraux, tous bien entendu liés au processus d'implémentation d'un système en *time-sharing*. Ces problèmes se trouvaient ici ordonnancés dans trois catégories distinctes: 1°) les *Hardware Problems*, c'est-à-dire les problèmes relevant spécifiquement des équipements (au nombre de 6) ; 2°) les *Programming Problems*, attachés à la programmation du logiciel (4 problèmes) ; 3°) enfin les *Usage Problems*, liés comme leur dénomination l'indique à l'emploi des systèmes informatiques opérés en temps partagé (3 problèmes). Dans la suite du texte, le chercheur commençait par présenter son « système expérimental en *time-sharing* pour l'I.B.M. 7090 », c'est-à-dire le *Compatible Time-Sharing System*, en insistant tout particulièrement sur quatre de ses fonctionnalités les plus significatives :

¹⁹⁵ Ibid.

- « 1. [Le C.T.S.S.] permet à l'utilisateur de développer des applications dans des langages de programmation compatibles avec le système d'exploitation [F.M.S.¹⁹⁶] travaillant en fond,
2. [Le C.T.S.S.] permet à l'utilisateur de développer un dossier privé de programmes,
3. [Le C.T.S.S.] autorise l'utilisateur à démarrer des sessions de débogage à l'endroit exact où il s'était arrêté lors de la session précédente.
4. [Le C.T.S.S.] lui permet de travailler à son rythme avec une perte minimalisée de temps machine¹⁹⁷ ».

A la lecture de ces quatre points, on voit assez nettement de quelle manière le C.T.S.S. – et à travers lui le principe même du time-sharing – commençait à introduire une rupture nette avec l'informatique telle qu'elle avait été conçue et pratiquée depuis ses débuts. Pour la première fois en effet, grâce à l'existence du *Compatible Time-Sharing System*, une personne se trouvait en position d'utiliser un ordinateur en ayant le sentiment certes erroné mais néanmoins tout à fait plausible de son point de vue, d'être parfaitement seule aux commandes du système. Non seulement cela mais en plus, avec le C.T.S.S., se faisait jour la possibilité d'une amorce d'*individualisation* et de *spécification* du rapport de l'homme à la machine informatique. Ainsi, avec le système d'exploitation Multi-Utilisateurs créé par Corbató, le phénomène de personnalisation de l'usage de l'ordinateur se traduisait-il par le fait que l'usager avait désormais la possibilité :

- 1°) de créer un dossier de travail privé puis d'accéder ad libitum au contenu de ce dernier¹⁹⁸.

¹⁹⁶ Le F.M.S. de l'ordinateur 7090 du M.I.T. *Computing Center* était le *Fap-Mad-Madtran-BSS Monitor System*, une version modifiée du *Fortran-Fap-BSS Monitor System*, système d'exploitation en *batch processing* employé dans de nombreuses installations informatiques mettant en œuvre un mainframe 7090. Le terme *Fap* était un sigle qui signifiait FORTRAN Assembly Program. Le *Fap* était le langage d'assemblage par défaut de l'I.B.M. 7090. L'acronyme *Mad* voulait dire *Michigan Algorithm Decoder*. Le *Mad* était un langage de programmation simplifié, structurellement proche de l'ALGOL. Le *Madtran* était une application qui, pour permettre un gain de rapidité dans l'exécution des programmes écrits en FORTRAN, assurait automatiquement leur transcription en langage *Mad* avant qu'ils ne soient traités par le C.P.U. du mainframe.

¹⁹⁷ Ibid.

¹⁹⁸ Ce dossier informatique étant enregistré de façon permanente sur les périphériques de stockage de masse de l'ordinateur (le plus souvent des bandes ou des disques magnétiques), avant d'être chargé dans la mémoire du système.

2°) d'utiliser le langage de programmation de son choix, pourvu seulement que celui-ci soit compatible avec le système d'exploitation de base de la machine (dans ce cas précis il s'agissait du F.M.S.).

3°) de travailler à *son* rythme, notamment pendant les sessions de débogage, sans avoir à craindre de voir le si coûteux temps machine se gaspiller dès la première grosse difficulté rencontrée, et en ayant qui plus est la garantie permanente de toujours pouvoir reprendre un travail donné précisément là où il avait été interrompu lors de la séance de programmation (ou de débogage) précédente.

Par rapport à tout ce qui avait été réalisé auparavant, par rapport surtout à la méthode du traitement par lots dont seul l'emploi quasi systématisé dans nombre de centres de calcul pouvait peut-être se voir comparé à l'ampleur du sentiment de frustration qu'elle avait généralement fait naître chez la plupart de ceux qui les fréquentaient, le C.T.S.S. constituait une avancée absolument décisive. Chacune des fonctionnalités énoncées ci-dessus par Corbató représentait en effet une nouveauté radicale sur les plans croisés des technologies mises en œuvre et du haut niveau d'accessibilité qu'elles offraient à l'ordinateur. En plus d'instaurer une relation *immédiate*¹⁹⁹ entre l'ordinateur et l'homme – les hommes devrions-nous plutôt écrire puisque encore une fois la caractéristique fondamentale du C.T.S.S. tenait au fait qu'il permettait de partager concurremment et « équitablement » les ressources d'un seul et même système informatique entre plusieurs usagers – elles étaient porteuses d'une possibilité inouïe jusqu'ici : celle de conférer aux utilisateurs le pouvoir de *déterminer* leur rapport à la machine (jusqu'à un certain point s'entend). Prises dans leur ensemble et bien qu'elles dussent indubitablement faire encore l'objet de perfectionnements divers, toutes ces caractéristiques, ces fonctionnalités, étaient annonciatrices d'un nouveau modèle de l'informatique et de ses usages dans lequel l'ordinateur, non content de se trouver soumis à un

¹⁹⁹ Ce terme doit être entendu ici en un double sens. D'abord cette immédiateté était celle de l'instantanéité (ou quasi instantanéité) du temps de réponse machine. Alors que les systèmes informatiques opérant en *batch processing* imposaient à un utilisateur toujours évincé des délais d'attente souvent conséquents (ceux-ci pouvaient comme nous l'avons déjà indiqué durer de quelques heures à plus d'une journée) pour obtenir des résultats parfois décevants, un usager travaillant sous C.T.S.S., puisqu'il exécutait lui-même son propre travail, conservait en permanence une capacité de contrôle totale sur ce qu'il faisait. Ensuite cette relation pouvait être qualifiée d'immédiate car dans le cas d'un ordinateur équipé du C.T.S.S., aucun intermédiaire ne venait s'interposer entre la machine et son, ou plutôt ses utilisateurs. Au contraire du traitement par lots qui par définition nécessitait 1°) que toutes les opérations machine composant la chaîne finale de conception d'un programme soient confiées à des opérateurs tiers et 2°) qu'elles soient présentées au guichet du *Computation Center* autant de fois que nécessaire jusqu'à obtention des résultats attendus.

processus progressif de désacralisation²⁰⁰, se verrait aussi pris dans une irréprouvable logique de décentrage tendant à l'extraire et à l'ôter peu à peu des structures réservées et des mains des spécialistes, pour le rapprocher de plus en plus du pool de ses usagers terminaux.

Sur le plan purement technologique – celui de la programmation et de la réalisation matérielle - on ne saurait raisonnablement affirmer du *Compatible Time-Sharing System* qu'il représenta une pierre blanche ou un jalon décisif dans l'histoire des systèmes d'exploitation multi-utilisateurs. Les autres projets de *time-sharing* qui étaient poursuivis à la même période au M.I.T. (Teager, Dennis) ou chez Bolt, Beranek et Newman (Fredkin et McCarthy), hormis le fait qu'il s'agissait ici aussi de tentatives précoces visant à mettre au point un logiciel capable de distribuer de façon continue et rationnelle la puissance d'un ordinateur entre plusieurs personnes, comportaient également des spécificités techniques intéressantes. Bien qu'il n'ait pas été l'unique représentant de sa catégorie au début des années soixante, le C.T.S.S., par certains de ses aspects, se différenciait néanmoins des autres projets de systèmes d'exploitation en temps partagé.

Premièrement, parce que le *Compatible Time-Sharing System* fut le premier logiciel de ce genre à établir clairement la viabilité du concept de *time-sharing*, sessions et démonstrations de travail à l'appui. Deuxièmement parce que ses créateurs le dotèrent au fur et à mesure de sa conception de fonctionnalités jusqu'alors inédites. Ainsi le C.T.S.S. fut un des premiers systèmes d'exploitation à se voir pourvu d'un éditeur de textes. C'est Jérôme H. Saltzer, du M.I.T. *Department of Electrical Engineering and Computer Science*, qui programma cette application – baptisée RUNOFF²⁰¹ – dans les années 1963-64, avec le langage *Mad (Michigan Algorithm Decoder)*. Une autre application également promise à un avenir extrêmement radieux était MAIL. Tom Van Vleck et Noël Morris, deux jeunes programmeurs de l'équipe de Corbató, conçurent cette application dans les premiers mois de l'année 1965. L'idée d'un logiciel permettant aux utilisateurs du *Compatible Time-Sharing System* d'échanger entre eux des messages à contenu alphanumérique avait été suggérée dans une note de service²⁰² rédigée en décembre 1964 ou janvier 1965 par le français Louis H.

²⁰⁰ Puisque jusqu'au début des années soixante la machine informatique était à juste raison considérée comme un instrument dont seule la fascinante complexité pouvait être placée sur le même pied d'égalité que son « omnipotence » et son mystère intrinsèques. Ajoutons encore, pour parfaire cette figure très incomplète, que sa fréquentation directe était pour l'essentiel réservée à une « technoélite » plutôt jalouse de ses privilèges.

²⁰¹ Le programme RUNOFF était en réalité composé de deux modules informatiques complémentaires: l'application TYPSET était l'éditeur de textes proprement dit, tandis que l'application RUNOFF gérait les sorties de la machine. RUNOFF est souvent présenté comme le prédécesseur et inspirateur de *runoff*, sous le système d'exploitation *Multics*, et des programmes *roff* et *nroff*, sous l'operating system *Unix*.

²⁰² Louis Pouzin, Glenda Schroeder, Pat Crisman, *Programming Staff Note 49*, M.I.T. *Computation Center*, document interne non daté mais probablement rédigé en décembre 1964 ou janvier 1965, selon les souvenirs du programmeur Tom Van Vleck (<http://www.multicians.org/thvv/mail-history.html>).

Pouzin (qui en l'occurrence complétait sa formation au M.I.T.), et les américains Glenda Schroeder et Pat Crisman. Le même Louis H. Pouzin, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, qui plus tard inventerait la notion de datagramme et serait le principal maître d'œuvre du réseau informatique français expérimental CYCLADES à l'Institut de Recherche d'Informatique et d'Automatique dans les années 70, créa également un utilitaire nommé RUNCOM pour le C.T.S.S. La fonction de cette petite application consistait à prendre un ensemble de commandes système enregistrées dans un fichier préexistant et à les exécuter. Il s'agissait par conséquent d'un prédécesseur des *Shell Scripts*, ou interpréteurs de commandes scriptées, fonctionnalités logicielles que l'on devait retrouver plus tard sur des systèmes d'exploitation comme MULTICS (*Shell*), UNIX (*Bourne Shell*) ou MS-DOS²⁰³ (*command.com*).

En 1963, I.B.M. livra au M.I.T. *Computation Center* un exemplaire de son plus puissant ordinateur scientifique du moment, le modèle 7094. Pour permettre au *Fortran Monitor System* (système d'exploitation en *batch processing*) et au *Compatible Time-Sharing System* de fonctionner dans les meilleures conditions, I.B.M. avait apporté d'importantes modifications matérielles à ce mainframe, à la demande bien sûr de ses destinataires et utilisateurs du *Massachusetts Institute of Technology*. L'I.B.M. 7094 du centre de calcul intégrait ainsi deux banques mémoire modèle 7302 à tores de ferrite (en lieu et place d'une seule sur les modèles de série), offrant une capacité individuelle de stockage de 32,768 mots de 36 bits. Il était également pourvu d'un dispositif spécialement destiné à la gestion de cet espace d'enregistrement, puisque sur les deux unités principales de stockage de type 7302, l'une était réservée au F.M.S. et au C.T.S.S. et l'autre au programme de monitoring du C.T.S.S. Les équipements additionnels de ce mainframe 7094 comprenaient aussi un interrupteur d'horloge et des circuits dédiés autorisant l'interruption de certaines instructions (notamment pour la protection des programmes système). Outre ceci, la nouvelle installation du *Computation Center* comportait de nombreux éléments périphériques performants, comme des lecteurs de bandes magnétiques 729 (*Magnetic Tape Unit*), un disque magnétique type 1301 (*Disk Storage Unit*), deux écrans permettant l'affichage vectoriel des informations, une unité de contrôle de transmissions de données 7750 (en fait un ordinateur spécialement dédié à la prise en charge des communications), capable de prendre simultanément en charge un maximum de 112 terminaux (de type I.B.M. 1050, I.B.M. *Selectric* ou Télétype *Model 35*).

²⁰³ Le sigle MS-DOS signifie *Microsoft Disk Operating System*. La ligne « *command.com* » permettait de démarrer le *Shell* sous MS-DOS. Il ne s'agissait bien entendu pas de l'adresse d'une page web.

C'est au cours de cette période – plus précisément à la date du 30 juin 1963 - que le Projet M.A.C. fut officiellement démarré au *Massachusetts Institute of Technology*.

2.2.7.2. Le Projet M.A.C.

Le Projet M.A.C. a vu le jour au cours de l'été 1963, au M.I.T. L'acronyme M.A.C. possède au moins trois sens différents²⁰⁴. Le premier est *Multiple Access Computer* (soit « ordinateur à accès multiples »), le second *Machine Aided Cognition* (c'est-à-dire « connaissance assistée par ordinateur »), le troisième *Man and Computer* (homme et ordinateur). L'un ou l'autre de ces sens était susceptible d'être utilisé en fonction des circonstances, des personnes et aussi des étages du bâtiment²⁰⁵ qui accueillait le Projet M.A.C. puisque ce dernier, en lieu et place d'être un programme scientifique traditionnel comme sa dénomination tendait à le faire penser, était en réalité un laboratoire pluridisciplinaire où l'on conduisait des recherches touchant aux secteurs de l'informatique en temps partagé, de l'intelligence artificielle, et de l'informatique théorique. C'est d'ailleurs ce caractère pluridisciplinaire qui, pour des motifs politiques et administratifs propres au fonctionnement interne du M.I.T., avait originellement dicté le choix de cette dénomination quelque peu inhabituelle – « *Project* » – au lieu de l'appellation plus traditionnelle de « *Laboratory* ». Cette dernière avait beau être beaucoup mieux adaptée pour décrire ce qu'était fondamentalement le M.A.C., elle aurait rendu nettement plus ardu le recrutement (ou bien le détachement temporaire) de scientifiques appartenant à d'autres départements du M.I.T. L'usage du terme « *Project* » rendait plus simple ce type de procédures sans affecter les moyens attribués M.A.C. ni non plus les objectifs qui s'y trouvaient poursuivis.

Comme nous le précisons en ouvrant cette section, la signature du contrat officialisant le démarrage du Projet M.A.C. eut le 30 juin 1963, à l'occasion d'une réunion rassemblant les représentants du *Massachusetts Institute of Technology* et ceux du principal bailleur de fonds du projet, à savoir l'*Information Processing Technology Office* (I.P.T.O.) de l'*Advanced*

²⁰⁴ Un quatrième sens, parfaitement anecdotique celui-ci, a été donné au sigle M.A.C. dans les années 1965-66: *Minsky Against Corby* Il faisait référence aux tensions qui existaient quelquefois entre le « patron » de la branche intelligence artificielle du Projet M.A.C., Marvin L. Minsky, et celui de sa branche time-sharing, Fernando J. Corbató.

²⁰⁵ Il s'agissait du Building NE43, sis au 545 *Main Street*, à Cambridge. Sur le campus du M.I.T. ce lieu était mieux connu sous le nom de *Tech Square*. Les locaux du Projet M.A.C. étaient situés au 5^{ème}, 8^{ème} et 9^{ème} étage de l'immeuble *Tech Square*. Le cinquième étage du bâtiment abritait les activités liées à l'informatique en temps partagé (ici M.A.C. signifiait donc essentiellement *Multiple Access Computer*), tandis que son neuvième étage hébergeait les recherches qui touchaient aux interactions homme-machine et à l'I.A. Dans ce dernier cas, c'est bien entendu l'autre sens (*Machine Aided Cognition*), qui prévalait.

*Research Projects Agency*²⁰⁶. Organisation destinée à assurer le financement des recherches avancées liées au secteur de la défense, l'A.R.P.A. avait vu le jour en 1958, suite à la mise en orbite réussie du satellite soviétique Spoutnik en octobre de l'année précédente. C'était en réponse à cet évènement qui avait profondément frappé les esprits aux Etats-Unis que l'administration Eisenhower avait décidé d'établir l'*Advanced Research Projects Agency*. L'objectif principal de l'A.R.P.A. et de ses différents départements consistait à faire en sorte que les U.S.A. conservent toujours une longueur d'avance sur leurs adversaires potentiels en matière de technologie militaire. L'A.R.P.A. n'était pas soumise à une obligation de résultats immédiats, ce qui lui permettait de suivre et d'apporter son soutien financier à des projets courant sur des échéances moyennes ou longues. Compte tenu du contexte où elle avait été créée et aussi du caractère éminemment stratégique de la mission que le gouvernement lui avait assignée, les budgets attribués à l'A.R.P.A. devaient évidemment compter parmi les mieux dotés du pays. Ainsi, au début des années soixante, ce ne sont pas moins de 7 millions de dollars que l'*Advanced Research Projects Agency* se trouva en mesure d'allouer aux différents programmes de recherche américains qui visaient à promouvoir l'usage des ordinateurs dans le secteur de la défense nationale. Sans atteindre bien sûr un pareil montant, la somme que l'A.R.P.A./I.P.T., via l'*Office of Naval Research*, s'engagea à verser initialement chaque année au projet M.A.C. devait tout de même se monter à plus de 2 millions de dollars²⁰⁷. Afin de comprendre pourquoi et qui décida d'initier un projet tel que le M.A.C., afin de comprendre aussi dans quelles conditions on le mit effectivement en place et quelles finalités on entendait véritablement y poursuivre, il nous est à présent nécessaire d'opérer un bref retour en arrière.

L'année 1962 fut le théâtre d'un certain nombre d'évènements qui devaient revêtir un peu plus tard une importance cruciale pour le lancement et la mise en œuvre du Projet M.A.C. Pour commencer, dans les tout premiers jours du mois d'octobre, Joseph C. R. Licklider quitta ses fonctions de vice-directeur chez Bolt, Beranek et Newman pour prendre la direction de deux départements de recherche à l'*Advanced Research Projects Agency*. Le premier des deux programmes que devait diriger Licklider concernait le domaine de la commande et du contrôle (*Command and Control Research Division*), le second celui des sciences comportementales (*Behavioral Sciences Division*). Avant d'accepter ce nouveau poste, J.C.R.

²⁰⁶ Rappelons que l'A.R.P.A. était un organisme de recherches et de financements qui dépendait directement de l'*United States Department of Defense*.

²⁰⁷ Cette somme fut par la suite augmentée pour finalement atteindre un pic en 1969, avec 4,3 millions de dollars. Au cours des années soixante-dix ces financements gouvernementaux connurent une diminution, avant d'enregistrer à nouveau une augmentation à l'orée de la décennie 80.

Licklider avait successivement rencontré le Directeur de l'A.R.P.A., Jack P. Ruina, et le physicien Eugene G. Fubini, qui, en plus de son rôle de conseiller scientifique et technique au sein du *Department of Defense*, était également le second du Dr. Harold Brown, membre permanent du *President's Science Advisory Committee* et Directeur du *Defense Research and Engineering for the Department of Defense*. Lors de ce dernier entretien, le programme de recherche de l'A.R.P.A. regardant le domaine de la commande et du contrôle fut abordé de manière détaillée et si E. G. Fubini réussit à convaincre Licklider²⁰⁸ de son importance militaire, celui-ci parvint à son tour à démontrer au principal lieutenant d'Harold Brown que placer un ordinateur fonctionnant selon le régime du traitement par lots au cœur d'un dispositif de ce genre reviendrait à commettre une erreur technologique grossière. La solution qu'il convenait de privilégier dans ce cas, selon le chercheur, était bien entendu celle du temps partagé.

J.C.R. Licklider entra officiellement à l'A.R.P.A. le 1^{er} octobre 1962 afin de diriger les deux programmes de recherche susmentionnés. Il intégra cette organisation sachant que dans l'exercice de ses fonctions, il pourrait bénéficier d'une importante liberté d'action. Etant bien entendu qu'il n'était aucunement partisan du modèle informatique que l'on entendait développer ici à l'origine – un modèle basé sur le *batch processing* répétons-le – il chercha rapidement à mettre à profit la marge de manœuvre dont il disposait pour imposer sa propre conception de l'informatique. Une informatique où l'interactivité devait représenter le maître mot des rapports liant l'ordinateur et ses utilisateurs. Dans une interview accordée en octobre 1988 à Arthur L. Norberg²⁰⁹ et à William Aspray, Licklider devait d'ailleurs rappeler de façon on ne peut plus claire la nature des objectifs qu'il avait véritablement en tête à l'époque dont il est question ici. En dépit de sa brièveté, le fragment que nous produisons ci-dessous montre bien à quel point les axes de recherche et de développement qu'il entendait suivre au sein de la structure dont il assurait la direction pouvaient différer et s'écarter des grandes orientations technologiques conservatrices qui déterminaient alors la forme et l'évolution de l'informatique :

²⁰⁸ Rappelons que J.C.R. Licklider était alors membre de l'*U.S. Air Force Scientific Advisory Board*.

²⁰⁹ Le chercheur qui enseigne désormais l'histoire des sciences et des technologies à l'Université du Minnesota occupait alors le poste de Directeur du *Charles Babbage Institute for the History of Information Technology*.

« *Je voulais une informatique interactive. Je voulais du temps partagé. Je voulais des thèmes [de recherche] ressemblant à ceci: les ordinateurs sont au moins aussi bien adaptés à la communication qu'ils le sont au calcul*²¹⁰ ».

En plus d'être un psychologue de renom et un spécialiste des technologies de l'ordinateur - pour ne pas dire un visionnaire - J.C.R. Licklider était aussi un politicien et un administrateur extrêmement avisé. Aussi, afin de pouvoir mettre en œuvre ses idées révolutionnaires le mieux et le plus vite possible au sein de l'A.R.P.A., il s'employa à convaincre sa hiérarchie de la nécessité d'y établir une nouvelle division, entièrement dédiée aux techniques du traitement de l'information et aux technologies de l'informatique et des réseaux. Ce département fut créé en 1962 en remplacement de la *Command and Control Research Division*. Il reçut le nom d'*Information Processing Techniques Office*²¹¹. Comme M. Campbell-Kelly et W. Aspray ont eu l'occasion de le rappeler dans un des chapitres de leur ouvrage *Computer, A History of the Information Machine*²¹², le budget de l'I.P.T.O., à terme, devait surclasser à lui seul l'ensemble des budgets combinés de toutes les autres organisations publiques chargées du financement de la recherche en informatique aux Etats-Unis. C'est dire combien la conception que Licklider se faisait de l'informatique était juste et extraordinairement féconde, et son acharnement à favoriser son éclosion ainsi que sa mise en œuvre tout à fait justifié (et cela en dépit de l'orientation technologique initialement adoptée pour la conduite de certains grands projets informatiques financés par l'A.R.P.A., lesquels, non contents de faire souvent appel à la méthode du traitement par lots, privilégiaient aussi le cas échéant un schéma organisationnel ultra centralisateur).

Désormais installé à la tête de l'*Information Processing Techniques Office*, J.C.R. Licklider commença à mettre en place et à appliquer une politique de financement tout à fait singulière afin de conférer aux ambitieuses visions qu'il nourrissait depuis ses années au M.I.T. *Lincoln Laboratory* les meilleures chances de réussite. Dans cette perspective, il adopta une position consistant à accorder les fonds placés à sa disposition par le *Department of Defense* à des projets initiés au sein de certains laboratoires de recherche sis dans des instituts ou des centres universitaires américains prestigieux. Ces derniers possédaient la

²¹⁰ J.C.R. Licklider, interview par William Aspray et Arthur Norberg, *Charles Babbage Institute, Center for the History of Information Processing, Oral History 150* (OH 150), Université du Minnesota, 28 octobre 1988. Le passage cité ci-dessus a également été reproduit dans Arthur L. Norberg et Judy E. O'Neill, *Transforming Computer Technology: Information Processing and the Pentagon, 1962-1986*, Baltimore, *Johns Hopkins University Press*, 1996. Il peut être librement consulté sur le site du *Charles Babbage Institute*, à l'adresse suivante: <http://www.cbi.umn.edu/oh/pdf.phtml?id=180>.

²¹¹ I.P.T.O., c'est-à-dire bureau des techniques de traitement de l'information.

²¹² In [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], p 213.

particularité supplémentaire d'être dirigés par des individus qui partageaient les conceptions de Licklider quant à l'avenir de l'informatique et au rôle décisif que serait très certainement appelé à y jouer le time-sharing. Ces hauts lieux de la science et des technologies n'étaient autres que les nœuds de ce que le Directeur de l'A.R.P.A./I.P.T.O. s'était plu à surnommer avec un certain humour « son » *Intergalactic Computer Network*. Appartenaient donc à ce « Réseau Informatique Intergalactique » le *Stanford Research Institute* (S.R.I.), le *Carnegie Institute of Technology*²¹³ (C.I.T.), l'*University of Utah*, l'*University of California Los Angeles*, l'*University of California Santa Barbara*, l'*University of California Berkeley*, l'*University of South California*, la *RAND Corporation*, la *System Development Corporation* et, bien évidemment, le *Massachusetts Institute of Technology*. Outre le fait qu'elles étaient liées par contrat avec l'A.R.P.A. et donc que chacune d'entre elles bénéficiait à une hauteur ou à une autre d'un financement en provenance de cette organisation, ces différentes universités et institutions illustres avaient en commun le fait d'être des pôles d'excellence en matière de recherche informatique, que leurs travaux respectifs aient concerné par ailleurs le hardware et/ou le software. Comme nous l'avons dit, toutes étaient unanimement intéressées par le temps partagé et les réseaux.

En parallèle de ce premier effort et toujours dans le cadre de ses fonctions à l'A.R.P.A./I.P.T.O., J.C.R. Licklider entreprit de rassembler au sein d'une commission spéciale d'étude et de réflexion des représentants des principales institutions et organisations qui, à l'époque (et parfois depuis longtemps déjà), se trouvaient fortement impliquées dans le financement des technologies et des méthodes de l'informatique. Il parvint ainsi à réunir de manière régulière un panel de spécialistes et de décideurs, tous mandatés par des organismes civils de première importance (comme la *National Science Foundation*, le *National Institutes of Health*, la *National Aeronautics and Space Administration*), ou bien par des structures militaires (U.S. Army, U.S. Air Force, U.S. Navy, *Office of Naval Research*). Les objectifs primordiaux de ce comité étaient le recoupement et la coordination des informations scientifiques. On cherchait ici notamment à éviter que ne soient menées en plusieurs endroits et au même moment des recherches par trop redondantes. En favorisant le partage de données et de résultats susceptibles d'intéresser de nombreuses parties, on s'efforçait aussi de prévenir un phénomène au moins aussi coûteux en temps qu'il pouvait l'être en argent, à savoir ce que l'on conviendra de nommer de façon peut-être un peu rapide « la réinvention de la roue ». Puisque l'A.R.P.A. était une excroissance du département américain de la défense chargée des

²¹³ En 1967 le C.I.T. a disparu pour faire place à la *Carnegie Mellon University* (née de la fusion du *Carnegie Institute of Technology* et du *Mellon Institute of Industrial Research*).

financements pour les projets dits « avancés » et qu'elle soutenait bon nombre des travaux informatiques qui étaient conduits au sein des structures que nous venons d'évoquer, il était de son intérêt direct qu'une pareille politique de mise en synergie et d'optimisation soit rapidement lancée. Une fois encore et dans cette optique, le rôle joué ici par J.C.R. Licklider fut déterminant.

Les axes de travail que le Directeur de l'*Information Processing Techniques Office* désirait tout spécialement voir développés par les organisations dont nous avons parlé étaient en parfaite conformité avec ses thèmes de prédilection favoris. L'étude approfondie des interactions occurring entre l'homme et la machine, le développement de nouvelles interfaces utilisateurs²¹⁴, le perfectionnement des systèmes d'exploitation et des applications grâce un effort d'avancement de l'ingénierie logicielle et, c'est évident, l'informatique opérée en temps partagé représentaient de fait autant de pistes de travail dont les retombées à court, moyen et long terme étaient susceptibles d'intéresser les différentes armées et agences gouvernementales américaines (à commencer cela va de soi par le *Department of Defense*). De tous ces sujets de recherche, le plus fondamental, celui autour duquel devaient en quelque sorte venir se positionner et s'ériger tous les autres, était à n'en point douter le *time-sharing* et avec lui la notion d'informatique interactive. Aussi le Directeur de l'I.P.T.O. n'hésita-t-il jamais à accorder son soutien financier – souvent fort substantiel – aux programmes de cette nature. Après le Projet M.A.C. du M.I.T, ce sont ainsi l'Université de Californie à Berkeley, avec le *Project Genie* réalisé sur un ordinateur *Scientific Data Systems* 930, et le *Time-Sharing System* (T.S.S.), développé par la *Systems Development Corporation*²¹⁵ pour les mainframes militaires AN/FSQ-32²¹⁶ qui reçurent des fonds de l'*Advanced Research Projects Agency*. Au total, chaque année, les subventions gouvernementales accordées à ces trois projets d'informatique en temps partagé devaient se monter approximativement à une quinzaine de millions de dollars. Comme il a déjà été dit la signature du contrat officialisant le lancement du Projet M.A.C. (*Multiple Access Computer, Machine Aided Cognition, Man and Computer*), a eu lieu le 30 juin 1963. C'est au lendemain de ce jour que débuta au *Massachusetts Institute of Technology* un grand séminaire d'été²¹⁷

²¹⁴ Interfaces utilisateurs qui pourraient notamment prendre la forme de dispositifs d'affichage graphique ou bien encore celle de périphériques spéciaux destinés à rendre plus intuitif l'emploi de l'ordinateur.

²¹⁵ Rappelons qu'avant de devenir une entité indépendante, en 1957, la S.D.C. avait été une division de la *RAND Corporation*.

²¹⁶ L'AN/FSQ-32 (ou Q-32) n'était autre qu'une version du M.I.T. *Lincoln Laboratory* TX-2, construite par I.B.M. Trois exemplaires furent produits par le fabricant, entre 1960 et 1961. Les trois Q-32 furent respectivement mis en service au quartier général de l'U.S. *Air Force Strategic Air Command* (Nebraska), à la *March Air Force Base* (Californie), et aux QG de la *Systems Development Corporation* (Californie).

²¹⁷ La *Summer Study* devait durer 6 semaines, s'étendant sur les mois de juillet et août 1963.

tenu dans le cadre du tout jeune projet M.A.C. Voulu par J.C.R. Licklider, ce symposium estival avait pour objectifs déclarés : 1°) de réunir des scientifiques issus des grands centres universitaires américains qui bénéficiaient du soutien de l'A.R.P.A. (M.I.T., S.R.I., U.C.L.A., C.I.T., etc.), afin de leur permettre de réfléchir et de travailler sur le concept et les techniques de time-sharing et ; 2°) de rassembler des représentants des secteurs de l'industrie et de l'entreprise pour leur présenter et leur faire découvrir le principe de l'informatique en temps partagé. Selon Fernando J. Corbató :

« *La vocation de cette université d'été était de créer un véritable choc. Nous étions absolument frustrés par le fait que les constructeurs de mainframes ne voyaient pas dans ce type de machines [i.e. les ordinateurs travaillant en temps partagé] un marché potentiel. Ils voyaient cela uniquement à la manière d'un gadget spécifique destiné au divertissement de quelques universitaires*²¹⁸. ».

Cette découverte devait pour ainsi dire se faire « ab ovo », les six dizaines de personnes invitées à assister aux présentations réalisées dans le cadre de la *Summer Study* se voyant offrir non seulement la possibilité de voir mais aussi celle d'essayer deux des premiers systèmes de time-sharing jamais expérimentés sur le sol des Etats-Unis. Il s'agissait du *Compatible Time-Sharing System* (C.T.S.S.), que Corbató avait développé au centre de calcul du M.I.T. et du *Time-Sharing System* (T.S.S.), que la *Systems Development Corporation* avait mis au point pour son ordinateur AN/FSQ-32 et ceux de l'U.S. *Air Force*. Des deux *operating system* multi-utilisateurs, c'est incontestablement le C.T.S.S. qui eut le plus fort impact sur les visiteurs. Le mainframe I.B.M. 7094 du M.I.T. était non seulement capable de supporter une trentaine d'utilisateurs en opération simultanée mais, outre cela, il était également pourvu d'un périphérique de stockage de masse ultrarapide (un disque dur I.B.M.), ce qui rendait encore plus remarquables ses performances. Il faut dire que si le système du *Computation Center* était sur le lieu même du déroulement du symposium (c'est-à-dire sur la côte est), l'installation informatique de la *Systems Development Corporation*, elle, se trouvait à Santa Monica, en Californie. Aussi le *Time-Sharing System* de la S.D.C. avait beau se comporter de manière tout à fait saine en dépit de la distance géographique continental qui séparait l'ordinateur AN/FSQ-32 (sur la côte ouest), des opérateurs télétravaillant sur les consoles installées pour l'occasion au M.I.T., le transfert des données, via les lignes téléphoniques traversant le

²¹⁸ In [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], p. 214.

continent pour assurer la connexion des deux côtes, était bien loin de donner à une assistance peu habituée aux subtilités d'un tel dispositif l'illusion de l'instantanéité. En outre et contrairement à celle de l'I.B.M. 7094 du centre de calcul, la mémoire secondaire de l'AN/FSQ-32 de la S.D.C. était encore constituée par des lecteurs/enregistreurs de bandes magnétiques, ce qui contribuait encore à ajouter à son apparente lenteur.

En elle-même la M.I.T. *Summer Study* organisée durant l'été 1963 n'avait pas à proprement parler vocation à produire des résultats scientifiques significatifs et immédiats. En lieu et place de cela, il s'agissait plutôt de rassembler des acteurs et des décideurs issus des milieux universitaire, institutionnel et industriel afin de leur présenter le principe de l'informatique en temps partagé et de les mettre en présence de systèmes fonctionnant selon cette modalité. Ceux qui, appartenant à certains cercles académiques, connaissaient déjà le principe du time-sharing pour en avoir été les pionniers, devaient mettre en commun leur expérience et réfléchir à de nouvelles orientations. En organisant ce symposium, en permettant à des gens peu ou pas du tout familiers de l'informatique en temps partagé de voir et de tester des installations pleinement opérationnelles ses organisateurs espéraient surtout provoquer deux choses. Tout d'abord, faire en sorte que leurs confrères universitaires qui ne connaissaient pas (ou mal) ce mode opératoire commencent à s'y intéresser vraiment. Ainsi, en s'efforçant de populariser le principe du time-sharing au sein des sphères universitaire et institutionnelle alors même que le Projet M.A.C. venait tout juste de débiter, le noyau de ses pionniers, désormais solidement fédérés par J.C.R. Licklider et l'A.R.P.A./I.P.T.O., entendait s'étendre et accroître sa capacité d'influence pour assurer davantage encore la promotion de ce qui constituait son cheval de bataille.

Ensuite les organisateurs de la *Summer Study* attendaient de ces rencontres qu'elles permettent de changer en profondeur le point de vue plutôt indifférent que la plupart des constructeurs d'ordinateurs – à commencer bien entendu par I.B.M. et à l'exception tout à fait notable de D.E.C. – avaient porté depuis ses débuts sur l'informatique en temps partagé. Malheureusement le conservatisme des grands fabricants était tel à l'époque qu'en dépit de présentations et de démonstrations assurées par les meilleurs spécialistes du pays sur des équipements expérimentaux parfaitement opérationnels, ce dernier objectif ne put être atteint. Comme devait le confirmer ultérieurement l'expérience commerciale malheureuse de la société I.B.M., laquelle, face à la réactivité de certains de ses concurrents, fut amenée à introduire quasiment en catastrophe un ordinateur compatible²¹⁹ capable de supporter le time-

²¹⁹ C'était le mainframe 360/67 annoncé par le fabricant en 1965. Les premiers exemplaires de cette machine furent livrés au mois d'août de l'année 1966. Elle devait en principe être équipée du système d'exploitation

sharing au sein de sa gamme *System/360*, il fallu attendre encore au moins une ou deux années avant que les grands industriels de l'informatique ne commencent à s'intéresser véritablement au temps partagé à des fins commerciales.

Le Projet M.A.C. n'était pas un programme de recherches au sens conventionnel du terme. Plutôt que de se focaliser sur un objectif donné en concentrant sur lui l'ensemble des ressources disponibles au sein d'un seul et même laboratoire, J.C.R. Licklider et le Professeur Robert M. Fano (du M.I.T. *Department of Electrical Engineering and Computer Science*), s'employèrent ici à rassembler les chercheurs qui, dans les différents départements du M.I.T., faisaient montre d'un intérêt certain pour l'informatique, ses équipements, ses technologies et/ou ses méthodes. Sous la bannière fédératrice du Projet M.A.C. vinrent se ranger des gens aux compétences et aux finalités scientifiques aussi différentes que pouvaient l'être par exemple celles de Marvin Minsky (M.I.T. *Artificial Intelligence Group*), Martin Greenberger (M.I.T. *School of Industrial Management*), Douglas Ross (M.I.T. *Computer Application Group*), Herbert Teager (M.I.T. *Department of Electrical Engineering*), et Fernando Corbató (M.I.T. *Computation Center*). Quels qu'aient pu être cependant les points de divergence et de convergence de leurs orientations scientifiques respectives, tous ces chercheurs possédaient un dénominateur commun fondamental : l'ordinateur. Et c'était autour de cet instrument, pensé en l'occurrence comme une sorte de puissante centrale de traitement et de distribution de l'information accessible à tous en permanence (grâce à l'emploi du time-sharing), que le directeur de l'I.P.T.O. ambitionnait ici de les coaliser. En procédant de la sorte, Licklider et Fano entendaient constituer un petit noyau de chercheurs travaillant sur des thématiques cimentées par l'usage de l'ordinateur, c'est-à-dire des thématiques fortement susceptibles de se recouper, de s'inspirer, et/ou dépendre les unes des autres en raison de leur « filiation » partagée. Il s'agissait aussi de conférer à la science informatique – pratique et discipline en cours de constitution et d'autonomisation mais qui était encore si informelle qu'en plus d'être largement méconnue, elle manquait de crédibilité y compris au sein des communautés les plus concernées – une nécessaire reconnaissance. Sans considération de priorité aucune, les principaux axes de développement suivis au sein du Projet M.A.C. étaient les donc les suivants :

T.S.S./360 (*Time-Sharing Multi-User Systems/360*). En réalité le T.S.S./360 fut un échec sur toute la ligne. Exagérément coûteux, absolument pas performant (surtout face aux O.S. concurrents), il ne donna jamais satisfaction à ses utilisateurs. Dans les faits et en fonction des installations, ceux-là lui substituèrent différents systèmes d'exploitation alternatifs. Si ces derniers étaient moins ambitieux que le T.S.S./360, ils possédaient les avantages indéniables de la stabilité et de l'opérationnalité (comme le *Control Program/67*, le *Time Sharing Option* pour O.S./360, et le *Michigan Terminal System*).

- Travailler sur les interactions homme-machine, de façon à rendre plus accessible l'usage de l'ordinateur par l'homme.
- Contribuer au développement de solutions matérielles et logicielles pour permettre une meilleure utilisation des systèmes informatiques dans les domaines de la recherche et de l'éducation. Fournir une assistance aux groupes effectuant de la recherche en informatique.
- Favoriser la mise en place de structures académiques destinées à l'enseignement des sciences informatiques de sorte à disposer, à terme, d'une main d'œuvre à la fois nombreuse et compétente.
- Enfin, sur la base de l'expérience accumulée durant les procédures de mise au point et d'implémentation du *Compatible Time-Sharing System*, concevoir un système d'exploitation capable d'opérer en temps partagé, qui soit à la fois puissant (c'est-à-dire apte à servir simultanément un grand nombre d'utilisateurs sans voir ses performances s'écrouler), et flexible (tolérant aux changements et aux erreurs).

Les objectifs du Projet M.A.C., on le voit, n'étaient pas seulement de nature scientifique. Ils se doublaient également de visées sociologiques et pédagogiques dont la finalité principale était le développement d'outils et de moyens censés permettre la mise en place progressive de programmes d'enseignement de l'informatique au sein des universités les plus importantes du pays. En s'efforçant d'améliorer grandement l'accessibilité des machines, en assistant les scientifiques déjà impliqués dans la recherche en informatique et en cherchant également à offrir à un nombre important d'individus la possibilité d'apprendre à les utiliser dans un cadre académique, J.C.R. Licklider tentait de donner peu à peu corps à sa vision. Celle d'une informatique interactive où l'ordinateur cesserait d'être conçu uniquement à la manière d'un formidable broyeur électronique de nombres pour devenir aussi et surtout un extraordinaire vecteur de traitement et de communication de l'information. L'ordinateur et ses terminaux se voyaient alors fréquemment comparés à une usine électrique desservant des habitations. Si toutes ces habitations avaient effectivement besoin de puissance électrique, aucune d'entre elles n'avait en revanche besoin de posséder en propre une centrale. Une

installation partagée, distribuant à la demande de l'énergie en fonction des sollicitations individuelles était ici parfaitement suffisante pour satisfaire tout le monde. Selon Licklider et ceux acquis à sa vision, il devait en aller de même avec l'ordinateur. Un mainframe principal pourvu d'un système d'exploitation supportant le time-sharing jouerait ici le rôle d'une centrale computationnelle – *Computer Utility System* en anglais - capable de délivrer à la demande de la puissance de calcul à des utilisateurs excentrés et équipés de terminaux. Pas plus que le propriétaire d'une maison n'avait besoin de disposer d'une centrale électrique personnelle, les usagers informatiques n'avaient besoin de posséder un ordinateur. Notons bien qu'à l'occasion, le même type de raisonnement était tenu avec, en lieu et place des installations composant la chaîne de distribution électrique, les centraux, les lignes et les postes du réseau téléphonique.

Au cours des deux premières années de vie du Projet M.A.C., c'est le *Compatible Time-Sharing System* que F. J. Corbató avait développé pour l'I.B.M. du *Computation Center* qui fut adopté comme système d'exploitation en temps partagé. Le C.T.S.S. était désormais opérationnel et après que le centre de calcul du M.I.T. eut reçu son I.B.M. 7094, il l'avait modifié afin de permettre son fonctionnement sur la nouvelle machine. Corbató avait toujours souhaité que le mainframe 7094 du *Computation Center* soit accessible à tous. Malheureusement, ce n'était pas envisageable en raison de la vocation première de cet ordinateur et des multiples travaux de calcul qu'il était toujours appelé à réaliser sur le mode du *batch processing* pour de nombreux usagers des mondes académique et institutionnel. Fernando J. Corbató vit dans le Projet M.A.C. une opportunité formidable pour poursuivre ses travaux sur le temps partagé. Ceci était d'autant plus vrai que dans le courant du mois d'octobre 1963, le Projet M.A.C. prit possession de son propre I.B.M. 7094²²⁰.

²²⁰ Le mainframe 7094 du Projet M.A.C. possédait des panneaux latéraux de couleur rouge tandis que ceux de l'I.B.M. 7094 du *Computation Center* étaient bleus. Aussi était-il fréquent d'entendre des expressions telles que « machine bleue » et « machine rouge » dans la bouche des membres des équipes de ces deux structures.

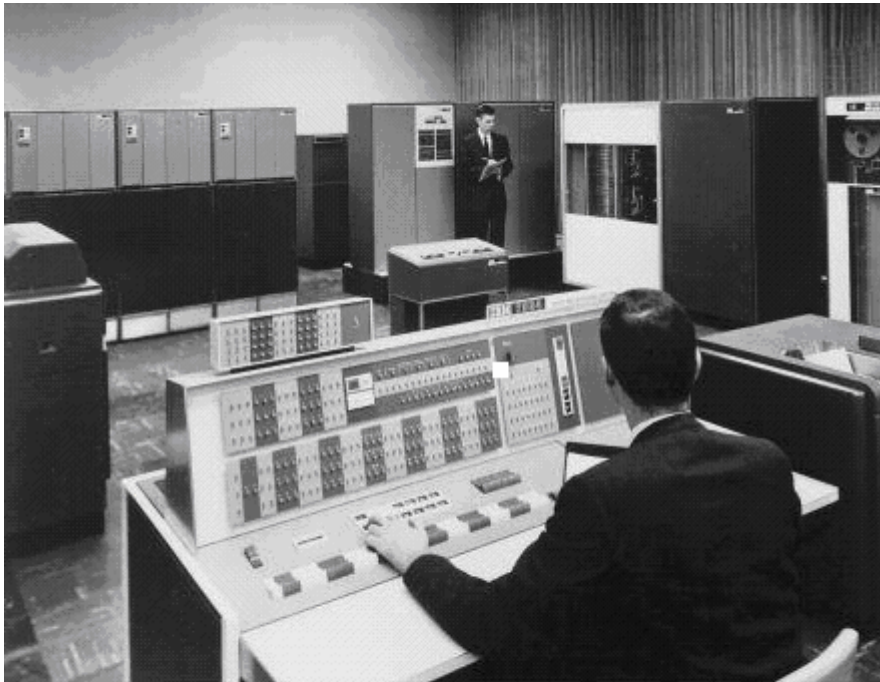


Photo 2: une installation informatique architecturée autour d'un mainframe I.B.M. 7094 *Data Processing Machine*. Image Courtesy of the I.B.M. Corporation.

Assuré de bénéficier lui aussi d'un financement de l'A.R.P.A./I.P.T.O., le chercheur rejoignit donc les équipes de travail constituées autour de Fano et Licklider non sans apporter avec lui une copie du C.T.S.S. Le *Compatible Time-Sharing System* fut installé sur la nouvelle machine de *Tech Square* et pendant une période courant sur environ deux années, celui-ci servit de principal support informatique au Projet M.A.C. A la fin de l'année 1963, cette installation était opérationnelle et déjà connectée à 24 terminaux disséminés sur le campus du M.I.T. Au final, ce sont quelques 160 consoles qui furent rattachées à l'I.B.M. 7094 du Projet M.A.C., le C.T.S.S. permettant à une trentaine d'utilisateurs de se raccorder en même temps au mainframe. Au cours des années 1964-65, le C.T.S.S. commença cependant à montrer ses limites (avec seulement 30 utilisateurs actifs pour un total de 160 terminaux branchés). Aussi, à ce moment, les personnes en charge du Projet M.A.C. décidèrent-elles d'entamer un nouveau chantier visant à la conception d'un second système d'exploitation en temps partagé, lequel, bien entendu, devait exhiber des caractéristiques et des performances largement supérieures à celles du C.T.S.S. On ne désinstalla pas pour autant le *Compatible Time-Sharing System* de l'ordinateur de *Tech Square*. Puisque le C.T.S.S. autorisait la programmation en ligne et qu'il recelait en outre d'excellentes idées dont quelques-unes étaient tout à fait susceptibles de se voir réutilisées ici, on le conserva pour servir de base à la mise au point du nouveau logiciel.

2.2.7.3. MULTICS et UNIX.

Les premiers travaux préparatoires visant au développement du système d'exploitation en temps partagé MULTICS – un sigle signifiant *Multiplexed Information and Computing Service* - furent entamés vers le milieu de l'année 1964. Le *Multics Design Notebook*, un rapport préliminaire signé de la main de Fernando J. Corbató et daté du 30 novembre qui regroupait plusieurs memoranda concernant les propriétés du futur système MULTICS commença ainsi à circuler entre les mains des membres des différentes équipes du Projet M.A.C. dans le courant du mois de décembre 1964. Avant d'examiner quelques-uns des objectifs prioritaires qui avaient été définis dans ce document par l'architecte du C.T.S.S., il convient ici au préalable de prendre en considération un point tout à fait digne d'intérêt. Depuis la fin de la seconde guerre mondiale les relations commerciales et scientifiques qui avaient existé entre le *Massachusetts Institute of Technology* et l'I.B.M. Corporation avaient toujours été excellentes. Avec les grands chantiers informatiques des années cinquante – tel le S.A.G.E. – ces liens s'étaient encore renforcés et depuis, I.B.M. n'avait cessé de fournir régulièrement ses mainframes aux laboratoires de la prestigieuse institution de recherche. Pourtant, avec l'émergence du temps partagé, un nouveau problème s'était fait jour. Les ordinateurs de la société I.B.M., nous l'avons dit, étaient en effet très peu adaptés pour la prise en charge de cette nouvelle modalité de traitement de l'information. Parce qu'ils étaient technologiquement optimisés pour le *batch processing*, il était systématiquement nécessaire de demander à I.B.M. d'apporter des modifications matérielles spéciales – toujours lourdes et coûteuses – à ses onéreux mainframes pour leur permettre d'opérer en *time-sharing*. Or on connaissait le conservatisme du géant industriel. Partisan indéfectible de la méthode du traitement par lots – une approche, voire une philosophie héritées de l'époque de la mécanographie – I.B.M. ne croyait pas beaucoup au *time-sharing*, pas plus d'ailleurs qu'il n'était enclin à accepter et à réaliser volontiers les demandes de transformation qui émanaient quelquefois de ses clients (fussent-ils aussi renommés et stratégiques que pouvait l'être le M.I.T.).

L'immobilisme d'I.B.M., son attitude parfois suffisante à l'égard de sa clientèle et l'évidente inadaptation de ses ordinateurs²²¹ à l'informatique en temps partagé – laquelle représentait l'épine dorsale du *Project M.A.C.* - conduisirent Corbató, Fano, et d'autres chercheurs participant à ce programme à envisager une solution technologique alternative.

²²¹ Y compris et surtout les nouvelles machines du *System/360*.

Comme le prévoyait la procédure d'appel d'offres en vigueur dans ce genre de circonstances, des contacts furent établis entre le M.I.T. et d'autres grands constructeurs d'équipements informatiques pour l'attribution du marché concernant l'ordinateur devant servir de support au futur système d'exploitation en temps partagé. Parmi ceux-là il en était un qui, loin de se désintéresser du *time-sharing*, lui prêtait attention au point d'être effectivement en train de créer deux systèmes informatiques²²² spécialement conçus pour supporter parfaitement cette nouvelle sorte de mode opératoire. Il s'agissait en l'occurrence de la *General Electric Corporation*. En 1963-64, Thomas E. Kurtz et John G. Kemeny avaient programmé le *Dartmouth Time-Sharing System (D.T.S.S.)* en utilisant un mainframe GE-265 couplé à un ordinateur frontal Datanet-30²²³. Très intéressée par ce développement, la *General Electric* avait alors fait le choix de s'engager dans la réalisation d'une machine optimisée pour l'informatique en temps partagé en s'inspirant de ce qui avait été fait au *Dartmouth College*. C'est le Professeur Joseph Weizenbaum²²⁴ qui favorisa l'établissement des relations entre les responsables du Projet M.A.C., et ceux de la *General Electric*. Celui qui intervenait alors en qualité de conférencier au M.I.T. avait en effet travaillé pour le compte de la *General Electric* au cours de la seconde moitié des années cinquante. De cette expérience passée, qui l'avait notamment conduit à prendre part à la conception de l'E.R.M.A.²²⁵, le système informatisé de la *Bank of America*, Weizenbaum avait conservé des contacts plus qu'excellents avec ses anciens collègues.

²²² Ces deux systèmes étaient les mainframes GE-635 et GE-625. Ces ordinateurs étaient extrêmement voisins sur le plan architectural. La seule différence notable les concernant était la vitesse d'opération du GE-635, qui était très supérieure à celle du GE-625.

²²³ Le Datanet-30 était un petit processeur spécialisé dans le traitement des communications que produisait aussi *General Electric*,

²²⁴ Auteur de *Computer Power and Human Reason* (1976), J. Weizenbaum fut également le concepteur, en 1966, du fameux programme d'intelligence artificielle ELIZA, qui, mettant en situation de dialogue un « patient » et un ordinateur, simulait – pour ne pas dire parodiait – un psychothérapeute Rogérien et certaines de ses méthodes de travail centrées sur la personne.

²²⁵ E.R.M.A.: *Electronic Recording Method of Accounting computer processing system*.

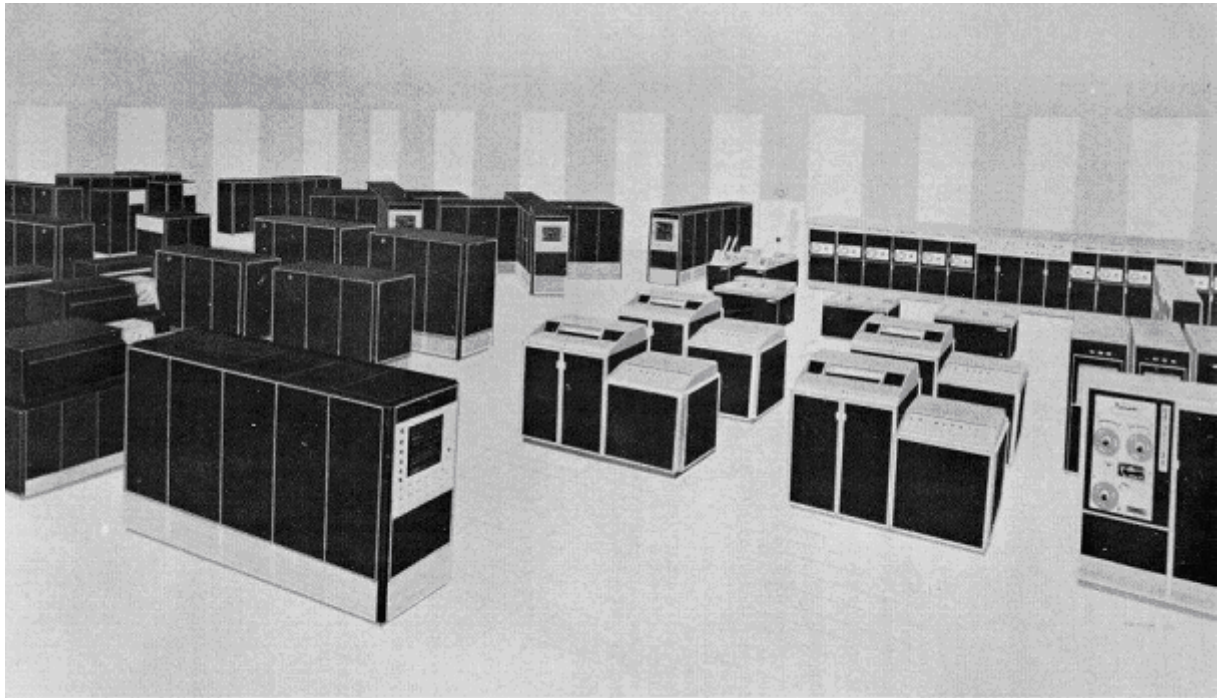


Photo 3 : installation MULTICS bâtie autour d'un système GE-645. le MIT. Project M.A.C. reçut son GE-645 au mois de janvier 1967.
Image Courtesy of the General Electric Information Systems Equipment Division, 1968.

Eu égard à cela, la proposition émanant du *Massachusetts Institute of Technology* ne pouvait être accueillie que très favorablement par la *General Electric*. Ainsi non seulement cette dernière accepta de collaborer au *Project M.A.C.*, mais, voyant dans cette offre du M.I.T. une opportunité formidable pour attaquer la toute-puissante société I.B.M. sur un terrain où elle était particulièrement faible, elle proposa également à l'institut de technologie de prendre une part active à la mise au point de son modèle 645, un ordinateur 36 bits à transistors discrets, double processeur et mémoire à tores de ferrite optimisé pour le time-sharing (pour cela il devait notamment recevoir une unité arithmétique et logique intégrant différents niveaux de protection, un nouveau module de contrôle de périphériques, ainsi que des instructions lui permettant de gérer la mémoire virtuelle). Les deux projets, c'est-à-dire MULTICS et le GE-645 furent conduits de manière conjointe, le système d'exploitation successeur du C.T.S.S. devant dans le futur équiper tous les mainframes de type GE-645. Notons également que les *Bell Telephone Laboratories (AT&T)* s'associèrent au M.I.T. et à la *General Electric* afin de participer au développement de MULTICS. Dans cette perspective les *Bell Labs* procédèrent d'ailleurs à l'acquisition d'un mainframe 635 auprès de la G.E. Les deux géants industriels espéraient beaucoup de leur collaboration avec le M.I.T. A terme en effet, ils nourrissaient l'espoir que MULTICS deviendrait un jour un produit commercial à très fort potentiel.

Les auteurs de « A Marriage of Convenience : the Founding of the MIT Artificial Intelligence Laboratory » ont produit dans leur article une citation de F. J. Corbató dans laquelle celui-ci revenait sur l'influence qu'avait eu le modèle du *Computer Utility System* (C.U.S.) – la fameuse « installation » de distribution informationnelle - sur le processus de création du système d'exploitation MULTICS. D'après Corbató un C.U.S. était constitué par :

« ...un ordinateur, ses logiciels et une équipe de travail, l'ensemble étant organisé de manière à pouvoir répondre 24 heures sur 24 à tous les besoins en information d'une communauté. MULTICS, poursuivait-il, fut imaginé un peu comme ça, [c'est-à-dire comme] un service de calcul et d'information multiplexé,..., présent, fiable et puissant, et doté de tout ce qui était nécessaire pour servir continûment de ressource informationnelle à un nombre très important de personne. C'était une conception radicale à une époque où les ordinateurs étaient pour l'essentiel regardés comme des outils et des jouets pour scientifiques²²⁶ ».

Par rapport au C.T.S.S. dont l'importance historique et technique n'était bien entendu pas remise en cause ici en dépit du fait que ses limites en ordre de marche avaient désormais été atteintes, MULTICS devait représenter un bond en avant conceptuel et technologique singulièrement remarquable. C'est dans la section I de son rapport *Multics Design Notebook* que F. J. Corbató devait exposer les objectifs qu'il entendait atteindre à long et court terme pour faire de l'O.S. MULTICS un véritable *Computer Utility System*. Au nombre de 9, les buts fixés à longs termes étaient les suivants

- « 1. Faire fonctionner un système de services informatiques sur une base continue, 7 jours par semaine, 365 jours par an, comme les compagnies oeuvrant dans les secteurs du téléphone et de l'énergie. Ceci implique catégoriquement que les pannes de ce système doivent être rares et de courte durée (par exemple quelques secondes).
2. Le système doit non seulement être capable de gérer un nombre important d'utilisateurs utilisant des consoles, mais il doit aussi pouvoir prendre en charge un large spectre de terminaux, comme des tables de traçage, des capteurs optiques, etc.

²²⁶ S. Chiou, C. Music, K. Sprague, R. Wahba, « A Marriage of Convenience : the Founding of the MIT Artificial Intelligence Laboratory », *Structure of Engineering Revolutions, Project History Rough Draft*, M.I.T. A.I. Lab., 5 décembre 2001.

3. *Le système doit pouvoir veiller sur des expérimentations conduites en temps réel ou des équipements offrant un temps de réponse garanti (par exemple quelques microsecondes) avec des niveaux déterminés d'activité du processeur (par exemple quelques millisecondes), avec un coefficient d'utilisation défini (par exemple quelques secondes).*

4. *Le système doit être capable de se partitionner de manière à ce que :*

a. chaque partie du système puisse faire de la maintenance préventive et vérifier les autres composants.

b. Une fiabilité supplémentaire puisse être atteinte par programmation grâce à la duplication des calculs et leur vérification par plusieurs processeurs, et

c. les processeurs puissent être appliqués à des systèmes en temps partagés distincts et séparés. Un exemple serait celui d'un sous-système traitant les opérations de suivi d'une antenne radar pendant qu'un autre sous-système se chargerait du time-sharing normal [...].

Autant que possible le fonctionnement du système et les opérations de partitionnement devraient être automatisées.

5. *Les programmes du système devraient être aussi modulaires que possible de sorte à améliorer sa clarté, ses possibilités de maintenance et de mise à jour [...].*

6. *Le système doit pouvoir exploiter symétriquement des processeurs multiples et aussi reposer sur une multiprogrammation efficace de façon à qu'aucun utilisateur individuel n'ait à se préoccuper lui-même des problèmes de concurrence et de sa capacité à écrire sans difficulté des programmes [...].*

7. *Un important objectif est de développer un langage de programmation système qui soit vraiment indépendant des machines [employées]. En particulier, la majeure partie de la programmation du système et toutes les applications utilisateurs devraient être rédigés dans ce langage de manière à ce que le système puisse être transféré d'un ordinateur à un autre sans qu'il soit nécessaire de modifier plus de 25 à 50 kilo octets*

de code [...].

8. Des objectifs supplémentaires sont des compilateurs incrémentiels et des logiciels de débogage totalement symboliques, comme MADBUG.

9. Pour terminer, le système entier pourra être écrit sous la forme de segments de programmes, à l'exception de quelques programmes, qui pourront être conçus comme de pures procédures. ».

Comme il est possible de s'en rendre assez rapidement compte lorsque l'on examine cette liste d'objectifs à long terme, les concepts de fond qui sous-tendaient le projet de Corbató dans son ensemble étaient la robustesse (stabilité), la modularité, la polyvalence (souplesse ou ouverture), l'ergonomie (au sens d'une grande facilité d'utilisation, de mise en oeuvre et d'entretien), sans oublier une certaine indépendance vis-à-vis des spécificités techniques des plateformes matérielles où il se pourrait se voir déployé. Robustesse pour commencer car à l'origine, le *MULTiplexed Information and Computing Service* et les équipements qui lui étaient attachés devaient être à la distribution de l'information sous forme électronique ce que les centrales électriques et leurs extensions étaient à celle de l'énergie. Or alimenter en données informatiques une grande ville américaine réclamait que l'on recoure à des instruments informatiques et des programmes particulièrement stables de façon à minimiser les risques de pannes, et, pour le cas où un incident matériel et/ou logiciel viendrait malgré tout à se produire en dépit de toutes les précautions prises, limiter au maximum la durée effective de ce dernier. Tout cela bien sûr sachant qu'il s'agissait ici de desservir concurremment non plus quelques dizaines d'utilisateurs, comme était déjà capable de le faire le *Compatible Time Sharing System*, mais plusieurs centaines. Qui plus est, sur une période nominale d'une année, cette desserte devait théoriquement être réalisée de façon continue (autant que faire se pouvait étant donné que réduire complètement à néant les probabilités de dysfonctionnements des nombreux supports physiques composant le système MULTICS était bien entendu chose impossible).

Pour reprendre précisément les termes de l'auteur, il était question d'un système de services informatiques capable de travailler « *7 jours par semaine, 365 jours par an* ». Pour ces différents motifs, et compte tenu de l'ampleur et de la complexité²²⁷ qui en principe

²²⁷ MULTICS étant un système en temps partagé capable de gérer concurremment plusieurs centaines de terminaux informatiques, son ampleur et sa complexité structurelles représentaient autant de facteurs

devaient être celles du système MULTICS, il était impératif que chacun de ses composants matériels soit d'une grande robustesse. En procédant de la sorte, c'est-à-dire en s'efforçant de limiter préventivement le nombre de ses « points de faiblesse » potentiels, il devenait possible de réduire appréciablement les risques de pannes de l'installation en temps partagé, tout en lui conférant un excellent niveau de tolérance aux interruptions accidentelles. Corbató ambitionnait également de renforcer la tolérance du MULTICS en s'appuyant sur la programmation. Il prévoyait ainsi de doter ses modules logiciels de séquences informatiques spéciales leur permettant de réaliser des opérations de maintenance sur eux-mêmes (codes vérificateurs et autocorrecteurs), et de mener aussi des procédures de contrôle sur d'autres programmes (codes vérificateurs et correcteurs). Grâce à l'intégration de ces sous-programmes spécialisés, il devenait en droit possible de détecter (et éventuellement de solutionner) les pannes de manière automatisée, avant même que celles-ci ne se produisent. Pour ajouter encore au niveau de sécurisation de l'ensemble, le créateur du nouveau système de *time-sharing* du M.I.T. prévoyait de dupliquer l'exécution des calculs avant de confier ensuite à plusieurs processeurs la vérification des résultats ainsi obtenus. Pour le cas où l'une des unités de traitement impliquées dans les computations aurait été victime d'une défaillance quelconque, il est évident que ce doublement systématique des procédures de calcul et cette parallélisation du contrôle des résultats auraient permis de révéler l'anomalie dans des délais acceptables.

La deuxième chose importante ici était la nature modulaire de MULTICS. A la solution consistant à mettre au point un seul et unique logiciel de temps partagé pour assurer la gestion de plusieurs centaines de terminaux proches et distants, Fernando J. Corbató devait préférer une approche programmatique axée sur le fractionnement et la subdivision fonctionnelle, c'est-à-dire une approche s'appuyant sur les propriétés conjointes de disjonction, de corrélation, de cohérence et de distribution hiérarchique caractéristiques des systèmes et de leurs composants. Si en lieu de place de cela il avait opté pour la réalisation d'un système d'exploitation monolithique, rigide, cela aurait quasi inévitablement conduit à l'obtention d'un fichier informatique de taille colossale, très certainement caractérisé par une propension marquée à l'effondrement pur et simple dès la première difficulté sérieuse rencontrée. La modularité, la segmentation, le partitionnement étaient en revanche des principes qui garantissaient au nouvel *Operating System* toute la souplesse et la consistance nécessaires au bon accomplissement des tâches qu'on entendait lui confier. Dans ces

nécessairement appelés à contribuer à l'augmentation du risque statistique de survenance d'un problème technique.

conditions et à l'inverse de ce qui se produisait classiquement avec les gros programmes conçus d'un bloc, l'indisponibilité passagère d'une partie non vitale du système avait de grandes chances de ne pas affecter le fonctionnement des autres modules ou bien de n'avoir sur lui que des conséquences limitées. De surcroît et puisque de manière générale l'interdépendance des modules composant le *MULTiplexed Information and Computing Service* n'était pas absolue, l'effectuation de toutes les opérations de localisation, de maintenance et de mise à jour susceptibles tôt ou tard de les concerner à titre individuel ou groupé devait s'en trouver grandement facilitée. Ce dernier point concernant en fait ce que l'on conviendra de nommer l'accessibilité des « entrailles logiques » de MULTICS, on peut éventuellement considérer qu'il participait de l'important effort entrepris pour conférer une bonne ergonomie au système.

Regardant justement cette volonté de rendre facile l'accès à MULTICS on peut encore remarquer deux choses (au moins). D'une part toutes les procédures informatiques réalisées par ce système en temps partagé – qu'elles aient au demeurant concerné la gestion du fonctionnement des divers équipements lui servant de plateformes matérielles ou bien celle des accès utilisateurs - devaient être absolument transparentes pour ses usagers. Supposant l'emploi éventuel de plusieurs processeurs et le recours certain à une microprogrammation efficace, l'optimisation des modalités de prise en charge automatique de ces opérations forcément très nombreuses constituait ainsi un objectif de tout premier ordre dans la mesure où le fonctionnement proprement dit du programme de *time-sharing* ne devait sous aucun prétexte venir interférer avec les activités conduites par ses utilisateurs. Il était également entendu que ces derniers ne devaient jamais avoir à se préoccuper de ce que faisait MULTICS. Selon le principe régisseur fondamental de l'informatique en temps partagé, l'illusion devait être maintenue pour chaque individu utilisant MULTICS que la totalité des ressources disponibles sur le système informatique support à un instant donné se trouvait placée à sa seule et unique disposition. Inversement, cette contrainte principielle rendait de fait impérative l'intégration dans le code de MULTICS de mesures de protection logicielles. Ces fonctionnalités spéciales étaient tout simplement destinées à sécuriser le *MULTiplexed Information and Computing Service*, c'est-à-dire à empêcher que les travaux informatiques effectués par ses usagers ne viennent accidentellement perturber, voire même empêcher, l'action de l'*Operating System*.

Enfin l'accent était mis par Corbató sur la nécessité de mettre au point ici « *un langage de programmation système* » qui soit *presque entièrement indépendant* des matériels initialement employés pour développer et faire fonctionner MULTICS. Certes les ordinateurs

capables de recevoir ce programme comme système d'exploitation possédaient en commun une même architecture de base : celle déterminée vingt ans auparavant par John Von Neumann. Mais le fait était qu'il existait aussi souvent entre eux des dissimilarités matérielles prononcées. Ces disparités étaient non seulement susceptibles de donner lieu à des écarts de performances assez remarquables, mais en outre, elles exigeaient fréquemment qu'une application élaborée sur un mainframe de marque et de type donnés soit profondément révisée – comprendre réécrite en grande partie – pour pouvoir fonctionner sans encombre sur un autre... Quand bien même une aussi vaste opération de refonte se trouvait être parfaitement réalisable dans une majorité de cas, il s'agissait encore et toujours de programmation - pire encore, de reprogrammation - autrement dit d'un processus par définition long, difficile et coûteux. Entreprendre ici la conception d'un langage de programmation *désolidarisé* de toute plateforme informatique, c'est-à-dire d'un langage de programmation *générique*, c'était par conséquent chercher à se doter d'un outil logique permettant de contourner largement cet obstacle (à défaut de permettre sa complète suppression). Etant donné que le langage en question ne devait être « organiquement » attaché à aucune configuration informatique spécifique, il était clair que si on l'utilisait pour écrire un pourcentage conséquent de lignes codant pour une application devant être mise en œuvre sur une machine particulière, la proportion de lignes de codes à réécrire dans le cas d'une « exportation » de ce programme vers un mainframe différent du premier serait relativement peu importante (l'estimation donnée par le scientifique se situe dans une fourchette allant de 25 à 50 kilo-octets). Et il en serait évidemment ainsi pour chaque nouvelle installation. La mise au point et l'utilisation d'un tel langage devaient donc autoriser une conservation en l'état de la majeure partie des programmes qui seraient rédigés grâce à lui. Cette facilitation du portage – en d'autres termes de l'exportation - de MULTICS d'un ordinateur à un autre représentait un autre aspect important de l'axe de développement voulu ici par F. J. Corbató, axe qui consistait entre autres choses à faire de ce système d'exploitation et de gestion du temps partagé une application informatique ergonomique, c'est-à-dire en considérant ce dernier terme au sens large, un programme conjuguant grande facilité de mise en œuvre et d'emploi.

Le dernier point notable concernant MULTICS était certainement son ouverture (ou si l'on préfère, sa souplesse). Ainsi en plus de pouvoir administrer simultanément de très nombreux terminaux, avec toutes les contraintes fonctionnelles qu'une capacité de ce genre supposait, le successeur du *Compatible Time-Sharing System* devait être capable de prendre en charge ce que le scientifique appelait « *un large spectre de terminaux* ». Par cette expression il fallait en fait entendre une gamme étendue et variée de périphériques d'entrée et

de sortie. Les exemples donnés par Corbató étaient les tables de traçage et les capteurs optiques. Dans le même ordre d'idées, MULTICS devait également être en mesure de réceptionner et de traiter des entrées informationnelles effectuées à fréquence régulière, à partir d'instruments d'expérimentation opérant en temps réel. Une nouvelle fois, il était évident que cette aptitude à recevoir et à piloter des équipements d'entrée/sortie variant grandement en genre et en fonction ne devait pas venir interférer avec le fonctionnement du système, ni non plus se faire au détriment de son niveau normal de performances²²⁸. On ne manquera pas de noter au passage que cette philosophie ouverte, cette flexibilité voulue par son principal maître d'œuvre pour le *MULTiplexed Information and Computing Service* (et par nécessaire voie de conséquence pour les divers équipements supposés lui servir de support physique), allaient totalement à l'encontre des lignes technologiques et commerciales suivies par une grande compagnie comme I.B.M. (que ces lignes aient par ailleurs concerné le matériel ou le logiciel).

Concrètement, et puisqu'il ne s'agissait pas d'entamer ici cet ambitieux projet en partant de rien, MULTICS devait hériter de son prédécesseur C.T.S.S. un certain nombre de caractéristiques et de fonctionnalités déterminantes. La première et la plus compliquée à mettre en œuvre de ces propriétés – surtout à pareille échelle – était bien évidemment la gestion du temps partagé. Il n'est guère besoin pour nous de revenir maintenant sur son principe. Deux autres fonctions dont le caractère novateur le disputait à leur utilité plus qu'évidente, à savoir MAIL (échange de messages alphanumériques courts entre utilisateurs terminaux du système de *time-sharing*) et RUNCOM (ligne d'invite de commande ou *Shell*), furent également reprises, améliorées et intégrées au répertoire de fonctionnalités de MULTICS. Mais le système d'exploitation MULTICS se différenciait d'abord et avant tout des accomplissements antérieurs grâce aux remarquables innovations logicielles et matérielles dont il était pourvu. Parmi le faisceau de nouveautés dont il devait de fait être (le premier) porteur, il est possible de mentionner :

- 1°) la segmentation de la mémoire laquelle, pour la décrire dans ses grandes lignes, consiste à organiser dynamiquement l'espace mémoire en zones (segments) allouables aux différents types d'objets (tableaux, piles, données, etc.) rencontrés lorsque l'on élabore un programme.

²²⁸ Sachant par exemple qu'il existait d'emblée une dissymétrie importante entre la fréquence des accès machine réalisés par des instruments travaillant en temps réels – ces accès se répétant suivant une période de temps déterminée – et ceux, forcément irréguliers, faits par les multiples utilisateurs du système depuis leur terminal individuel.

- 2°) une mémoire virtuelle à trois échelons: dotée d'une architecture hiérarchisée à triple niveau (utilisation de la mémoire interne, d'un dispositif de pagination et d'un disque magnétique de grande capacité), cette mémoire au mode opératoire automatisé donnait à chaque usager connecté à MULTICS via son terminal l'illusion qu'il avait à sa disposition l'intégralité de l'espace de stockage principal de l'ordinateur, cela grâce à un jeu de correspondances entre des adresses logiques (c'est-à-dire des adresses numériques « virtuelles » générées par l'unité centrale de traitement) et les adresses physiques (réelles) de la machine.
- 3°) un système de fichiers hiérarchisé capable entre autres choses de gérer les noms de fichiers (que ces derniers correspondent à des chaînes alphanumériques longues ou courtes), les répertoires de travail, le contrôle des accès faits par les usagers aux données et aux applications et d'assurer la liaison dynamique de segments (liens symboliques ou *symlinks*).
- 4°) une capacité à prendre en charge à chaud (c'est-à-dire sans qu'il soit nécessaire d'interrompre momentanément le système informatique pour procéder à leur connexion ou à leur enlèvement), des périphériques d'entrée/sortie amovibles (processeurs, disques durs, unités de lecture et d'écriture de bandes magnétiques).
- 5°) des mesures logicielles de protection renforcées assurant la sécurité du noyau de MULTICS en interdisant par exemple que des usagers distants n'altèrent la structure de son code informatique (intentionnellement ou accidentellement). MULTICS est très certainement l'un des premiers systèmes d'exploitation dont le processus de conception prévoyait dès le départ l'incorporation de dispositifs de ce genre.
- 6°) le recours, pour programmer MULTICS, à un langage de programmation universel de haut niveau en lieu et place d'un assembleur. En l'occurrence il s'agissait de l'*Early Programming Language I* (E.P.L.), une déclinaison simplifiée (et mise au point au M.I.T.), du *Programming Language n°1* ou PL/I d'I.B.M.
- 7°) la possibilité de supporter n'importe quel langage de programmation.

La programmation et le déploiement du *MULTiplexed Information and Computing Service* se terminèrent au cours de l'année 1969. A ce moment précis, trois dizaines de terminaux étaient déjà raccordés au système d'exploitation multi utilisateurs et aux équipements informatiques élaborés par les équipes du *Massachusetts Institute of Technology*, de la *General Electric* et des *Bell Laboratories*. Les années passant, le système connut des améliorations et des extensions successives, ce qui permit d'accroître notablement ses capacités. Pour ce qui était de la gestion des consoles placées en situation de connexion active par exemple, la charge maximale que le système MULTICS était en mesure de supporter sur certaines grandes installations commerciales entrées en service au cours de la première moitié des années 70 devait se monter à plusieurs centaines de postes²²⁹. On ne manquera pas de remarquer que c'était là dix fois plus d'unités terminales que ne pouvait en supporter le désormais obsolète *Compatible Time-Sharing System* du M.I.T. *Computing Center*.

Nous avons indiqué plus haut que MULTICS avait effectivement commencé à fonctionner de manière régulière au M.I.T. en 1969. A peu de choses près, cinq années s'écoulèrent donc entre les travaux de préparation réalisés par son principal maître d'œuvre, Fernando J. Corbató, et le moment où le nouveau dispositif d'informatique en temps partagé de l'institut de technologie américain commença à entrer progressivement en service. Malgré des qualités aussi indéniables qu'inédites – il intégrait de nombreuses innovations technologiques, il était stable, puissant, sécurisé et pouvait accepter près de trois cents connexions concurrentes sur un total d'un millier de terminaux raccordés – ni son achèvement, ni non plus le fait d'être devenu opérationnel, ne suffirent à conférer à MULTICS ses véritables lettres de noblesse. Ses qualités technologiques avaient beau être unanimement reconnues, certains commençaient en effet à douter qu'il puisse effectivement faire l'objet d'un processus de commercialisation dans des délais acceptables. Or à l'heure où la vente séparée des logiciels était en train de devenir un enjeu économique majeur aussi bien pour les constructeurs d'ordinateurs que pour les firmes productrices de programmes, au moment où tous les acteurs du secteur informatique – y compris I.B.M. – prenaient graduellement

²²⁹ Une des plus importantes installations MULTICS des Etats-Unis était celle du fabricant américain *General Motors*, à Detroit. Fonctionnelle en mai 1974 et opérée par la *General Motors Information Systems and Communications Activity*, la configuration informatique multi utilisateurs du géant de l'automobile américain comprenait six processeurs. Sur 17000 utilisateurs enregistrés, 200 pouvaient être simultanément pris en charge par le système. Bien évidemment, dans les faits, le nombre de consoles gérables simultanément par le système dépendait étroitement du type de tâches réalisées par leurs opérateurs. Ainsi, dans l'hypothèse où ces derniers n'auraient effectué que de petits travaux de programmation en langage assembleur, ce nombre aurait pu être élevé. A l'inverse, des travaux informatiques exigeant des ressources système considérables (par exemple de la programmation en langage de haut niveau avec un affichage graphique), auraient eu pour conséquence de le limiter.

conscience de l'importance stratégique du time-sharing ou se voyaient confortés dans leur choix technologique s'ils y avaient cru dès le départ, la perspective d'un retard important, pour ce qui concernait la mise au point d'une version commerciale de MULTICS, représentait quelque chose de parfaitement intolérable. Ce doute croissant devait donc avoir des répercussions négatives sur la suite du projet MULTICS.

Ainsi, au mois d'avril 1969, les responsables des *Bell Telephone Laboratories* décidèrent de mettre un terme définitif à la collaboration qu'ils avaient entamée une demi-décennie plus tôt avec la *General Electric* et le M.I.T. Les raisons de ce retrait avaient essentiellement à voir avec le temps de développement de MULTICS, lequel, pensaient-ils, n'avait déjà que trop duré, et la perspective, désormais de plus en plus lointaine et incertaine, d'en voir enfin une version commercialisable mise au point. Les souvenirs évoqués par certains employés des *Bell Laboratories* ayant pris part au développement de MULTICS sont on ne peut plus explicites au sujet de ce dernier point. Dans « The Evolution of the Unix Time-sharing System », un article écrit en 1984, Dennis M. Ritchie, un des co-développeurs du célèbre système d'exploitation Unix, est revenu en ces termes sur les motifs qui avaient amené les *Bell Labs* à se désengager du projet MULTICS:

« Pour les sciences informatiques aux Laboratoires Bell, la période 1968-1969 fut quelque peu marquée par l'incertitude. La raison principale de ceci était le retrait progressif, quoique clairement inévitable, des Bell Labs du projet MULTICS. Pour la communauté informatique des Bell Labs dans son ensemble, le problème était l'évidence croissante de l'échec [du projet] MULTICS à fournir rapidement n'importe quelle sorte de système utilisable, sans même parler de la panacée évoquée plus tôt²³⁰ ».

C'est la même sorte de constat que l'on retrouve dans « Before Multics There Was Chaos, and Afterwards, Too », un très court texte consacré au développement de MULTICS, qu'il est possible de consulter dans la section histoire du site Internet de la compagnie *Lucent Technologies*²³¹ :

²³⁰ Dennis M. Ritchie, « The Evolution of the Unix Time-sharing System », *AT&T Bell Laboratories Technical Journal*, vol. 63, n° 8, (partie 2), pp. 1577-1594, octobre 1984. Document consultable en ligne à l'adresse suivante: <http://cm.bell-labs.com/cm/cs/who/dmr/hist.htm>.

²³¹ Anciennement *AT&T Technologies* (filiale équipements d'*AT&T* qui rassemblait notamment les *Bell Telephone Laboratories* et la *Western Electric Corporation*), le consortium *Lucent Technologies* a vu le jour en septembre 1996, après qu'*AT&T*, pour des raisons de compétitivité, ait décidé de conférer une presque totale autonomie à sa branche équipements.

« *Le temps passant, l'espoir céda la place à la frustration tandis que les efforts du groupe échouaient à produire un système qui soit d'une quelconque utilité économique. Les Bell Labs se retirèrent de l'effort en 1969*²³² ... ».

Certes, que ce soit en termes de puissance, de flexibilité ou bien encore de sécurité, le système d'exploitation en temps partagé réalisé par les trois partenaires ne possédait strictement aucun équivalent au monde. Cependant, et si cela nous est autorisé pour l'occasion, la façon dont MULTICS, sur le plan de son architecture informatique, pouvait être perçu par les spécialistes de la communauté informaticienne, serait la mieux rendue par l'expression certes imaginée mais ô combien appropriée en la présente circonstance, « d'usine à gaz ». Le cœur du système, ce que nous avons nommé plus haut son noyau et qui possédait la particularité de résider dans la mémoire de l'ordinateur de façon permanente, était relativement « léger » puisque son code ne « pesait » que 135 kilo-octets (pour faire nôtre ici le vocabulaire habituellement utilisé par les informaticiens). Mais ce *kernel*²³³, dont les fonctions premières entre toutes consistaient à administrer les ressources de l'ordinateur et à permettre à ses composants physiques et logiciels d'interagir entre eux, n'était pas le seul et unique constituant du *MULTiplexed Information and Computing Service*. Ce dernier, considéré dans son intégralité (c'est-à-dire en prenant en ligne de compte le *shell*, les applications utilisateurs telles que MAIL, le compilateur du langage E.P.L., etc.), ne comprenait pas moins de 1500 modules fonctionnels différents. Chacun de ces modules étant en moyenne composé de plusieurs centaines de lignes de code, cela faisait s'élever le poids total de MULTICS à plus de 4 méga-octets. Il est vrai que nous sommes aujourd'hui habitués à des capacités de stockage atteignant plusieurs centaines de giga-octets. Néanmoins nous n'avons pas encore oublié que l'espace disponible sur trois disquettes courantes de 3,5 pouces (soit 3 x 1,44 Mo), aurait été tout à fait suffisant pour enregistrer totalement le système d'exploitation MULTICS. Cela ne peut manquer de nous paraître dérisoire, tout spécialement lorsque l'on place ces quelques chiffres en regard des performances actuellement affichées par nos petites machines domestiques. Toutefois et pour ne donner que cette seule indication, il suffit de rappeler que la capacité totale de la mémoire à tores de ferrite du premier GE-645 reçut par le *Massachusetts Institute of Technology* n'était que de 512 mots. La longueur nominale de ces mots informatiques étant de 36 bits, cela équivalait donc, après rapide

²³² <http://www.bell-labs.com/history/unix/chaos.html>.

²³³ Le terme anglais *kernel* signifie noyau. Il est fréquemment utilisé tel quel en français, afin de désigner la part de code fondamentale (et par là même indispensable) d'un système d'exploitation informatique.

conversion en octets, à un espace d'enregistrement d'environ 2,25 méga-octets. Bien entendu, lorsque MULTICS fonctionnait, la totalité des modules le composant ne se voyait pas intégralement chargée en mémoire. Seules les unités logicielles nécessaires au fonctionnement du système et aux activités de ses usagers à un moment donné l'étaient sachant qu'au fur et à mesure de l'évolution de la session en cours, certaines d'entre elles, devenues temporairement inutiles, pouvaient être déchargées de la mémoire pour laisser leur place à d'autres (allocation dynamique des ressources). Qui plus est, la plupart des compilateurs disponibles sous MULTICS étaient en général conçus de façon à favoriser l'optimisation de la densité du code informatique. Cette façon de procéder basée sur la condensation permettait certes de réaliser de précieuses économies en matière de place occupée en mémoire. Mais elle possédait cependant une contrepartie de poids. Ainsi, elle empêchait que l'on puisse tirer pleinement partie des performances de l'unité centrale de traitement de l'ordinateur sur lequel était installé le système d'exploitation en temps partagé. La détermination puis l'implémentation réussie du principe de la mémoire virtuelle devait constituer une réponse efficace à ce problème central, cependant, la gourmandise et la complexité légendaires de MULTICS continuèrent à représenter un frein majeur à son expansion dans les milieux utilisateurs de matériels informatiques.

Le *MULTiplexed Information and Computing Service*, premier grand système d'exploitation informatique capable de gérer le temps partagé sur une grande échelle, possédait incontestablement les défauts de ses qualités. Cependant ni ses imperfections ni non plus le retrait des *Bell Telephone Laboratories*, en 1969, n'empêchèrent MULTICS de rencontrer finalement un certain succès commercial. Et cela dans le monde entier. Les *Bell Labs* s'étant prématurément retirés de l'ambitieuse entreprise, la tâche de la conduire à son terme échut donc aux deux membres restants de la troïka originale, à savoir le M.I.T. et la *General Electric*. Les deux premiers sites MULTICS – en dehors bien sûr du dispositif expérimental du M.I.T. – furent mis en place en 1967, au sein des installations des *Bell Telephone Laboratories*²³⁴, à Murray Hill, et de celles de la *General Electric New Product Test*, à Phoenix. Il s'agissait là encore de structures destinées à faire du développement et des tests. Il fallut en fait attendre la fin de l'année 1970 pour commencer à voir des systèmes d'exploitation MULTICS opérer ailleurs que sur les machines de ses créateurs historiques. Les premières installations commerciales furent celles de l'U.S. *Air Force Rome Air Development Center*, (opérationnelle en août 1970, fermée en 1989), et de l'*Honeywell*

²³⁴ Cette installation fut fermée en 1969, après que les *Bell Labs*. aient annoncé qu'ils se retiraient du projet MULTICS.

Information Systems Billerica Computer Operations (1971-1992). Durant l'année 1970 *Honeywell* qui, avec I.B.M., UNIVAC, *Radio Corporation of America*, *General Electric*, *Control Data Corporation*, *Scientific Data Systems* et *Burroughs*, comptait parmi les huit plus puissants fabricants d'ordinateurs américains, prit sous son contrôle les activités informatiques de la *General Electric Corporation*.

Par le jeu complexe des alliances économiques, les deux corporations américaines, la *General Electric* et *Honeywell*, entretenaient des relations privilégiées avec *La Compagnie des Machines Bull*. Lorsqu'elle prit la décision de se recentrer sur ses activités industrielles premières, en 1986, *Honeywell* vendit d'ailleurs sa division informatique à son partenaire *Bull*. L'existence de ces liens industriels franco-américains, la forte implantation de *La Compagnie des Machines Bull* dans nombre de grandes institutions et entreprises françaises, et le fait que le Gouvernement Français figure au nombre des principaux actionnaires de *Bull*, permet de comprendre pourquoi, sur les 84 sites MULTICS qui furent implantés dans le monde à partir de 1970, 31 le furent dans l'hexagone²³⁵. Au total, les principaux pays européens (c'est-à-dire la France, l'Allemagne, la Hollande et le Royaume-Uni), devaient totaliser près de la moitié des installations MULTICS de la planète. *Honeywell* abandonna officiellement le développement de MULTICS au mois de juillet 1985. Le dernier site informatique exploitant le *MULTiplexed Information and Computing Service* fut celui du *Canadian Department of National Defense*. Il a été définitivement fermé le 30 octobre 2000.

Incontestablement, et dès le départ les gens du *Massachusetts Institute of Technology* s'employèrent à élaborer ce système d'exploitation informatique en temps partagé avec cet objectif prioritaire en tête, MULTICS fut la pièce maîtresse du *Project M.A.C.* En matière de technologies informatiques, les avancées qui peuvent être portées au crédit des différentes équipes de recherche ayant prit part à cette formidable entreprise technoscientifique sont au moins aussi nombreuses qu'elles peuvent revêtir un intérêt capital. Grâce au travail des chercheurs du M.I.T., au soutien de J.C.R. Licklider, le Directeur de l'A.R.P.A./I.P.T.O., et des millions de dollars que l'*Advanced Research Projects Agency* injecta dans le *Project*

²³⁵ Il ne serait pas utile de toutes les mentionner ici, mais parmi les installations françaises les plus notables, on pourra par exemple citer celles du Centre de Calcul Vectoriel pour la Recherche (Ecole Polytechnique, 1983-1990), du Centre Interuniversitaire de Calcul de Bretagne (Université de Rennes, 1981 – 1988), du Centre Interuniversitaire de Calcul de Grenoble (Université de Grenoble, 1978 – 1987), du Centre Interuniversitaire de Calcul de la Région Parisienne (1983 – 1989), du Centre Interuniversitaire de Calcul de Toulouse (Université Paul Sabatier, 1981 – 1989), du Crédit Lyonnais (Paris, 1983 – 1986), des I.N.R.I.A. (Institut National de la Recherche en Informatique et en Automatique) de Rennes (1982 – 1988), de Sophia-Antipolis (1981 – 1986), de Rocquencourt (1978 – 1988), de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (1983 – 1988), des Ministères de la Culture (1981 – 1988) et des Finances (1980 – 1984), et, enfin, de Renault (1979-1985).

M.A.C. par l'entremise de son *Information Processing Techniques Office*, des progrès absolument considérables purent être réalisés dans les trois grands domaines d'investigation qui étaient siens, c'est-à-dire les ordinateurs à accès multiples (Corbató), la connaissance assistée par ordinateur et les rapports homme/machine (Minsky, Teager, Ross, Greenberger), et enfin, l'informatique théorique. Une autre conséquence capitale du *Project M.A.C.* fut la constitution, dès juillet 1963 et la tenue de la M.I.T. *Summer Study*, d'une communauté de scientifiques puissamment fédérée autour de la notion d'informatique en temps partagé. Certains de ces savants (et les laboratoires universitaires auxquels ils étaient affiliés), appartenaient déjà à l'*Intergalactic Computer Network*, le petit réseau de contractants de l'A.R.P.A. que J.C.R. Licklider avait entrepris de constituer dès 1962-63 afin d'encourager la recherche et l'enseignement en informatique, de favoriser les rencontres et l'échange des idées entre les chercheurs impliqués, et aussi et surtout de promouvoir auprès d'eux la notion d'informatique interactive. Bien évidemment tenus au fait des spectaculaires avancées réalisées au sein du *Project M.A.C.*, certains des membres de l'*Intergalactic Computer Network* démarreront leurs propres projets de *time-sharing* (comme par exemple le *Project Genie* à l'Université de Californie à Berkeley). La plupart d'entre eux formeront quelques années plus tard le noyau actif qui, sous l'égide de l'A.R.P.A. et du *Department of Defense*, donnera naissance au réseau ARPANET²³⁶, l'ancêtre d'Internet. Représentant un moteur d'inspiration et de motivation puissant pour les communautés scientifique et industrielle américaines, le *MULTiplexed Information and Computing Service* était comme nous l'affirmons plus haut la colonne vertébrale et le coeur du *Project M.A.C.*

Puissant, robuste, évolutif, MULTICS, malgré une complexité et une lourdeur souvent décriées, incarnait en effet une nouvelle conception de l'informatique. Celle qui conjugait les caractères du *Computer Utility System* cher à Fernando J. Corbató et les vertus du modèle de l'informatique interactive défendue par J.C.R. Licklider. Si la commercialisation de MULTICS devait en définitive se solder par un demi-échec, l'existence même du système d'exploitation multi utilisateurs du M.I.T. eut clairement le mérite de démontrer aux acteurs majeurs de l'industrie informatique mondiale que le *time-sharing*, et par conséquent les équipements qui étaient capables de le supporter, représentaient l'avenir de cette technologie. Tout le monde finit par se laisser convaincre de cela, y compris la société I.B.M. dont on sait parfaitement le peu d'enthousiasme que la notion de temps partagé avait suscitée chez elle jusque-là...

²³⁶ ARPANET: *Advanced Research Projects Agency Network*.

MULTICS ne fut pas à proprement parler une réussite économique. D'une façon qui ne manque pas d'ironie, cela ne fut heureusement pas le cas d'UNIX. Il n'est pas du tout exagéré de prétendre que ce descendant direct de MULTICS dont les premières versions furent programmées aux *Bell Telephone Laboratories* dans les années 1969-70 - c'est-à-dire après que la division recherches d'AT&T ait mis fin à son association avec le M.I.T. et la *General Electric* - représenta une des plus grandes réussites *indirectes* du *Project M.A.C.* Ce sont Dennis M. Ritchie (connu pour avoir co-développé le langage C), Kenneth Thompson (le second développeur de C), et Douglas McIlroy (le créateur du concept informatique de *pipeline*), qui le conçurent. Ces trois informaticiens des *Bell Labs* avaient participé à la programmation de MULTICS, sur le GE-645 que possédait leur employeur. Les trois hommes continuèrent à travailler sur le GE-645. Ken Thomson écrivit même un des premiers jeux vidéo sur cette machine (*Space Travel !*). Cependant le mainframe de la *General Electric* était fort peu adapté à ce type *d'applications* – le coût de l'heure de calcul était encore élevé - et aux yeux de son concepteur, le jeu tournait trop lentement. Avec l'aide de son collègue D. M. Ritchie, K. Thomson entreprit donc d'en écrire une nouvelle version en assembleur, pour un mini-ordinateur D.E.C. P.D.P.-7. Forts de l'expérience qu'ils avaient été en mesure de glaner en travaillant sur MULTICS mais sans encore bénéficier du plein support financier des *Bell Labs* (les projets concernant les systèmes d'exploitation n'étant guère prisés aux *Bell Labs* en raison de la déconvenue antérieurement provoquée par MULTICS), les deux hommes, bientôt secondés par McIlroy, se lancèrent alors dans le développement d'un système de gestion de fichiers multitâche. Ils le dotèrent de quelques-uns des utilitaires déjà présents sur MULTICS (comme un système de fichiers arborescent, un interpréteur de commandes, un assembleur), ainsi que d'une capacité de prise en charge multi-utilisateurs (limitée à deux opérateurs sur le P.D.P.-7). C'est à ce moment que l'informaticien Brian W. Kernighan²³⁷ suggéra de donner au nouveau système le nom d'UNICS. Signifiant *UNiplexed Information and Computing System* – il s'agissait là évidemment d'une attaque à peine voilée contre MULTICS et sa légendaire complexité -, l'acronyme fut bientôt abrégé en UNIX. Quelques mois après cela, le *Bell Labs Computer Science Research Group* (C.S.R.G.) commença à s'intéresser de très près à UNIX. Désirant voir ce nouveau système d'exploitation pourvu de fonctionnalités supplémentaires et porté sur une machine plus récente et plus puissante que le P.D.P.-7 – en l'occurrence un P.D.P.-11/20 - le C.S.R.G. accorda alors son soutien financier à l'équipe de

²³⁷ En 1978 Dennis M. Ritchie et Brian W. Kernighan écrivirent ensemble le premier livre consacré au langage de programmation C: *The C Programming Language*. Cet ouvrage est également connu sous les appellations de « *The White Book* », et « *The K&C* » (pour Kernighan et Ritchie).

Ritchie et Thomson. UNIX se vit alors enrichi d'un éditeur de textes et d'un programme de formatage de textes (lesquels n'étaient autres que les descendants de *RUNOFF* et *runoff*, les éditeurs de texte respectivement disponibles sur C.T.S.S. et MULTICS). L'étape suivante – assurément décisive – fut franchie en 1973, lorsque les *Bell Labs* décidèrent de reprogrammer la majeure partie de l'O.S. UNIX en langage C.

Cette décision devait avoir plusieurs répercussions très importantes. D'abord, C était un langage de programmation de haut niveau générique, ce qui impliquait 1°) que l'employer facilitait grandement l'écriture des programmes ; 2°) qu'il pouvait être utilisé sur quasiment n'importe quelle plateforme informatique (à la différence des assembleurs, conçus pour un ordinateur et un processeur en particulier) ; et 3°) que le code UNIX généré en C gagnerait en compacité et en efficacité, autrement dit qu'UNIX serait à la fois plus rapide et moins gourmand en ressources machine qu'il ne l'était auparavant. Ceci ne signifiait ni plus ni moins que grâce à l'usage du C, l'environnement UNIX était devenu un système d'exploitation très performant qui possédait un haut degré de portabilité. En outre, et toujours pour ces mêmes raisons, son code source pouvait être aisément modifié. A partir de cette base logicielle ouverte, n'importe quel type d'expérimentation pouvait donc être conduit. Cette première version en C d'UNIX sera dénommée *Unix Time-Sharing System V4* et c'est l'Université de Californie à Berkeley qui en sera la première grande utilisatrice institutionnelle. A partir de la version *V6* de l'environnement d'exploitation, laquelle sortira au mois de mai 1976, la politique des *Bell Telephone Laboratories* concernant les Universités consistera à leur céder UNIX (code source compris) en échange d'une somme symbolique²³⁸. Facilement modifiable (à cause de l'emploi du langage C et de la complète disponibilité des sources), UNIX deviendra ainsi très populaire dans les mondes de la recherche et de l'éducation. Des licences seront également cédées au gouvernement américain et aux firmes commerciales désireuses de recourir à l'environnement mis au point par Ritchie et Thomson. Les années passant le succès d'UNIX, loin de se démentir, s'amplifia encore davantage. En mars 1978, l'Université de Berkeley introduisit sa propre déclinaison d'UNIX: B.S.D.-1 (pour *Berkeley Software Distribution* ou *Berkeley Systems Distribution*). B.S.D.-1 était basé en grande partie sur le code source d'*Unix Time-Sharing System V6 (Bell Labs.)*. Au début de la

²³⁸ Pour mettre un terme à son monopole national, le démantèlement d'*AT&T* fut initié par la Justice américaine en 1974 (des précédents annonceurs avaient déjà eu lieu en 1956 et 1968). Dans les années 70, le géant des télécommunications *AT&T* n'était déjà plus autorisé à commercialiser autre chose que des matériels téléphoniques ou télégraphiques. D'où cette politique de distribution d'UNIX, quasiment à perte.

décennie 80, *AT&T*²³⁹, annonça la disponibilité prochaine de nouvelles versions d'UNIX. Ce fut tout d'abord UNIX *System III* (en 1981), puis UNIX *System V* (en 1983), et les évolutions successives de ce dernier (SVR2, SVR3, SVR4)... Dans le même temps la *Western Electric*, filiale d'*AT&T*, continua à distribuer les anciennes variantes de l'environnement. D'où l'installation d'un inévitable sentiment de confusion à partir de ce moment. Les nouveaux systèmes UNIX d'*AT&T* étaient à présent livrés sans leur code source²⁴⁰ et ils étaient tous pourvus du protocole d'échange de données de machine à machine *Unix to Unix Copy Program*²⁴¹ (un prédécesseur de TCP/IP). Qui plus est, ils bénéficiaient désormais du support officiel d'*AT&T*, ce qui faisait donc d'eux des produits commerciaux à part entière²⁴².

L'Université de Berkeley, deuxième foyer originel d'UNIX, ne cessa quant à elle de perfectionner B.S.D. et d'en distribuer les versions successives aux institutions et aux professionnels demandeurs. En s'appuyant sur le code source d'UNIX *V6* ou sur celui de B.S.D.-4.2 (1983) de nombreuses entreprises spécialisées dans l'informatique et/ou la programmation – on citera notamment *Microsoft (Xenix OS, 1980)*, *Sun Microsystems (SunOS, 1981)*, *D.E.C. (ULTRIX-32, 1984)*, *Hewlett Packard (HP-UX, 1986)* ou *I.B.M. (AIX, 1986)* - développèrent à leur tour leurs propres variantes d'UNIX. Celles-ci seront désignées sous le nom « d'UNIX propriétaires ». L'avènement de la micro-informatique, et plus particulièrement celui des PC au début des années 80, incitera encore certains à mettre au point des versions simplifiées d'UNIX (par exemple MINIX, conçu en 1985 par Andrew S. Tanenbaum à des fins pédagogiques), ou fortement inspirées par lui (*Linux*, en 1991). La confusion engendrée par la multiplication des variantes d'UNIX (qu'il s'agisse de versions *AT&T* ou de versions propriétaires), et la trop fréquente incompatibilité de ces dernières ont fini par lourdement porter atteinte à la popularité de ce système d'exploitation. Aujourd'hui, subsistent essentiellement 5 systèmes descendant d'UNIX : trois logiciels libres dérivés des versions mises au point à Berkeley (*OpenBSD, FreeBSD, NetBSD*), *Mac OS X (Apple Computer)* et GNU-Linux (en versions commerciales ou libres).

Couplées avec l'apparition du microprocesseur, des mémoires en semi-conducteur et du micro-ordinateur, tirant pleinement bénéfice de la montée en puissance du mini-ordinateur, les recherches décisives menées dans le cadre du *Project M.A.C.* ont eu de très importantes

²³⁹ Les versions III et V d'UNIX furent élaborées au sein de l'*AT&T Unix System Group* et de l'*AT&T Unix System Development Lab*.

²⁴⁰ Ce qui interdisait d'emblée à leurs utilisateurs qu'ils puissent les modifier facilement (en tout cas en demeurant dans la légalité).

²⁴¹ *Unix to Unix Copy Program* était un prédécesseur de TCP/IP. Le protocole réseau TCP/IP sera implémenté sur UNIX en 1983, avec la version 4.2. de B.S.D.

²⁴² Après le démantèlement d'*AT&T*, survenu dans les années 70, le *Department of Justice* autorisa l'ancien géant des télécommunications à reprendre position sur le marché informatique.

répercussions sur l'évolution de l'informatique dans les années 70 et 80. Ainsi qu'il a été dit la dernière installation exploitant l'environnement MULTICS s'est vu désactivée dans le courant de l'année 2000. C'est là un formidable exemple de longévité dans un secteur – le logiciel en général et les systèmes d'exploitation en particulier – fort justement réputé pour sa propension aux changements rapides, multiples, et incessants. Même si les systèmes UNIX propriétaires sont comme nous le signalions en perte de vitesse depuis plusieurs années maintenant, les résultats des travaux effectués dans les années 1964-70 par J.C.R. Licklider, F. J. Corbató, D. M. Ritchie, K. Thomson et leurs nombreux collaborateurs du M.I.T., de la *General Electric* ou des *Bell Labs.*, sont toujours présents à nos côtés, que ce soit par exemple au travers des différentes distributions B.S.D. d'UNIX ou bien encore des descendants des utilitaires, des applications et des protocoles informatiques employés sur nos actuels réseaux locaux, nationaux, ou mondiaux. Ces derniers, en raison de leur architecture, de leur complexité, de leur degré d'extension, de leur mode opératoire et de leurs performances, diffèrent largement du modèle de *Computer Utility System* envisagé initialement par Fernando J. Corbató au terme de la première moitié des années soixante. Cependant, quelle que soit leur importance, ces différences ne doivent en aucun cas venir occulter tout ce qu'Internet, directement ou indirectement, doit au *Project M.A.C.* et à ceux qui furent ses principaux maîtres d'oeuvre. MULTICS, ses installations informatiques spéciales, UNIX, certains des progrès qui furent alors réalisés en matière d'informatique interactive, occupent bien évidemment une place de tout premier ordre au sein de cet héritage. John A. N. Lee a parfaitement résumé cela :

« [Grâce au] développement de l'informatique en réseau, laquelle a presque naturellement suivi le développement de l'informatique en temps partagé et de l'informatique interactive, c'est comme si le monde entier partageait [désormais] des myriades d'ordinateurs fournissant des commodités qui se situent bien au-delà des rêves qui furent faits par les chercheurs du M.I.T. au cours des années 60. Mais c'est là que tout a commencé – avec les idées de John McCarthy, les talents de concepteur de Fernando J. Corbató, la vision de J. C. R. Licklider, et les prédispositions organisationnelles de Robert Fano²⁴³. ».

²⁴³ John A.N. Lee, « About This Issue », in *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 14, n° 1, janvier-mars 1992, pp. 3-4.

2.2.7.4. L'Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET), le National Science Foundation Network (NSFNET) et l'Interconnected Networks²⁴⁴ (Internet).

2.2.7.4.1. Le mythe de l'origine militaire d'ARPANET et les contributions de Paul Baran : architecture distribuée et Store and Forward Packet Switching.

Une conception exceptionnellement tenace, au sein de la communauté planétaire que forment actuellement les centaines de millions d'utilisateurs du réseau Internet, est celle de l'origine militaire du réseau des réseaux (Internet). Énoncée telle quelle, c'est-à-dire sans nuance aucune, cette idée ne peut être qualifiée que d'inexacte. Bien qu'ils soient nés l'un et l'autre dans le contexte de confrontation politique, idéologique, technologique et militaire qui caractérisa les relations des blocs est et ouest pendant plus de trente ans après la fin de la deuxième guerre mondiale, ARPANET et Internet n'ont *pas* été imaginés au sein des laboratoires scientifiques de l'armée américaine. Ils n'ont pas non plus été mis au point afin de répondre spécifiquement aux besoins des militaires. Le foyer originaire de ces deux réseaux informatiques – le premier ayant comme on le sait disparu au profit du second vers la fin des années 80 - se situe en réalité au point de convergence des « lignes médiatrices d'action » d'une multitude d'acteurs qui appartenaient à l'un ou l'autre des trois pôles du triptyque université-armée-industrie²⁴⁵. De la même façon que cette puissante synergie triangulaire avait donné naissance à l'ordinateur et à l'informatique au cours du deuxième conflit mondial, 20 ans après cela, elle engendra les problématiques et les solutions technologiques qui aboutirent finalement à la mise en place progressive d'ARPANET. Tout de même. L'étonnante persistance de l'idée selon laquelle ce réseau est une construction d'origine militaire nous enjoint fortement à penser qu'elle doit posséder un certain fond de vérité. En réalité, et à notre sens, il existe au moins deux facteurs concomitants – le premier de nature historique, le second d'essence technologique - qui permettent de rendre compte de l'existence de ce moderne mythe électro-cybernétique. Le premier de ces déterminants est lié

²⁴⁴ Officiellement le terme « Internet » est en usage depuis le début de l'année 1983. À l'origine il servait de désignation alternative pour nommer le réseau ARPANET. Aujourd'hui sa signification la plus couramment admise et avancée – car il s'agit d'une concaténation de mots – est *Interconnected Networks* (réseaux interconnectés). Malgré la prédominance de fait qui le caractérise, ce sens n'est pas le seul auquel ce vocable renvoie. Parfois tombées en désuétude, toujours rarement mentionnées, différentes significations peuvent ainsi lui être attribuées: *Internetworking*, *International Network*, *Internetting*, *International inter-connected networks*.

²⁴⁵ Parmi tous ces acteurs il en était au moins un - J.C.R. Licklider pour ne pas le nommer - qui jouaient un rôle déterminant au sein de plusieurs des organisations composant les différents pôles du triptyque.

de façon évidente au contexte historique fort singulier dans lequel les différentes recherches en informatique qui concoururent à rendre effectivement possible la mise en réseau d'ordinateurs distants furent réalisées. Que l'on pense au *Semi Automatic Ground Environment* (réseau militaire continental de surveillance aérienne intégré) ou bien aux multiples efforts entrepris à la fin des années cinquante et au cours des années soixante pour faire du *time-sharing* et de l'informatique interactive des réalités, tous ces travaux, toutes ces conditions technologiques de possibilité de l'apparition des réseaux d'ordinateurs, furent menés sur fond de guerre froide, de tensions internationales sans précédents, et de menace d'anéantissement nucléaire mutuel permanente. Il semble donc parfaitement raisonnable de voir dans cette simultanéité, dans cette superposition de faisceaux d'évènements historiques et technologiques, une des causes principales de la croyance qui veut qu'ARPANET ait été au départ un réseau militaire. Mais ce n'est pas suffisant.

La deuxième cause de cette croyance tient à l'origine – ou plutôt un des trois foyers d'origine – de la solution qui put être apportée à deux des trois problèmes techniques majeurs qui se dressaient alors sur la voie de l'établissement d'un grand réseau informatique, à savoir celui de la communication entre les ordinateurs appartenant au réseau logique et celui de l'optimisation de l'utilisation des lignes longue distance employées pour relier physiquement ces derniers. Dans l'un et l'autre cas, cette solution prit la forme de la transmission par paquets (*packet switching* en anglais). Nous reviendrons sur le détail de cette technologie d'une portée absolument cruciale pour les réseaux informatiques un peu plus loin. Pour l'instant, il sera suffisant de dire que le concept de transmission par paquets fut imaginé durant la première moitié des années 60 par quatre chercheurs différents, oeuvrant de manière séparée²⁴⁶ pour le compte d'organisations distinctes. Comme c'est très souvent le cas dans ce genre de circonstances, aucun de ces hommes – les américains Paul Baran (*RAND Corporation*) et Leonard Kleinrock (M.I.T. puis U.C.L.A.) ainsi que les britanniques Donald W. Davies et Roger A. Scantlebury (*National Physical Laboratory*) - n'était au courant de ce que faisaient les autres. Il fallut attendre la seconde moitié des années soixante pour qu'ils en viennent enfin à prendre mutuellement conscience de l'existence de leurs recherches respectives. Pour les raisons que nous allons à présent exposer c'est le travail de Paul Baran qui nous intéresse tout particulièrement ici. Bien qu'elles n'aient pas différé des travaux de Kleinrock et de Davies et Scantlebury dans leur résultat fondamental – c'est-à-dire la notion

²⁴⁶ Seuls les deux scientifiques anglais travaillaient ensemble, au N.P.L.

essentielle de *packet switching*²⁴⁷ – les recherches réalisées par Paul Baran possédaient ceci de spécifique qu’elles avaient effectivement à voir avec la faisabilité de la réalisation d’un réseau informatique *militaire* doté d’une robustesse suffisante pour lui permettre 1°) de survivre aux effets directs et indirects d’une attaque nucléaire et ; 2°) de pouvoir autoriser la réalisation de l’ensemble des procédures de communication de commande et de contrôle requises par la conduite de frappes balistiques de représailles.

En 1949, après avoir décroché un diplôme en ingénierie électrique au *Drexel Institute of Technology*, Paul Baran rejoignit l’*Eckert-Mauchly Computer Corporation*. Au contact des concepteurs de l’E.N.I.A.C. et de l’E.D.V.A.C., il eut la possibilité de se familiariser avec l’ordinateur ainsi qu’avec les nouvelles méthodes et technologies employées dans le champ du calcul digital électronique. Après son départ de l’E.M.C.C., en 1950, Paul Baran occupa successivement deux emplois : le premier à la *Raymond Rosen Engineering Products*, où il oeuvra notamment à la mise au point d’un enregistreur de vol magnétique militaire, et le second à l’*Audio Video Products Co.*, où il exerça la fonction de consultant. En 1955, Baran fut embauché par la *Hughes Aircraft Company*. Versé au sein du *Ground Systems Department* de l’avionneur, il prit part à la conception de plusieurs systèmes radar terrestres et embarqués. Dans les derniers mois de l’année 1959, et après avoir obtenu un diplôme d’ingénieur en électronique à l’Université de Californie à Los Angeles (U.C.L.A.), il intégra le *Computer Science Department* de la *Mathematics Division* de la *RAND Corporation*. C’est au sein de cette organisation qu’il mena l’essentiel de ses travaux regardant les technologies de communication des réseaux informatiques.

Evidemment la décision, par Baran, de s’engager dans cette catégorie de recherches ne dut strictement rien au hasard. Elle fut motivée par le sentiment de grande incertitude, par l’ambiance d’intense inquiétude, engendrés par l’extrême fragilité des relations qui existaient alors entre les deux superpuissances nucléaires de la planète. Dans une interview accordée le 24 octobre 1999 à David Hochfelder (*IEEE History Center Oral History Program / Rutgers University*), Paul Baran est revenu de manière circonstanciée sur le climat général difficile qui régnait aux Etats-Unis au moment précis où il commença à travailler pour la *RAND Corporation* :

« A la fin de l’année 1959 [...] le problème majeur auquel devaient faire face le pays et le monde entier était que la Guerre Froide qui sévissait entre les deux superpuissances

²⁴⁷ L’expression usitée par Baran n’était pas *packet switching* (celle-ci était une création de D.W. Davies) mais *distributed adaptive message block switching*.

*avait atteint un point tel que les deux adversaires avaient commencé à construire des systèmes de missiles hautement vulnérables [d'un point de vue militaire]. En outre ces derniers étaient également sujets à des accidents. Dans l'hypothèse du déclenchement d'une offensive thermonucléaire, le responsable de l'agression, quel qu'il soit, serait quasiment assuré de neutraliser la majeure partie de la capacité de représailles de son adversaire. Il s'agissait d'une époque hautement instable et dangereuse. Un simple tir accidentel était susceptible d'occasionner une guerre nucléaire. Une alternative souhaitable, ici, était celle consistant à disposer de la capacité de résister à une première frappe, de façon à pouvoir ensuite pleinement riposter. Une telle capacité – parfois désignée sous l'expression de « capacité de seconde frappe » - permettait de réduire significativement l'avantage écrasant que conférait le fait d'être le premier à frapper [avec des moyens nucléaires]. Si les deux blocs disposaient d'une capacité de représailles capable de supporter une première attaque, une configuration [géostratégique] bien plus stable en résulterait. Quelquefois appelée *Mutually Assured Destruction* [destruction mutuelle assurée], cette situation est aussi connue sous un acronyme tout à fait approprié, M.A.D²⁴⁸. C'était une période complètement folle [...]*

Le point le plus faible, dans la capacité à assurer une frappe de représailles, résidait dans le manque de fiabilité des communications. A l'époque nous ne savions pas comment construire un système de communication capable de survivre aux dégâts occasionnés par des armes ennemies, quand bien même ces dommages n'auraient été que collatéraux. En effectuant des simulations informatiques, la Rand Corporation détermina que le système de lignes longues distances d'AT&T, lequel acheminait la quasi-totalité des communications militaires du pays, serait rendu inopérant par des dommages physiques relativement mineurs.

Alors que la plupart des liaisons et des nœuds du système téléphonique demeurerait intacts, quelques points critiques de ce système analogique hautement centralisé seraient détruits par les dommages secondaires occasionnés par les missiles pointés sur les bases aériennes. Il s'effondrerait alors comme un château de cartes. Ceci rendait peu envisageables les communications critiques à longue distance. Quid alors des hautes fréquences radio, c'est-à-dire des courtes longueurs d'onde ? Le problème, ici, est qu'une seule explosion nucléaire occurring à haute altitude suffit à empêcher la propagation des ondes par la voie des airs des heures durant. Bien que les transmissions radio puissent continuer à se faire au sol, la propagation des ondes par voie aérienne, si essentielle aux communications à longue distance, ne fonctionnerait plus. Les portées radio utilisables seraient alors réduites à quelques

²⁴⁸ Rappelons qu'en français, le terme anglais « *mad* » signifie en effet « fou » ou « dingue ».

dizaines de kilomètres. L'extrême vulnérabilité de nos moyens de communication représentait un véritable danger : [de façon quasi inévitable] chaque commandement de base serait contraint de faire face au dilemme suivant : soit ne rien faire dans l'éventualité d'une agression effective, soit prendre au contraire la décision d'agir, ce qui signifiait une guerre totale et irrévocable. Un système de communications assez robuste pour résister à une première frappe nucléaire apparaissait comme une nécessité capable de réduire les tensions existantes au paroxysme de la guerre froide [...] A ce moment là, les préoccupations exprimées concernaient la réalisation d'un système à même de supporter les Communications Essentielles Minimum – un euphémisme employé pour parler de l'autorisation présidentielle de mettre à feu les missiles²⁴⁹ ».

C'est dans ces circonstances historiques tout à fait exceptionnelles et pour répondre à l'un des impératifs géostratégiques primordiaux auxquels elles avaient donné lieu – *i.e.* doter rapidement les plus hautes instances militaro gouvernementales des Etats-Unis d'une capacité de communications à longue distance suffisamment robuste pour pouvoir continuer à fonctionner après avoir subi les effets d'une frappe de missiles intercontinentaux – que Paul Baran, avec le soutien initial plutôt timide de son nouvel employeur et de l'U.S. Air Force²⁵⁰, débuta ses recherches sur les réseaux à la RAND Corporation. Au mois de mai 1960 l'ingénieur en électronique se trouva en mesure de produire l'un des tout premiers documents consacrés aux réseaux distribués. Intitulé « *Reliable Digital Communications Systems Using Unreliable Network Repeater Nodes*²⁵¹ », ce mémorandum s'intéressait aux capacités de survivance des réseaux de télécommunication pour le cas où ces infrastructures évidemment vitales en temps de guerre seraient victimes des effets directs et/ou indirects d'une soudaine attaque nucléaire. Edité deux fois dans des publications internes de la RAND Corporation (d'abord dans le briefing B-265 puis dans le mémo P-2626), ce rapport fut présenté aux

²⁴⁹ Paul Baran, *Electrical Engineer*, « An oral history conducted in 1999 by David Hochfelder », IEEE History Center, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, USA. Une transcription écrite de ce document est consultable en ligne : www.ieee.org/organizations/history_center/oral_histories/transcripts/baran.html#Achilles. On s'intéressera ici tout particulièrement aux quatre premières sections de la troisième partie du texte (*Not-for-Profit Period : The RAND Corporation : 1959-68 ; Cold War Threat : ~ 1959 ; Communications the Achilles Heel : 1960+ ; Broadcast Station Distributed Teletypewriter Network : 1960*).

²⁵⁰ Dans l'entretien qu'il a accordé en 1999 à David Hochfelder, Paul Baran a rappelé que lors de son entrée à la Rand Corporation, l'U.S.A.F. était « synonyme de défense nationale. Les autres services étaient secondaires ». On connaît les liens singulièrement privilégiés que l'armée de l'air américaine entretenait avec l'institution de R&D depuis l'année 1948. Compte tenu de tous ces paramètres et du rôle fondamental qu'elle avait joué dans la mise en place du réseau informatique S.A.G.E., le fait que l'U.S. Air Force ait financé les travaux de Baran par l'entremise de la RAND Corporation ne saurait être considéré comme quelque chose de surprenant.

²⁵¹ Paul Baran, « *Reliable Digital Communications Systems Using Unreliable Network Repeater Nodes* », RAND Corporation Mathematics Division Report n° P-1995, 27 mai 1960.

militaires au cours de l'été 1961. Baran développa plus avant les résultats qu'il avait obtenus dans une série de 11 rapports successifs, tous rédigés entre l'année 1960 et l'année 1964. L'article *On Distributed Communications Networks*, qui n'était rien d'autre qu'une version condensée de ces onze rapports, fut publié une première fois le 1^{er} mars 1964 dans les *IEEE Transactions on Information Theory*²⁵². Au mois d'août suivant, c'est la *RAND Corporation* qui, sous le titre *On Distributed Communications*²⁵³, édita l'ensemble des travaux de Baran. Cette édition marqua un tournant important pour Paul Baran. Jusqu'alors, ses recherches sur les réseaux digitaux distribués n'avaient rencontré quasiment aucun écho favorable chez ceux qu'elles auraient pourtant dû intéresser en tout premier lieu. Ainsi la plupart du temps, ni les confrères de Baran (à commencer par les ingénieurs des télécommunications, par trop accoutumés aux technologies analogiques de transmission du signal), ni les représentants militaires auxquels elles avaient été soumises, ni les industriels des télécommunications, n'avaient considéré d'un très bon œil les propositions innovantes de l'ingénieur. Or cette édition récapitulative du mois d'août 1964 signifiait que les responsables de la *RAND Corporation* avaient pris la décision de valider de façon officielle les travaux de Baran. En manifestant de la sorte son soutien à son employé, l'organisation de R&D crédibilisait enfin les recherches de l'ingénieur aux yeux des représentants des armées et du monde de l'industrie. Ce faisant, et puisque Baran ne faisait plus figure de franc tireur plus ou moins isolé au sein même de l'institution à laquelle il appartenait, il existait désormais d'excellentes chances pour que des contrats de recherche dignes de ce nom puissent enfin être signés avec les partenaires habituels de la *RAND*. Pourtant, et contre toute attente, l'appui officiel de la *RAND Corporation* n'autorisa pas Baran à conclure des alliances assez solides pour lui permettre de concrétiser ses idées. Il faut dire aussi que parmi tous ceux qui possédaient quelque raison valable de s'opposer à son ambitieux projet, figurait un groupe industriel américain formidablement puissant et influent. Dans son numéro du 29 mai 1964²⁵⁴, le *Time Magazine* n'avait d'ailleurs pas hésité à qualifier ce dernier de « plus grande compagnie au monde ». De fait et à n'en point douter les plus fortes résistances - pour ne pas dire les plus

²⁵² Paul Baran, « On Distributed Communications Networks », in *IEEE Transactions on Information Theory*, 1er mars 1964.

²⁵³ Paul Baran, Sharla P. Boehm, Joseph W. Smith, *On Distributed Communications. Vols. I through XI. Memorandum*, Santa Monica, Californie, Rand Corporation, août 1964. Cette publication était composée des rapports RM-3420-PR, RM-3103-PR (rédigé avec S. P. Boehm), RM-3578-PR (rédigé avec J. W. Smith), RM-3638-PR, RM-3097-PR, RM-3762-PR, RM-3763-PR, RM-3764-PR, RM-3765-PR, RM-3766-PR et RM-3767-PR. Deux de ces rapports – le premier comportait des éléments techniques concernant une capacité de cryptographie intégrée au réseau, le second avait trait à ses zones de faiblesse et aux moyens de les supprimer – firent l'objet d'une procédure de classification.

²⁵⁴ *Time Magazine*, « AT&T The Worlds Biggest Company », vol. 83, n°22, 29 mai 1964, pp.74 -78.

franches manifestations d'hostilité – que rencontra ici Paul Baran émanèrent des représentants du géant américain des télécommunications *AT&T*.

De la même façon que la société *I.B.M.* régnait sans partage sur l'industrie informatique, l'*American Telephone and Telegraph Company* détenait un monopole de fait sur l'ensemble des infrastructures et des services de télécommunications aux Etats-Unis (ceci étant tout spécialement vrai des lignes dédiées aux appels à longue distance). Or la proposition de Baran était porteuse d'un certain nombre d'innovations techniques qui allaient entièrement à l'encontre de la politique économico technologique que le puissant groupe national de téléphonie²⁵⁵ s'ingéniait à mettre en œuvre depuis le début du 20^{ème} siècle. Pour différentes raisons que nous allons à présent nous efforcer d'analyser nous allons voir que la philosophie corporatiste d'*AT&T* – laquelle cherchait foncièrement à renforcer sa position monopolistique et non à l'affaiblir - ne pouvait pas ne pas aboutir à autre chose qu'au rejet brutal des idées de Baran.

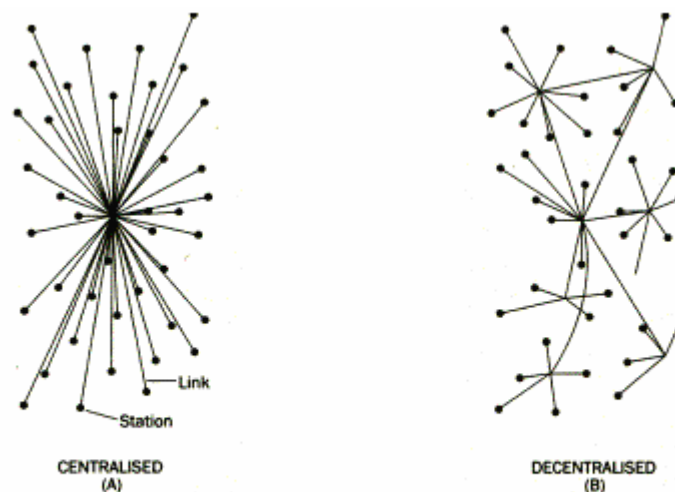


Fig. 9: réseau centralisé et réseau décentralisé. Diagrammes originaux de Paul Baran, in Memorandum RM-3420-PR, août 1964, p. 2.

Les innovations technologiques proposées par Baran et qu'*AT&T*, aussi bien pour des motifs techniques que politiques et « culturels », ne pouvait décidément pas tolérer étaient au nombre de trois. La première d'entre elles concernait la configuration du réseau de télécommunications. Selon Baran, les deux modèles qui, conjugués l'un avec l'autre, avaient été employés pour bâtir le réseau de télécommunications américain possédaient intrinsèquement de très importantes faiblesses structurelles. Ces deux modèles visibles sur la

²⁵⁵ Politique dont la ligne directrice avait été énoncée aussi tôt qu'en 1907 par son Président Théodore N. Vail et qui se trouvait clairement exprimée par le slogan suivant : « *One Policy, One System, Universal Service* ».

figure présentée ci-dessus étaient le modèle à architecture centralisée et le modèle à architecture décentralisée. Dans le premier de ces deux cas (diagramme *A*), le design logique du réseau prévoyait qu'un nombre de nœuds secondaires n (ou stations) soit tous connectés les uns aux autres par l'intermédiaire d'un nœud central unique. Schématiquement si à un instant t , une communication devait être établie entre un nœud secondaire et un autre, que ceux-ci soient géographiquement voisins ou forts éloignés, le signal portant cette communication devait impérativement être envoyé par le nœud secondaire émetteur au nœud central, avant d'être réacheminé par ce dernier en direction du nœud secondaire récepteur. Entre deux nœuds secondaires, quels qu'ils puissent être, il n'existait donc qu'une seule route transitant obligatoirement par le nœud central de la structure. Il va sans dire qu'en cas d'attaque nucléaire, le degré de vulnérabilité d'un réseau de ce type était maximal. Ainsi, la destruction d'un lien (*link*) entre un nœud secondaire et le nœud central isolerait ce nœud du restant du réseau (lequel demeurerait néanmoins opérationnel). Plus important encore, si le nœud central venait à être touché ou à être complètement anéanti, c'est tout l'ensemble du dispositif qui cesserait immédiatement de fonctionner.

Une possible solution à ce problème consistait à multiplier les nœuds centraux du réseau – autrement dit ses points vitaux - de façon à obtenir une structure télécommunicationnelle décentralisée. Comme il est possible de le constater en examinant le diagramme *B* figurant ci-dessus, un réseau décentralisé, finalement, n'est rien d'autre qu'une structure basée sur le principe de l'interconnexion de petits réseaux centralisés. Même si, prises individuellement, elles demeureraient extrêmement fragiles, le degré de vulnérabilité de l'ensemble éclaté constitué par leur mise en liaison se trouvait être inférieur à celui des diverses structures centralisées qui le composaient. De sorte que si un dysfonctionnement important affectait un de ces nœuds centraux, ou bien si l'un d'entre eux se trouvait purement et simplement annihilé par les effets d'une frappe nucléaire, alors le sous réseau centralisé commandé par ce nœud central cessait de fonctionner sans toutefois empêcher le réseau décentralisé auquel il appartenait de continuer à opérer. En cas d'attaque, une architecture de ce genre aurait peut-être permis de maintenir un seuil d'opérabilité des communications suffisant pour organiser une contre-offensive. Cependant il est évident que ce système était encore très vulnérable. Les probabilités étaient élevées pour que des frappes multiples réalisées avec un ciblage adéquat fussent à le neutraliser.

L'architecture réseau proposée par Paul Baran différait totalement des deux modèles qui viennent d'être examinés. Ainsi, en lieu et place d'établir une hiérarchie entre les multiples stations formant la structure réticulaire, c'est-à-dire de distinguer des nœuds

secondaires ou périphériques et un ou plusieurs nœuds centraux faisant office de carrefour(s) obligé(s) pour tout transit d'informations, le schème de Baran était *acentré*. A cette absence totale de nœuds centraux – c'est-à-dire d'organes vitaux clairement identifiés – venaient encore s'ajouter un fort maillage et un niveau élevé de redondance. Ses points centraux (ou organes vitaux) étant partout, ils n'étaient en fait nulle part. Qui plus est, de chacun des nœuds du réseau partaient plusieurs liaisons (de 2 à 6 *links*), si bien que la suppression d'une station, pour les nœuds auxquels elle était connectée, n'entraînait pas une totale impossibilité d'émettre et de recevoir. Si par exemple un chemin connectant deux nœuds via un troisième devenait soudainement inopérant en raison de la destruction de ce dernier, il existait toujours plusieurs chemins, chacun d'entre eux passant par un ou plusieurs nœuds donnés, qui permettaient aux deux premiers nœuds de continuer à échanger des données.



Fig. 10 : réseau distribué. Diagramme original de Paul Baran
in Memorandum RM-3420-PR, août 1964, p. 2.

Pour le cas où il aurait été pris pour cible lors d'une offensive majeure, cet ensemble de caractéristiques – absence de centre, maillage dense, redondance importante - conférait théoriquement au réseau distribué imaginé par Baran un potentiel de survie extrêmement élevé. Bien plus élevé en tout cas que ne l'étaient ceux, respectifs, des réseaux centralisés et décentralisés. Pourquoi, alors, cette hostilité marquée de la part d'*AT&T* vis-à-vis du projet de Baran ? Il existe au moins deux raisons permettant d'en rendre compte. La première de ces raisons est relativement simple. Le réseau téléphonique américain dont la compagnie *AT&T* était à la fois le propriétaire et l'opérateur historique appartenait à la catégorie des réseaux décentralisés. Dans ces circonstances, si le puissant groupe industriel avait effectivement reconnu la pertinence des idées de Baran et le caractère révolutionnaire de son projet de

réseau distribué, il aurait, au moins implicitement, admis le fait que ses structures de télécommunications existantes étaient incapables de continuer à fonctionner après avoir été frappées militairement. Il va de soi qu'une telle chose était parfaitement inconcevable : l'*American Telephone and Telegraph Company* possédait un monopole qu'elle s'était employée à bâtir et à préserver des décennies durant. Jamais elle ne se serait laissée aller à commettre l'erreur consistant à cautionner d'une manière ou d'une autre les travaux de Paul Baran. Tout aussi dérangeante et inacceptable pour *AT&T*, mais aussi pour certains membres de la *RAND Corporation* et des armées, était la deuxième innovation proposée par l'ingénieur. Le dispositif envisagé par Baran, outre son architecture massivement distribuée, devait en effet être composé d'équipements actifs digitaux. Il était également conçu pour acheminer les signaux sous forme discrète. Or même si le *Public Switched Telephone Network* (P.S.T.N.) américain intégrait des systèmes de bascules à fonctionnement digital afin de permettre l'établissement temporaire des circuits de communication depuis l'année 1962, son mode opératoire demeurait fondamentalement analogique. Comme on le sait, la transmission analogique possède une imperfection tout à fait majeure: les longues distances, les interférences avec des sources électromagnétiques et la multiplication des nœuds de transit sur les lignes établies entre les pôles communicants entraînent rapidement et systématiquement l'apparition de bruit et d'erreurs. Avec le temps, et malgré la présence d'organes répéteurs, cela tend inévitablement à provoquer une dégradation de la qualité du signal (voire sa corruption pure et simple). Quand bien même elle n'était pas complètement exempte de défauts, l'approche digitale prônée par Baran était largement plus avantageuse que celle alors mise en œuvre sur le P.S.T.N. d'*AT&T*. Les informations codées sous forme digitale sont en effet peu sensibles à la dégradation de leur signal porteur. Qui plus est, il existe des méthodes computationnelles simples (par exemple l'adjonction d'un bit de parité à la fin de chaque séquence binaire devant être transmise) qui permettent de vérifier très facilement – le processus est automatisable – si les données reçues ont été oui ou non corrompues durant leur phase d'acheminement. Si c'est le cas, une requête de rediffusion peut être immédiatement adressée à l'émetteur afin que celui-ci réitère dans les délais les plus brefs l'émission du bloc de données corrompu. De surcroît, des algorithmes de compression pouvaient être employés ici en conjonction avec les méthodes de vérification de l'intégrité du code, qui permettaient de réaliser d'importantes économies en matière de bandes passante.

En plus de faire clairement ressortir les principales imperfections du réseau téléphonique américain (capacité de survie limitée en cas de conflit, mode opératoire analogique favorisant la croissance de l'entropie informationnelle), le projet de Baran

traduisait comme par contraste les profondes différences qui pouvaient exister au début des années 60 entre la classe des informaticiens – lesquels s’efforçaient alors de définir des méthodes et des technologies afin de pouvoir interconnecter leurs ordinateurs - et celle des spécialistes des télécommunications, qui s’occupaient d’un vaste réseau voué essentiellement à la transmission de la voix (ou plutôt à la transmission des signaux analogiques supportant cette dernière). En dépit des apparences ces deux communautés sociotechniques ne possédaient que très peu de choses en commun. Elles ne lisaient pas les mêmes revues, ne fréquentaient pas les mêmes conférences, et les corpus terminologiques auxquels elles se référaient respectivement n’étaient pas identiques. Mais quelque chose de plus fondamental encore les différençait : la nature de leurs conceptions respectives quant au mode de transmission de l’information qui devait être privilégié. Dans l’un et l’autre cas c’est ce dernier qui, bien sûr, devait déterminer le type de technologies employées pour l’acheminement du signal sur le réseau.

Sur le *Public Switched Telephone Network*, ainsi qu’il a été dit, c’est le principe analogique qui prévalait complètement. Cette modalité de fonctionnement commandait ainsi la totalité des opérations effectuées sur le P.S.T.N. et plus particulièrement celles qui concernaient l’établissement des lignes de communication. Connue sous le nom de « *Circuit Switching* », c’est-à-dire littéralement « commutation de circuit », la technologie analogique employée ici s’appuyait sur le principe de la pré-allocation d’une bande passante de largeur définie, pour tout le temps que pouvait durer une communication. Dans un réseau possédant une architecture de ce genre²⁵⁶, un circuit direct *dédié* doté d’une bande passante de taille *fixe* était par conséquent établi par le biais d’une commutation dès lors qu’une personne en appelait une autre. Le circuit téléphonique servant à l’acheminement des signaux analogiques (ou continus) entre les deux points terminaux de la ligne (c’est-à-dire entre l’émetteur et le récepteur et inversement), était maintenu actif pendant toute la durée de la session – quelle que puisse être la longueur de cette dernière - puis se voyait interrompu ou « déconstruit » aussitôt celle-ci terminée. Rappelant d’une manière très lointaine l’opération des échangeurs et des aiguillages ferroviaires, le principe de la commutation de circuit assurait au réseau téléphonique une certaine flexibilité architecturale. Ainsi la configuration et l’activité des connexions du réseau étaient-elles ponctuelles et évolutives puisqu’elles variaient précisément en fonction des demandes d’attribution temporaire de bande passante (c’est-à-dire des appels) effectuées par ses utilisateurs. Ce mode opératoire comportait cependant un défaut de taille.

²⁵⁶ Le réseau téléphonique opérait selon le mode de la commutation de circuits, mais c’était aussi le cas des réseaux *Telex* et *Teletype Wide-area eXchange* (TWX).

Au cours d'une communication, les séquences de silence, c'est-à-dire les phases de « blanc » où aucun échange d'informations ne survenait, pouvaient être nombreuses et répétées. Or le système était ainsi fait que pendant un appel, ces périodes d'inactivité correspondant à de la bande passante inutilisée (ou immobile) ne pouvaient pas être mises à profit afin de réaliser d'autres catégories d'actions informationnelles. Cela signifiait donc qu'une partie non négligeable de la bande passante de largeur déterminée qui caractérisait les canaux établis pour assurer la transmission des signaux téléphoniques était systématiquement gaspillée (et cela parfois dans des proportions importantes par rapport à la durée effective des communications).

Et encore est-il utile rappeler ici 1°) que les signaux servant de porteuse à la voix des interlocuteurs étaient de nature analogique et 2°) que naturellement, le mode d'expression des êtres humains est de type continue. Pour le cas où l'on aurait eut affaire à des machines digitales échangeant des informations à distance – et donc à du trafic codé en numérique - la chose aurait été pire encore. En effet les ordinateurs ne transmettent pas leurs données sur un mode continu (comme le font les hommes en parlant), mais ils les envoient et/ou les échangent par rafales ou bouffées sporadiques. En conséquence, et à défaut de pouvoir définir et employer des stratégies d'envoi et de réception des données informatiques autorisant l'optimisation de l'usage de la bande passante, une part plus importante encore de la coûteuse capacité de transmission des canaux de communication²⁵⁷ se serait trouvée inutilisée (en d'autres termes, celle-ci aurait tout bonnement été perdue).

A côté du *Public Switched Telephone Network*, dont l'opération reposait comme nous l'avons vu sur le principe de la pré-allocation de la bande passante²⁵⁸, il existait aux États-Unis de grands réseaux de communication qui opéraient selon un mode différent : celui de l'allocation dynamique de la capacité de transmission (en fonction des besoins courants). Evoquant le fonctionnement du réseau télégraphique américain, Martin Campbell-Kelly et William Aspray ont rappelé en quoi consistait exactement le principe de l'allocation dynamique et aussi comment il a évolué :

« *Dans les réseaux télégraphiques, les ingénieurs avaient déjà résolu le problème consistant à savoir comment éviter d'avoir à connecter toutes les villes les unes aux autres. La [bonne] connectivité était atteinte en recourant à un certain nombre de centres de*

²⁵⁷ Concernant ces pertes, les estimations varient, mais des évaluations oscillant entre 80% et 90% sont souvent avancées.

²⁵⁸ Il est bien évidemment question ici du P.S.T.N. tel qu'il était au cours des années 60. Il a depuis lors subi de vastes et profondes modifications technologiques (informatisation et numérisation massives).

commutation installés dans des grandes villes. Ainsi, pour expédier un télégramme disons, de New York à San Francisco, le message devrait passer par les centres de commutation de Chicago et de Los Angeles, avant de parvenir à San Francisco. Dans les premiers temps du télégraphe, durant les dernières décades du 19^{ème} siècle, à chaque centre de commutation un message entrant [était] reçu sur une machine Morse et transcrit [copié] par un clerc. Le message était alors transmis [en Morse] par un second clerc au centre de commutation suivant. Ce processus était répété à chaque centre de commutation... tandis que le télégramme était relayé à travers le pays jusqu'à sa destination finale. Un avantage incident lié à la création d'une copie écrite du télégramme était que celui-ci pouvait servir de dispositif de stockage [...] s'il survenait une augmentation du trafic [ce qui bloquait momentanément la ligne], ou si le prochain centre de commutation était occupé, ce télégramme pouvait être conservé jusqu'à ce que la ligne redevienne plus calme. Cette méthode était connue sous le nom de principe d'enregistrement et de transfert. Au cours des années 30, ces centres de commutation manuels furent mécanisés et devinrent des bureaux [...] où les messages entrants se trouvaient automatiquement enregistrés sur des bandes de papier perforé avant d'être [à nouveau] transmis par moyens mécaniques²⁵⁹. »

Sur le plan de la transmission du signal²⁶⁰, la différence majeure qui existait entre les systèmes fonctionnant selon le principe de la pré-allocation des ressources (système téléphonique) et ceux opérant selon celui de leur allocation dynamique (système télégraphique), consistait dans le fait que, dans ce dernier cas, la bande passante des connexions réalisées sur le réseau était utilisée de façon aussi optimale que possible. Aucun gaspillage de ressources (du type de ceux occasionnés par les silences ponctuant les conversations téléphoniques puisque qu'il existe toujours une certaine déperdition liée au fonctionnement du dispositif), n'était ici à déplorer. Ce dernier principe était donc très intéressant puisque non seulement il permettait de préserver la capacité de transmission du réseau (en limitant le gaspillage de la bande passante), mais il autorisait également la réalisation d'appréciables économies sur le plan du coût des communications. La chose apparaissait d'autant plus vraie dès lors que les lignes de transmission considérées étaient des lignes à longue distance. Restait cependant à découvrir grâce à quel moyen cette modalité de

²⁵⁹ In [Campbell-Kelly et Aspray, 1996], p. 291.

²⁶⁰ On négligera ici le fait que des opérations manuelles et des décisions humaines forcément longues et sujettes à erreur devaient être réalisées et prises à chaque entrée et sortie d'un message dans chacun des centres de commutation télégraphique présents sur la ligne télégraphique séparant l'émetteur du message et le destinataire de celui-ci. Le système télégraphique n'opérait pas en temps réel.

fonctionnement - l'allocation dynamique de la bande passante - pourrait être importée et effectivement mise en œuvre sur un réseau informatique, connaissant les grandes spécificités techniques qui caractérisaient les équipements appelés à réaliser les échanges de données et sachant aussi qu'ici comme ailleurs, la hauteur des dépenses engendrées par le volume des communications représentait un facteur tout à fait primordial. La solution à ce problème – à ces problèmes devrions-nous plutôt écrire puisqu'il permettait également de résoudre la difficulté que posait le risque de croissance géométrique du nombre de liaisons devant être mises en place entre les multiples nœuds constitutifs du réseau - résidait dans un concept clef que Paul Baran avait imaginé entre 1960 et 1964 : celui de *distributed adaptive message block switching*. Précisons tout de suite que bien qu'elle lui soit légèrement antérieure, la notion de *distributed adaptive message block switching* est dans son principe strictement identique à celle de *Store and Forward Packet Switching*. Cependant c'est une variante tronquée de cette dernière appellation forgée en 1965 par les chercheurs britanniques du N.P.L. Donald W. Davies et Roger A. Scantlebury qui s'est finalement imposée. Aussi nous plierons-nous désormais à l'usage en vigueur et n'emploierons-nous plus que la forme abrégée de l'expression anglaise originale ou bien sa traduction en français : soit *Packet Switching* et « commutation par paquets ». En quoi consiste alors la méthode du *Packet Switching* et pourquoi a-t-elle permis de résoudre les deux problèmes techniques dont il a été fait mention plus haut ?

Le *Packet Switching* repose fondamentalement sur une idée qui, lorsqu'on l'envisage avec tout le confort intellectuel offert par un regard rétrospectif comme le nôtre, ne peut manquer de paraître d'une grande simplicité. Il s'agit tout d'abord de prendre le message à expédier²⁶¹, c'est-à-dire la séquence de données numériques devant être envoyée, et de diviser celui-ci en blocs de données (c'est-à-dire en blocs de message ou en paquets de taille bien évidemment inférieure à celle de la séquence de départ). Le tour de force consistait ici à doter chacun de ces blocs individuels d'une sorte d'enveloppe numérique – sous la forme d'un champ spécial ou en-tête positionné au commencement du paquet – contenant des informations binaires additionnelles servant à lui conférer une identité digitale unique. Parmi les données numériques ajoutées on trouvait systématiquement: 1°) les informations spécifiant l'origine du paquet (adresse de l'ordinateur émetteur) ; 2°) les informations spécifiant la destination du paquet (adresse de l'ordinateur récepteur) ; 3°) les informations indiquant précisément la place occupée par le paquet au sein de la séquence binaire désassemblée au

²⁶¹ A supposer bien sûr que sa longueur nécessite l'exécution d'une telle opération.

départ (numéro de rang). Notons que procédures algorithmiques permettant de vérifier l'intégrité des données transmises pouvaient aussi être insérées. Porteurs de l'ensemble des informations nécessaires à leur propre acheminement (et éventuellement à leur propre contrôle), les paquets de données voyageaient indépendamment les uns des autres, passant ainsi de machine en machine. Une fois tous les paquets composant un même message effectivement parvenus à destination, la machine terminale, en recourant aux données relatives à leur positionnement individuel dans la séquence de départ, pouvait procéder à la reconstitution (ou au réassemblage) de celui-ci. On devine d'ores et déjà les énormes avantages offerts par la méthode du *Packet Switching*. Les ordinateurs (nœuds de routage) appartenant au réseau jouaient en quelque sorte le rôle de système de triage. Analysant les entêtes des paquets de données leur parvenant puis utilisant l'adresse numérique de destination qui s'y trouvait spécifiée, ces centres de commutation informatiques, quelle que soit leur place dans la topographie du réseau, réorientaient les blocs vers une machine dont l'adresse indiquait qu'elle était située au voisinage (proche ou lointain selon le degré d'avancement du processus), de l'ordinateur de destination du bloc relayé. Reposant sur un mode d'adressage numérique – à la différence de ce qui se passait sur le P.S.T.N. il n'existait pas ici de commutation physique de circuit - l'acheminement des blocs de données sur le réseau s'opérait donc de proche en proche (ou si l'on préfère de routeur en routeur). Avec cette conséquence particulièrement remarquable : si tous les blocs de données composant une séquence à expédier étaient successivement émis depuis un même ordinateur – la rapidité de la machine conférant alors à cette opération un semblant d'instantanéité – en général, tous n'arrivaient pas au même moment sur leur ordinateur de destination. Ceci simplement parce que dans le but d'optimiser le transfert des informations, le fonctionnement du réseau et le protocole d'acheminement des paquets de données tendaient par définition à disloquer cette structure processionnaire. Ainsi, à supposer qu'un instantané de l'état général du réseau soit pris à un instant t , on aurait très certainement eu la possibilité de constater des différentiels d'encombrement entre ses différents secteurs (par exemple ses différentes parties géographiques). A certains moments et en fonction des aléas affectant le trafic global occurring sur le réseau, des ralentissements, des engorgements sérieux voire des coupures plus ou moins durables étaient susceptibles de se produire.

Dans de tels cas – bien évidemment très pénalisants pour la vitesse moyenne de transmission des données – la méthode de la commutation par paquets permettait de faire circuler les différents blocs de données composant un message en les ventilant sur différents liens du réseau. En d'autres termes, si un message était scindé par l'ordinateur expéditeur en

un nombre déterminé de paquets de données, disons 5 par exemple, tous ces paquets étaient certes envoyés en direction de la machine réceptrice mais pour naviguer de proche en proche vers leur destination finale, ils pouvaient très bien ne pas emprunter les mêmes voies ni être relayés par les mêmes routeurs. En fonction de l'évolution de l'état courant du réseau, de la plus ou moins bonne disponibilité des nœuds de routage et des connexions reliant ces derniers – bref de la dynamique de la structure informatique - les blocs pouvaient donc suivre de façon séparée et indépendante des voies parfaitement distinctes avant de parvenir à leur but commun. Bien entendu ce mode opératoire impliquait que le plus souvent, les paquets émis pour un même message ne parvenaient pas simultanément à leur ordinateur de destination. Mais s'il survenait fréquemment un décalage temporel entre le moment où le premier paquet de données était reçu par la machine destinataire, et celui où le dernier paquet de données²⁶² était reçu par cette même machine, celle-ci, une fois tous les blocs réceptionnés (dans l'ordre ou dans le désordre par rapport à la distribution originale, ce dernier paramètre étant déterminé par l'état courant des nœuds du réseau au cours de la phase d'acheminement des blocs), pouvait procéder au réassemblage du message de départ en analysant simplement les données numériques d'identification contenues dans l'en-tête de ces paquets.

La technologie du *Packet Switching* permettait aussi d'optimiser grandement l'usage de la bande passante des lignes de communication du réseau. Elle supposait effectivement que cette bande ou capacité de transmission était allouée dynamiquement, c'est-à-dire attribuée en fonction des besoins courants des ordinateurs appartenant au réseau. Concrètement cela signifiait que les ordinateurs (nœuds/routeurs) d'un réseau dont le fonctionnement était basé sur la méthode de la commutation par paquets n'allouaient de la bande passante qu'au moment précis où un bloc de données était prêt à être expédié par une machine. Et encore cette allocation de bande se faisait-elle en proportion exacte de la quantité d'informations devant être transmise. De cette façon la ligne n'était monopolisée que pendant la durée nécessaire à cette procédure d'expédition, et rien de plus. En conséquence, et c'est pourquoi on peut sans nul doute affirmer ici que le principe des réseaux travaillant en *Packet Switching* était à téléinformatique ce que celui du *time-sharing* pouvait être à l'informatique interactive, il était possible de faire circuler simultanément sur une même ligne de transmission de très nombreux paquets de données en provenance et à destination de systèmes informatiques

²⁶² Ce premier et ce dernier paquet pouvant au demeurant être n'importe lequel des cinq blocs envoyés initialement par la machine émettrice et pas nécessairement le premier et le dernier bloc créés durant de la phase de découpage du message initial.

divers²⁶³. En comparaison, sur le *Public Switched Telephone Network*, un circuit physique était établi à chaque nouvel appel effectué, l'intégralité de la capacité de transmission de cette ligne se voyant d'office attribuée aux deux interlocuteurs²⁶⁴, quant bien même 90% de leur temps de communication pouvaient consister en silence.

La modalité de transmission digitale préconisée par Baran garantissait en outre au processus de transfert des données une extrême fiabilité. Ainsi, quand bien même les paquets de données transmis d'un nœud à l'autre du réseau auraient vu leur structure légèrement ou lourdement altérée en chemin, de petites procédures d'auto vérification existaient qui permettaient de révéler rapidement et avec certitude la présence d'erreurs dans la séquence. Il pouvait aussi arriver qu'un bloc de données se « perde » sur le réseau, par exemple en « rebondissant » indéfiniment entre plusieurs machines suite à la corruption d'un ou de plusieurs bits d'adressage. Dans les deux cas, et puisque chacun des ordinateurs du réseau faisait automatiquement une copie de chaque bloc de données réceptionné avant de l'expédier²⁶⁵ en direction du nœud voisin le plus proche de sa destination terminale, il se trouvait toujours en mesure de retourner une copie saine de ce bloc abîmé ou manquant à la machine réceptrice²⁶⁶. D'où la grande sûreté du *Packet Switching*, surtout si le réseau où il était déployé possédait une architecture distribuée. Dans ce cas, il existait toujours plusieurs voies par lesquelles les paquets de données pouvaient transiter, et ce quel que soit le degré d'encombrement ou de destruction du réseau. Le principe de la commutation par paquets, on le voit, ne représentait ni plus ni moins qu'une actualisation des idées (ou pour le formuler encore autrement une digitalisation des procédures), depuis longtemps mises en pratique dans le système télégraphique. C'était là d'ailleurs une des principales raisons qui faisait que le *Store and Forward Packet Switching* était souvent considéré comme un principe technologique obsolète par les ingénieurs en télécommunication des années 60, lesquels étaient singulièrement attachés aux paradigmes qui dominaient alors leur secteur d'activité, à savoir la commutation de circuits et la pré-allocation de la bande passante. Le coût excessivement élevé des ordinateurs et de leurs équipements périphériques (notamment celui des matériels d'enregistrement), ainsi que la cherté du temps de calcul, avaient jusqu'alors joué comme autant de facteurs négatifs prohibant le transfert de cette technologie au domaine

²⁶³ Un ordinateur pouvait parfaitement constituer le point d'aboutissement d'un bloc de données en transit sur le réseau, puis router le paquet suivant vers une autre machine.

²⁶⁴ Cela en vertu du principe de la pré-allocation de la bande passante régissant le fonctionnement du P.S.T.N.

²⁶⁵ A condition que cela soit nécessaire. Ces deux opérations – enregistrement et envoi – correspondaient bien entendu au « *Store* » and « *Forward* » de l'expression *Store and Forward Packet Switching*.

²⁶⁶ Le cas échéant, après avoir repéré l'absence ou la corruption dudit bloc, la machine réceptrice signalait immédiatement ce problème à l'ordinateur émetteur en lui envoyant une requête de réexpédition.

des réseaux (qu'ils soient informatiques ou téléphoniques). Cependant, à la toute fin des années soixante, ces obstacles furent progressivement levés. La spectaculaire baisse des coûts des systèmes informatiques, leur miniaturisation graduelle, couplées à l'irrépressible montée en puissance des réseaux et du *time-sharing* dans les universités et les instituts de technologie américains, contribuèrent à faire peu à peu ressortir les avantages énormes de la méthode de transmission digitale créée, ou plutôt réinventée, par Paul Baran. Pourtant l'ingénieur ne participa jamais - en tout cas de manière directe - à la création d'ARPANET.

Parce qu'en remettant en cause 1°) la topologie décentralisée de son réseau national de télécommunications et 2°) les modalités fondamentales de fonctionnement de ce dernier elles faisaient peser sur son monopole une menace sérieuse, les nouveautés technologiques proposées par le chercheur de la *RAND Corporation* ne pouvaient pas être accueillies favorablement (et a fortiori encore moins soutenues), par l'*American Telephone and Telegraph Corporation*. Dire que le groupe de télécommunications américain s'opposa ici au projet de Baran relève en vérité de l'euphémisme pur et simple. A compter d'août 1964, mois qui vit la publication par la *RAND Corporation* de l'ensemble des travaux de Baran dans le recueil *On Distributed Communications*, le chercheur vit l'organisation à laquelle il appartenait lui apporter enfin son complet appui. C'est à ce moment en effet que la *RAND Corporation* fit officiellement parvenir à son partenaire et bailleur de fonds historique, l'U.S. *Air Force*, une demande de financement concernant le démarrage d'un projet de R&D et de construction d'un réseau informatique qui reprenait les caractéristiques et les technologies que Baran avait exposées dans ses travaux. Désormais très intéressée par ces derniers, l'U.S. *Air Force* accepta immédiatement de prendre part au programme de développement que la *RAND Corporation* ambitionnait de lancer. Mais cette double caution institutionnelle et financière apportée par deux des organisations les plus puissantes et les mieux écoutées du pays échoua à leur assurer le concours d'*AT&T*. La compagnie de téléphonie qui s'était vue sollicitée ici par l'armée à la fois pour sa capacité d'expertise technologique et son important parc d'installations devait demeurer fidèle à la position qu'elle avait adoptée dès le départ vis-à-vis des memoranda de Baran. Aussi rejeta-t-elle purement et simplement l'offre de participation qui lui avait été faite.

Souhaitant voir le projet de Baran concrétisé en dépit du refus catégorique d'*AT&T* de s'y associer, l'U.S. *Air Force* s'adressa alors directement à l'U.S. *Department of Defense* afin d'obtenir dans cette affaire son approbation administrative et son soutien financier. Au cours du second semestre 1964, le Pentagone rendit son avis, lequel était favorable au démarrage effectif du projet de réseau informatique tel qu'imaginé par l'ingénieur de la *RAND*.

Cependant en lieu et place de confier la responsabilité de sa conduite à l'U.S. *Air Force*, le DoD la donna à la *Defense Communications Agency*²⁶⁷ (D.C.A.), une organisation interarmes créée en mai 1960 qui avait en charge la gestion des systèmes de communication de la défense. Mais Baran (et avec lui la *RAND Corporation* et l'U.S. *Air Force*) se heurta ici à l'incompréhension manifestée par les personnels de la D.C.A. devant ses idées « digitales », celles de réseau distribué et de *Packet Switching*. Aussi, à la fin de l'année 1964, l'auteur d'*On Distributed Communications* prit-il l'initiative de demander au *Department of Defense* d'abandonner son projet de réseau informatique distribué à commutation par paquets, par peur de le voir dénaturé²⁶⁸. Alors même qu'il venait tout juste de démarrer, ce dernier acte marqua l'abandon définitif du programme par le Pentagone.

Les contributions théoriques de Paul Baran au domaine des réseaux informatiques ont assurément eu un impact très important sur le développement de ces structures, dans les années 70. Si Kleinrock, Davies et Scantlebury redécouvrirent le concept de commutation par paquets quasiment en même temps que Baran, sa proposition de recourir à une architecture distribuée pour bâtir le réseau et lui conférer ainsi une robustesse exceptionnelle était en revanche totalement originale. Quoi qu'il en soit, et c'est bien en ceci que réside le paradoxe extraordinaire qui caractérise toute cette affaire, le seul projet de réseau militaire à architecture distribuée et commutation par paquet qui fut jamais initié au cours des années soixante, outre le fait qu'il n'avait strictement rien à voir avec l'*Advanced Research Projects Agency Network*, fut enterré cinq ans avant que la première liaison d'ARPANET ne soit établie. Pourtant, comme nous le disions en commençant cette section, l'idée selon laquelle ARPANET (et par extension Internet) possède une origine militaire, qu'il a été voulu, pensé puis construit pendant la guerre froide afin de doter les Etats-Unis d'une capacité de commande et de contrôle informatisée performante et robuste – c'est-à-dire ne possédant aucun centre opérationnel présentant un niveau de vulnérabilité tel que sa destruction entraînerait instantanément la paralysie du dispositif dans son ensemble - est très solidement ancrée dans ce que nous conviendrons de nommer ici les « croyances technologiques » actuelles des populations utilisatrices du réseau des réseaux. Comme nous nous sommes

²⁶⁷ La *Defense Communications Agency* (D.C.A.) est devenue la *Defense Information Systems Agency* (D.I.S.A.) en 1991.

²⁶⁸ Dans un entretien accordé à Andreu Veá Baró le 27 septembre 1993, Paul Baran est revenu sur ce point, déclarant qu'en raison de « *la barrière que représentait l'incapacité de l'agence assignée [i.e. la D.C.A.] à saisir les idées [contenues dans *On Distributed Networks*], nous primes la décision d'attendre une période plus favorable à leur implémentation* ». La transcription intégrale de cet entretien peut être consultée au format PDF à l'adresse suivante : http://wiwiw.org/entrevista_ej.pdf.

employés à le démontrer dans ce qui précède, rien n'est moins vrai. Nous allons à présent tenter de montrer comment est véritablement né ARPANET.

2.2.7.4.2. Réalisation d'ARPANET.

C'est au cours du mois de juillet 1964 que le mandat biennuel de Directeur de l'*Information Processing Technology Office* de Joseph C.R. Licklider prit fin. Avant qu'il ne quitte ses fonctions à l'*Advanced Research Projects Agency* pour en endosser de nouvelles chez I.B.M., l'auteur de « Man-Computer Symbiosis » usa toutefois de son pouvoir²⁶⁹ afin de désigner son successeur immédiat. Ce dernier devait bien entendu être totalement acquis à sa philosophie, c'est-à-dire à l'évolution interactive de fond qu'il désirait faire subir depuis le tout début des années 60 aux relations existant entre l'homme et l'ordinateur. A l'instar de J.C.R. Licklider, cette personne devait être aussi capable de conduire des projets et d'envisager la résolution de problèmes à long, voire très long terme. C'est Ivan Edward Sutherland, le créateur du fameux programme *Sketchpad*²⁷⁰ qui remplaça J.C.R. Licklider à la tête de l'I.P.T.O. au mois de septembre 1964. Après un passage d'une année à la *National Security Agency* en tant qu'ingénieur électronicien (et avec le grade de lieutenant), Ivan E. Sutherland devint ainsi le deuxième directeur du bureau des techniques de traitement de l'information de l'*Advanced Research Projects Agency*. Suivant ici les recommandations de Licklider qui le connaissait bien pour l'avoir appelé auprès de lui en qualité de responsable du financement des programmes informatiques de la N.A.S.A. lors de la mise en place du Comité Licklider²⁷¹, Sutherland prit contact avec Robert W. Taylor afin de lui proposer de devenir son second. Ce dernier accepta l'offre de Sutherland qui le nomma donc I.P.T.O. *Research Director of Computer Science* en novembre 1964.

²⁶⁹ Rappelons qu'en plus d'avoir créé l'A.R.P.A./I.P.T.O. en 1962, J.C.R. Licklider en avait aussi été le premier directeur. Ce double statut devait évidemment lui conférer un droit de regard déterminant quant au choix des personnes appelées à lui succéder.

²⁷⁰ Ivan E. Sutherland était diplômé du *Carnegie Institute of Technology*, du *California Institute of Technology* et du *Massachusetts Institute of Technology* (où il obtint le titre de docteur en ingénierie électrique et sciences informatiques). C'est dans le cadre de son travail de thèse (soumis en janvier 1963 sous le titre de *Sketchpad, A Man-Machine Graphical Communication System*), qu'il créa le logiciel de design assisté par ordinateur *Sketchpad* (littéralement « cahier de croquis »). Programmé sur l'ordinateur TX-2 du M.I.T. *Lincoln Laboratory*, *Sketchpad* était pourvu d'une interface graphique orientée vers l'utilisateur (*Graphical User Interface* ou G.U.I.), laquelle facilitait grandement l'utilisation du programme. Le travail de Sutherland se situait ainsi dans la droite lignée de l'évolution technologique désirée et promue par J.C.R. Licklider.

²⁷¹ Créé fin 1962 à l'initiative de J.C.R. Licklider (ainsi que sa désignation l'indique), le « Comité Licklider » était une organisation à caractère informel qui réunissait en son sein des représentants des principales institutions scientifiques américaines poursuivant des recherches en informatique (comme la N.A.S.A., le *National Institute of Health* ou encore l'*Office of National Research*). A l'image de ce qui se faisait dans les *Software User Groups*, les raisons d'être principales de ce comité qui se réunissait assez régulièrement était le partage d'informations et la prévention des redondances en matière de recherche.

Lorsque le mandat de Sutherland s'acheva, au mois de juin 1966, c'est R.W. Taylor qui prit logiquement sa succession. Très influencé par la vision « interactiviste » de l'informatique défendue par J.C.R. Licklider, Taylor avait en commun deux choses avec ce dernier. D'abord il n'était absolument pas informaticien. Ensuite, et toujours à l'instar de Licklider, son mentor, il était psychologue de formation (il s'était d'ailleurs spécialisé lui aussi dans le domaine de la psycho acoustique). De 1961 à 1965, Taylor avait occupé le poste de responsable du financement des programmes de recherche informatique au *National Aeronautics and Space Administration Office of Advanced Research and Technology* (N.A.S.A./O.A.R.T.). Là, il avait eu notamment à suivre les projets regardant les systèmes d'affichage graphique et les instruments informatiques mis en œuvre dans le cadre des simulations de vols aérospatiaux habités (toutes sortes d'interfaces qui devaient donc venir prendre place entre l'homme et la machine afin de faciliter le travail de celui-ci et rendre aussi plus aisé, plus intuitif, l'usage de cette dernière dans des conditions d'utilisation somme toute très inhabituelles). Au cours de cette période (de 1962 à 1965), Taylor finança également les recherches de Douglas C. Engelbart, alors jeune chercheur au *Stanford Research Institute*. Auteur du fameux article « Augmenting Human Intellect: A Conceptual Framework²⁷² » et fondateur du S.R.I. *Augmentation Research Center* (en 1963), Engelbart figurait aussi au rang des A.R.P.A. *Contractors* (il bénéficiait donc à ce titre d'une aide financière de l'I.P.T.O., accordée par Licklider). Le soutien apporté par Taylor à Engelbart au cours de la première moitié des années 60 exprimait parfaitement les convictions du futur directeur de l'I.P.T.O. – lesquelles se trouvaient bien entendu en complète concordance avec celles de Licklider – quant aux axes de recherche à suivre afin de développer une informatique destinée non pas à explorer ou mimer l'intelligence humaine, comme pouvaient le faire Marvin Minsky au M.I.T. ou John McCarthy à Stanford, mais à augmenter celle de ses utilisateurs grâce à ses formidables pouvoirs. Grand pionnier de l'informatique interactive, Engelbart fut en effet le maître d'œuvre du *oNLine System* (N.L.S.), un programme de recherches poursuivi au *Stanford Research Institute Augmentation Research Center* entre 1963 et 1969. Réalisé et installé sur un ordinateur *Scientific Data Systems* de type 940, le N.L.S. supportait l'utilisation en temps partagé, il intégrait une capacité de traitement de l'hypertexte, un dispositif de pointage informatique manuel à trois boutons (autrement dit une « souris »), ainsi qu'une

²⁷² Douglas C. Engelbart, « Augmenting Human Intellect: A Conceptual Framework », *Stanford Research Institute*, S.R.I. *Project* n°3578, octobre 1962. Ce document peut être consulté et téléchargé (au format PDF) à l'adresse suivante : <http://www.bootstrap.org/augdocs/friedewald030402/augmentinghumanintellect/AHI62.pdf>.

interface graphique à fenêtres (et cela à peu près une vingtaine d'années avant la sortie de la première version du désormais ubiquitaire système d'exploitation *Windows*, de *Microsoft* !).

Une des premières choses entreprises par Robert Taylor peu de temps après sa prise de fonctions à la tête de l'I.P.T.O. consista à resserrer les liens déjà existants entre les A.R.P.A. *Contractors*. Pour ce faire Taylor organisa des réunions régulières²⁷³ au cours desquelles les représentants des institutions qui bénéficiaient des aides de l'U.S. *Department of Defense* via l'A.R.P.A. étaient très vivement encouragés à se présenter leurs travaux respectifs et aussi à échanger des informations. Dans *Tools for Thought, the History and Future of Mind-Expanding Technology*, Howard Rheingold a produit une citation de Robert Taylor dans laquelle ce dernier revenait précisément sur les objectifs de ces rassemblements.

« *J'ai mis sur pied ces réunions afin que tous [les participants] puissent être au courant de ce que chacun faisait et qu'ils puissent aussi avoir des discussions d'ordre technique en ma présence [...] Je posais des questions de sorte à forcer les gens à prendre position sur des problèmes techniques [...] Je leur posais des questions difficiles. Ainsi, après être revenus dans leurs universités et leurs campus, leurs échanges se trouvaient accrus tant sur le plan de la quantité que sur celui de la qualité, parce qu'ils se connaissaient les uns les autres*²⁷⁴ ».

Cet effort réalisé en direction d'une augmentation du niveau de communication et de partage existant entre des groupes de scientifiques et de techniciens appartenant certes à différents organismes de recherche, mais aussi et surtout à une seule et même communauté « institutionnelle » – en l'occurrence celle des A.R.P.A. *Contractors* – traduisait la volonté qui animait des décideurs comme J.C.R. Licklider, I. S. Sutherland, et bien entendu R. Taylor, de tout mettre en œuvre afin 1°) d'encourager les rapports entre les chercheurs dont ils assuraient le financement et 2°) de favoriser par ce biais l'avancement des projets poursuivis par ces derniers. Outre le fait qu'elle avait pour fonction première de favoriser les échanges professionnels entre équipes scientifiques financées par le *Department of Defense*, la politique de rencontres voulue et initiée par Licklider puis perpétuée par ses successeurs visait également à prévenir l'apparition de doublons ou de développements fortement similaires au sein des programmes de recherche. Il s'agissait là d'un phénomène extrêmement coûteux, à la

²⁷³ Ces rencontres se déroulaient pendant plusieurs jours, sur une base annuelle. Dans leur esprit, elles se situaient dans la droite lignée de la tradition établie par Licklider et Sutherland.

²⁷⁴ In [Rheingold, 2000], p. 213.

fois en temps et en argent, que l'instauration d'une pratique d'échanges réguliers pouvait parfaitement contribuer à contenir, voire à réduire significativement. C'était à cette époque une chose à laquelle Robert Taylor était sensibilisé puisqu'il avait l'occasion d'en expérimenter certains des effets pervers de façon quotidienne. Dans une anecdote maintes fois contée²⁷⁵, celui qui fut le troisième directeur de l'A.R.P.A. a eu l'occasion de raconter à quel genre de « gymnastique » l'utilisation des trois terminaux informatiques qui se trouvaient installés dans le bureau qu'il occupait au sein des locaux de l'I.P.T.O. le contraignait régulièrement.

« Nous avions dans mon bureau trois consoles informatiques [nous mettant en liaison] avec trois programmes de recherche différents qui étaient financés par l'A.R.P.A. Le premier était [connecté au programme de time-sharing] de la Systems Development Corporation, à Santa Monica. Il y avait un autre terminal relié au Project Genie de l'Université de Californie à Berkeley. [...] La troisième console nous [permettait de nous connecter] au projet C.T.S.S., lequel devint plus tard le projet Multics du M.I.T. [...] Pour chacun de ces trois terminaux, je devais employer trois jeux de commandes utilisateur différents. Ainsi, si j'étais en train de communiquer en ligne avec une personne de la Systems Development Corporation et que je voulais parler avec quelqu'un que je connaissais à Berkeley ou au M.I.T. à propos de ce dont nous étions en train de discuter, je devais me lever, me diriger vers le terminal [concerné], me connecter puis entrer en contact avec les intéressés²⁷⁶. »

La situation était donc la suivante. Au début de l'année 1966, l'A.R.P.A./I.P.T.O. finançait trois des plus grands projets de time-sharing existant aux Etats-Unis. A ce titre un nombre équivalent de terminaux informatiques avaient été mis en place dans le bureau du directeur de l'I.P.T.O. afin que ce dernier puisse communiquer directement avec les personnels en charge des projets réalisés à la *Systems Development Corporation (Time-Sharing System)*, à l'Université de Berkeley (*Project Genie*) et au *Massachusetts Institute of Technology (C.T.S.S./Multics)*. En dehors du fait bien évident qu'une triple installation informatique comme celle-ci représentait nécessairement quelque chose d'encombrant, il était

²⁷⁵ Robert Taylor l'a par exemple racontée dans le cadre d'une interview accordée en 1999 à John Markoff, journaliste et écrivain américain spécialisé dans l'histoire des technologies informatiques. John Markoff et Robert Taylor, « An Internet Pioneer Ponders the Next Revolution », *The New York Times on the Web*, 20 décembre 1999. Cet entretien peut être librement consulté sur Internet à l'adresse qui suit: <http://partners.nytimes.com/library/tech/99/12/biztech/articles/122099outlook-bobb.html>.

²⁷⁶ Robert Taylor, « An Internet Pioneer Ponders the Next Revolution », *The New York Times on the Web*, 20 décembre 1999.

indispensable, pour être en mesure d'utiliser l'un ou l'autre des trois terminaux en service, de maîtriser son jeu de commandes en ligne individuel à la perfection. Les ordinateurs sur lesquels opéraient les systèmes d'exploitation en temps partagé du M.I.T., de Berkeley et de la S.D.C. provenaient en effet de constructeurs différents. Cela signifiait que chacun de ces programmes de time-sharing avait été conçu séparément, et sur un modèle d'ordinateur distinct des deux autres. En conséquence il possédait son propre répertoire d'instructions informatiques. L'apprentissage de ces ordres n'était pas quelque chose d'aisé. Pas plus d'ailleurs que ne l'était l'exercice intellectuel consistant à passer d'un jeu d'instructions à un autre, dès lors qu'il s'agissait d'entrer en contact avec des personnes attachées à des projets différents. Déjà fort peu évidente par nature, cette sorte de jonglerie terminologique se transformait ensuite en un véritable casse-tête lorsque le Directeur de l'I.P.T.O. se voyait obligé de communiquer simultanément avec deux ou trois personnes localisées en autant de places géographiques différentes. Puisque son bureau représentait en quelque sorte le centre névralgique où les terminaisons projetées de chacun des trois grands projets d'informatique en temps partagé américains aboutissaient *sans toutefois converger véritablement*, le genre de « téléconférence » que nous venons tout juste de mentionner exigeait de R. Taylor 1°) qu'il joue le rôle d'un « relais communicationnel » entre ses interlocuteurs distants (c'est lui qui transmettait les idées et 2°) qu'il passe sans arrêt d'un terminal informatique à un autre terminal informatique, c'est-à-dire d'un répertoire d'instructions à un autre répertoire d'instructions, pour effectivement jouer ce rôle. Dans la pire des configurations qui puisse être imaginée – à savoir une connexion impliquant simultanément lui-même et 3 interlocuteurs – on devine combien cet exercice devait être terriblement difficile à réaliser pour Robert Taylor. Deux choses devaient à partir de ce point amener Robert Taylor à concevoir l'idée du réseau ARPANET.

Ce sont tout d'abord un examen rapide du principe de l'informatique en temps partagé, et aussi la brève expérience qu'il en possédait à ce moment²⁷⁷, qui conduisirent Taylor à se rendre compte qu'autour de ce nouvel outil *interactif* étaient en train de se constituer de véritables communautés d'utilisateurs avertis. Il en arrivait alors à la conclusion que sans l'existence de ce système et des formidables possibilités d'échange qu'il recelait, ces individus qui travaillaient régulièrement ensemble ne seraient peut être jamais entrés en contact les uns avec les autres. Ici l'ordinateur cessait par conséquent d'être un formidable broyeur de nombres pour devenir un médium de communication hors de pair. Ensuite, et

²⁷⁷ Les trois terminaux informatiques dont il est question ici furent installés dans le bureau du Directeur de l'A.R.P.A./I.P.T.O. quelques temps avant que Robert Taylor ne prenne ses fonctions.

c'était là ce que lui révélait également la triple installation informatique qui trônait dans son bureau, ces communautés et les systèmes en temps partagés autour desquels elles s'organisaient peu à peu possédaient un défaut majeur.. Ainsi, quelles qu'aient pu être leurs caractéristiques techniques spécifiques, leur puissance, leur capacité à supporter tel ou tel nombre d'utilisateurs en même temps, toutes ces installations en temps partagé étaient des dispositifs *localisés*, placés au service de groupes humains eux aussi implantés sur des sites déterminés. La présence, dans son bureau, des trois terminaux servant à le mettre en liaison avec les systèmes en temps partagé du M.I.T., de Berkeley et de la S.D.C., amena également Taylor à s'interroger sur la faisabilité technique d'un dispositif unique qui non seulement serait capable d'accéder indifféremment à n'importe lequel de ces trois systèmes, mais qui pourrait en outre les mettre en rapport les uns avec les autres. Il s'agissait donc ici d'imaginer une structure informatique dotée de terminaux génériques, qui pourrait prendre en charge les différents systèmes de time-sharing existants tout en simplifiant l'utilisation (un seul répertoire d'instructions en ligne devrait à présent suffire).

Ce que Robert Taylor avait précisément en tête était un réseau reliant plusieurs systèmes en temps partagé. Théoriquement, en connectant ces ensembles afin de former une méta entité informatique opérant elle aussi selon le principe du temps partagé, il devenait non seulement possible de mettre en rapport les différentes communautés scientifiques qui gravitaient autour d'eux – et de constituer dans le même mouvement une méta communauté d'utilisateurs informatiques - mais l'on se trouvait également en mesure de réaliser des économies financières importantes en supprimant de nombreux équipements désormais redondants (par exemple un seul terminal serait nécessaire pour accéder à n'importe quelle installation reliée à ce réseau). Même si au milieu des années soixante la situation était très différente de celle qu'elle avait pu être dix années auparavant, le temps de calcul représentait encore une ressource relativement rare et coûteuse. Aussi la mise en réseau des grands sites informatiques du pays représentait-elle un moyen intéressant de faire diminuer encore les coûts liés à l'installation et à l'emploi des matériels et des services informatiques. Au mois de février 1966, Robert Taylor rencontra le nouveau directeur de l'*Advanced Research Projects Agency*, le physicien Charles Herzfeld, afin de soumettre à son approbation un projet de réseau informatique expérimental destiné à raccorder les centres de recherche dotés d'une installation informatique travaillant en temps partagé. Ce méta système, qui, insistons bien sur ce point, n'avait strictement rien à voir avec l'armée et les militaires²⁷⁸, devait être interactif et

²⁷⁸ En tout cas de façon directe puisque le développement et la mise en œuvre d'ARPANET furent financés par l'*Advanced Research Project Agency*, c'est-à-dire en dernier lieu par l'*U.S. Department of Defense*. Il ne

permettre l'échange de données et de services informatiques entre tous ceux s'y trouvant branchés (il devait bien entendu s'agir en tout premier lieu des A.R.P.A. *Contractors*). Charles Herzfeld qui avant de prendre la tête de l'A.R.P.A. avait été responsable de son *Ballistic Missile Defense Program*²⁷⁹ (de 1961 à 1963), puis avait accédé au poste de directeur adjoint de l'agence gouvernementale (de 1963 à 1965), était parfaitement familiarisé avec les thématiques concourantes des réseaux d'ordinateurs, du time-sharing, et de l'informatique interactive. Au moment de son arrivée à l'A.R.P.A., il avait eu en effet l'opportunité d'assister à quelques-unes des conférences données par J.C.R. Licklider sur ce sujet. Les arguments avancés par le futur créateur de l'*Information Processing Techniques Office* en faveur de ces axes de recherche alors encore en devenir avaient visiblement fait leur œuvre puisque Robert Taylor n'eut absolument aucun mal à convaincre Charles Herzfeld de l'utilité et de la faisabilité de son projet. Au terme d'une rencontre rapide et informelle – aucune signature visant à sanctionner officiellement le démarrage du projet de réseau de l'A.R.P.A. ne fut donnée à ce moment précis - Herzfeld octroya à Taylor un budget initial d'un million de dollars afin que celui-ci puisse commencer à travailler. Cet accord verbal conclut entre les deux hommes correspondit aux débuts véritables d'ARPANET.

Une fois l'aval du Directeur de l'A.R.P.A. obtenu pour démarrer l'étude d'un réseau informatique propre à l'*Advanced Research Projects Agency*, Robert Taylor chercha à recruter un responsable scientifique capable de prendre en charge la conduite du projet d'un point de vue technique. Taylor ne pouvait assumer cette fonction. D'abord parce que ses occupations à la tête de l'I.P.T.O. l'accaparaient et ensuite parce que ses connaissances dans le domaine des technologies informatiques étaient insuffisamment pointues pour qu'il puisse vraiment prétendre à jouer ce rôle (nous rappelons qu'il était acousticien de formation). Dans cette perspective, Taylor se tourna immédiatement vers Lawrence G. Roberts, jeune chercheur diplômé du M.I.T. *Electrical Engineering and Computer Sciences Department* qui travaillait sur les réseaux informatiques en recourant à l'ordinateur TX-2 du *Lincoln Laboratory*. A l'instar de Charles Herzfeld, Lawrence G. Roberts avait assisté à des conférences prononcées par J.C.R. Licklider (notamment au cours du mois de novembre 1964). Tout comme le directeur adjoint de l'A.R.P.A. à l'époque, il avait lui aussi été immédiatement conquis par la teneur du discours prononcé par le visionnaire. Parmi les différentes perspectives de développement ouvertes par Licklider, c'est celle de la mise en réseau des matériels

s'agissait donc pas d'un projet de défense nationale, et encore moins d'un programme visant à établir un réseau informatique militaire de commandement et de contrôle capable de supporter les effets locaux d'une frappe nucléaire.

²⁷⁹ Le *Ballistic Missile Defense Program* de l'A.R.P.A. était également connu sous le nom de *Defender Program*.

informatiques qui avait intéressé au plus haut point Lawrence G. Roberts. Très influencé, donc, par les travaux de Licklider, le jeune homme décida à partir de ce moment de mettre en suspend les recherches qu'il effectuait sur les systèmes de reconnaissance et d'affichage graphiques et d'orienter désormais son travail en direction de ce nouveau thème. Robert Taylor songea tout de suite à Lawrence G. Roberts pour prendre les rênes du projet ARPANET car ce dernier, en dépit de sa jeunesse, avait déjà fait ses preuves en matière de technologie réseau.

Avec Thomas Marill, un ancien étudiant de J.C.R. Licklider reconverti dans le secteur privé, il avait en effet été le maître d'œuvres (heureux) de la toute première connexion informatique à très grande distance, via une ligne téléphonique dédiée. Ce projet avait été initié au tout début de l'année 1965 (très vraisemblablement au mois de février), lorsque Thomas Marill avait approché Ivan E. Sutherland (alors directeur de l'A.R.P.A./I.P.T.O.), pour lui soumettre une demande de financement concernant un projet de mise en réseau d'ordinateurs. Psychologue de formation, T. Marill venait de fonder une petite entreprise spécialisée dans le secteur de l'informatique en temps partagé, la *Computer Corporation of America* (C.C.A.), et il avait pour projet expérimental immédiat le raccordement de deux systèmes informatiques distants. En l'occurrence il envisageait de connecter ensemble le TX-2 du *Lincoln Laboratory* (qui se trouvait dans le Massachusetts), et l'I.B.M. AN/FSQ-32 de la *Systems Development Corporation* (lequel était installé à Santa Monica, en Californie). Sutherland jugea fort intéressante la proposition faite par Marill et, joignant l'acte à la parole comme on dit, il garantit à ce dernier qu'il pourrait compter sur le soutien financier de l'A.R.P.A./I.P.T.O. Cependant, Sutherland conseilla à Marill d'éviter de confier le développement du futur réseau à sa propre entreprise. Selon lui la *Computer Corporation of America* était en effet une structure trop petite, trop récente, et donc trop peu expérimentée, pour qu'on envisage raisonnablement de lui confier la réalisation d'un chantier pareillement ambitieux et complexe. En lieu et place de cela, Sutherland suggéra à Marill de prendre contact avec les dirigeants du *Lincoln Laboratory* afin de leur proposer une association et de placer ainsi une partie de la réalisation du réseau sous la responsabilité des équipes du M.I.T. Les gens du *Lincoln Laboratory* acceptèrent de prendre part au projet de Marill et c'est Lawrence G. Roberts qu'ils choisirent pour assurer la direction de ce nouveau programme.

C'est au cours du mois d'octobre 1965 que la première connexion à distance entre le TX-2 du *Lincoln Laboratory* et l'AN/FSQ-32 de la S.D.C. put être établie. Outre les ordinateurs eux-mêmes, les principaux matériels employés pour réaliser cette liaison

informatique historique étaient une ligne téléphonique dédiée²⁸⁰, équipée pour la circonstance de coupleurs acoustiques et de modulateurs/démodulateurs possédant une capacité de transmission/réception individuelle inférieure à 2 Ko/s. Compte tenu de cela, les premiers et seuls échanges effectués entre les deux sites se limitèrent à l'expédition de quelques messages sommaires. Sur le plan technique cette expérience s'avéra néanmoins probante puisqu'en dépit de la relative médiocrité des performances qui purent être atteintes, elle permit de mettre en évidence le fait que les lignes téléphoniques classiques, c'est-à-dire celles, omniprésentes, opérant selon le principe de la commutation par circuits, étaient totalement inadaptées au transport de données informatiques²⁸¹. Les raisons de cette inadaptation étaient celles que nous avons mentionnées plus haut, lorsque nous nous sommes attachés à présenter les apports théoriques de Paul Baran : cherté d'exploitation, gaspillage de la bande passante et forte propension à l'entropie informationnelle. Comme Kleinrock, Baran, Davies et Scantlebury l'avaient parfaitement vu, l'avenir, ici, devait appartenir à la technique du *Packet Switching*. A compter du début de l'année 1967, Léonard Kleinrock, qui par ailleurs était l'ami de Lawrence G. Roberts, fut appelé par ce dernier en qualité de consultant indépendant sur le projet ARPANET. La solution technologique retenue pour acheminer les données informatiques sur le réseau serait donc celle de la commutation par paquets.

Première en matière de technologie de réseau étendu²⁸², la connexion réussie entre le TX-2 du M.I.T. et l'AN/FSQ-32 de la S.D.C. valut à Lawrence G. Roberts d'acquérir assez vite une excellente renommée au sein de la communauté informatique américaine. Ce sont d'ailleurs les incontestables qualités de technicien et de responsable de programme manifestées à cette occasion par le jeune chercheur du M.I.T. qui conduisirent immédiatement un Robert Taylor impressionné à lui offrir la direction du projet visant à l'établissement du futur réseau informatique de l'*Advanced Projects Research Agency*. Dans un premier temps L.G. Roberts déclina la proposition du Directeur de l'I.P.T.O., peu désireux qu'il était en vérité d'abandonner le *Lincoln Laboratory*, l'ordinateur TX-2 du M.I.T., et un poste de chercheur qui lui convenait parfaitement. Il fallut donc que Robert Taylor fasse preuve

²⁸⁰ L'entreprise à laquelle avait été louée cette ligne reliant les côtes atlantique et pacifique était la *Western Union Telegraph Company*, une firme concurrente de l'*American Telephone and Telegraph Corporation*.

²⁸¹ Lawrence G. Roberts et Thomas Marill ont présenté les résultats de leurs travaux sur le réseau TX-2-AN/FSQ-32 au mois d'octobre 1966, à l'occasion de la conférence d'automne de l'*American Federation of Information Processing Societies (A.F.I.P.S.)*. Un article récapitulatif intitulé « Toward A Cooperative Network Of Time-Shared Computers » a ensuite été publié par les deux hommes, en novembre 1966. Ce document peut être consulté en ligne à l'adresse suivante: <http://www.packet.cc/files/toward-coop-net.html>

²⁸² On distingue en effet les W.A.N. (*Wide Area Network*), qui sont des réseaux informatiques couvrant de vastes territoires, des L.A.N. (*Local Area Network*), qui n'occupent que des espaces limités (une simple pièce ou un bâtiment à plusieurs étages par exemple).

d'énormément de persévérance, et qu'accessoirement il fasse aussi appel à ce que nous conviendrons de nommer des moyens plus ou moins détournés²⁸³, pour qu'enfin L.G. Roberts « accepte » de venir diriger le futur programme ARPANET. Lawrence G. Roberts accéda officiellement à la fonction d'A.R.P.A./I.P.T.O. *Chief Scientist* au mois de janvier 1967 et à partir de là, il prit en mains la destinée du réseau informatique de l'*Advanced Research Project Agency*.

La première présentation, par le Directeur et le Responsable Scientifique de l'A.R.P.A./I.P.T.O., du projet ARPANET devant les représentants des grands centres informatiques universitaires financés par l'A.R.P.A. eut lieu en avril 1967, à l'occasion de la réunion²⁸⁴ annuelle des A.R.P.A. *Contractors*. Comme l'a clairement précisé Larry G. Roberts dans un entretien accordé en 1989 à l'historien de l'informatique Arthur L. Norberg, lui et Robert Taylor ne laissèrent à la trentaine d'A.R.P.A. *Contractors* présents à l'«ARPANET *Design Session* » d'autre choix possible que celui consistant 1°) à mettre les ressources informatiques dont ils disposaient au service de ce nouveau programme et 2°) à y apporter leur contribution individuelle, autant que faire se pouvait :

« ... lors de cette réunion nous entreprîmes de présenter mes vues quant au rôle que chaque *Principal Investigator* serait appelé à jouer ici, puis nous les encourageâmes à travailler avec nous. Nous les encourageâmes [en fait] plutôt vivement, mais d'un autre côté cela ne servait à rien de [chercher à] tordre des bras trop durement à ce moment là, car la situation ne le nécessitait pas. Nous indiquâmes alors ce qui allait se passer en précisant qu'ils se trouveraient impliqués non seulement du point de vue des contributions qu'ils seraient capables de faire au réseau, mais également du point de vue de leurs propres ressources informatiques [qu'on leur demandait par conséquent de connecter au réseau]. Les *Principal Investigators* devraient travailler dans ces directions. Ceux d'entre eux qui avaient des idées à propos du réseau seraient encouragés à les développer, et, par exemple, c'est ce que Wes [Wesley] Clark fit²⁸⁵ ».

²⁸³ Voyant que ses sollicitations répétées auprès de Lawrence G. Roberts n'aboutissaient pas, Robert Taylor se résolut à demander à Charles Herzfeld, le directeur de l'A.R.P.A., de faire pression sur celui du *Lincoln Laboratory* afin que le jeune scientifique accepte enfin de venir travailler pour lui. Ce levier devait en fin de compte s'avérer très efficace étant bien entendu qu'une partie importante des recherches qui étaient réalisées dans ce laboratoire du M.I.T. (un peu plus de 50%) bénéficiaient à une hauteur ou à une autre d'un financement en provenance de l'*Advanced Research Project Agency*.

²⁸⁴ Le titre donné à cette réunion de travail était «ARPANET *Design Session* ».

²⁸⁵ In Arthur L. Norberg, *Oral history interview with Lawrence G. Roberts, Charles Babbage Institute*, Université du Minnesota, Minneapolis, Transcript OH 159, p. 17. Ce document peut être consulté et téléchargé au format PDF sur le site du *Charles Babbage Institute* : <http://www.cbi.umn.edu/oh/pdf.phtml?id=233>.

Cette façon ouvertement autoritaire de s'adresser à des gens dont certains, tel Fernando J. Corbató (M.I.T.) et Wesley A. Clark (*Washington University of St. Louis*), faisaient pourtant figure de véritables pionniers en matière de recherche et de développement sur l'informatique en temps partagé, s'explique en grande partie par le fait que ces mêmes individus, en dépit de leur engagement et de leur expérience précoces dans le domaine du time-sharing, avaient d'emblée manifesté une opposition marquée à l'endroit du projet ARPANET²⁸⁶. Cette opposition était essentiellement motivée par deux choses. D'une part la perspective de devoir mettre à la disposition d'utilisateurs distants – fussent-ils leurs pairs – leurs ressources informatiques matérielles et logicielles était assez loin de susciter chez les A.R.P.A. *Contractors* un sentiment d'adhésion unanime. D'autre part l'architecture et les protocoles envisagés par les responsables de l'*Information Processing Techniques Bureau* pour construire le réseau et assurer son fonctionnement devaient eux aussi soulever des résistances dans l'assistance. Le fait que les ordinateurs avec lesquels, bien entendu, ils devaient pouvoir continuer à effectuer leurs propres travaux de recherche, doivent être intégrés à ARPANET afin d'y être employés en parallèle comme des machines hôtes, c'est-à-dire comme des systèmes informatiques permettant d'assurer le routage et éventuellement la sauvegarde des informations circulant de site en site sur le réseau, ne provoqua pas non plus de réaction particulièrement enthousiaste chez la majorité des A.R.P.A. *Contractors*. En effet dans sa présentation L. G. Roberts avait indiqué que chaque site raccordé serait individuellement responsable de la mise au point des logiciels réseau utilisés pour la connexion et l'acheminement des données. A priori ces logiciels devaient donc être développés en interne afin de prendre en charge des opérations courantes telles que les tâches d'authentification et d'identification des utilisateurs, de transfert des caractères alphanumériques, de vérification d'erreurs et de retransmission des informations. Or étant donné que les équipements informatiques et les systèmes d'exploitation utilisés par les A.R.P.A. *Contractors* étaient différents dans la majorité des cas, cela signifiait qu'à chaque noeud du réseau, les informations entrantes devaient être modifiées afin de pouvoir être manipulées par l'hôte. Les problèmes de compatibilité et de ralentissement qui s'annonçaient ici promettaient par conséquent d'être considérables.

²⁸⁶ Parmi les quelques chercheurs que la présentation du projet de Taylor et Roberts intéressa d'emblée, Douglas C. Engelbart est assurément celui qui se montra le plus motivé. La mise en place d'un réseau comme ARPANET pouvant servir les travaux sur l'*On-Line System* qu'il poursuivait à l'*Augmentation Research Center*, Engelbart proposa immédiatement de créer au *Stanford Research Institute* un *Network Information Center* (Centre d'information du réseau).

Cette première réunion concernant la future mise en place du réseau ARPANET se déroula donc dans un climat assez tendu sachant que pour faire valoir leurs idées, autrement dit imposer leur projet, Robert Taylor et Larry G. Roberts étaient décidés le cas échéant à engager un véritable bras de fer financier avec les laboratoires et les centres de recherche auxquels l'A.R.P.A./I.P.T.O. versait des fonds. Pour dire cela d'une autre façon encore, refuser que son ordinateur soit connecté (tôt ou tard) à ARPANET aurait tout simplement exposé l'institution indocile à des sanctions financières immédiates. En définitive Taylor et Robert n'eurent à « tordre aucun bras » puisqu'à l'issue de la rencontre Wesley A. Clark²⁸⁷ proposa une solution technique qui, lorsqu'elle leur fut exposée de manière formelle au mois de mai 1967, emporta l'adhésion de tous les A.R.P.A. *Contractors*.

Coauteur avec J.C.R. Licklider d'un article au titre et au contenu évocateur – préfigurant Internet par bien des aspects ce papier s'intitulait « Online Man-Computer Communication²⁸⁸ » - Wesley A. Clark était pourtant l'un de ceux qui s'étaient le plus vigoureusement opposés aux projets de Taylor et Roberts concernant la façon dont le réseau ARPANET devrait être développé (si toutefois il devait vraiment voir le jour). L'idée que Clark soumit à Taylor et Roberts dans le taxi qui les ramenait à l'aéroport était la suivante. Depuis quelques années, des ordinateurs d'un nouveau genre étaient disponibles sur le marché qui, sans être déraisonnablement coûteux, offraient un niveau de performances tout à fait respectable. Clark suggérait par conséquent d'acquérir un certain nombre de ces mini-ordinateurs pour qu'une fois adéquatement programmés et déployés sur ARPANET, ils puissent prendre automatiquement en charge l'ensemble des fonctions réseau (routage et *packet switching*) que les mainframes des A.R.P.A. *Contractors* devaient réaliser selon ce qui avait été prévu dans le plan initialement présenté par Taylor et Roberts. Rapidement identifiés sous le sigle d'I.M.P., pour *Interface Message Processor*²⁸⁹, ces mini-ordinateurs dédiés devaient être installés entre les ordinateurs hôtes des A.R.P.A. *Contractors* et le réseau. Entre ces machines hôtes et ARPANET, les mini-ordinateurs I.M.P. étaient appelés à jouer comme autant d'interfaces indépendantes, c'est-à-dire comme autant de plateformes accessibles depuis n'importe quel genre de grand système informatique. Cela signifiait que les logiciels – tous identiques ou presque - installés sur les mémoires de masse de l'ensemble des *Interface Message Processors* devaient les rendre aptes à échanger des données avec n'importe quel

²⁸⁷ Rappelons qu'avant d'accepter une proposition de poste à la *Washington University of St. Louis*, en 1964, Wesley A. Clark avait travaillé au M.I.T. *Lincoln Laboratory*. Là, il avait joué un rôle clef dans le processus de conception des ordinateurs TX-0, TX-2 et LINC. Il avait prit part aussi au projet *Whirlwind*.

²⁸⁸ J.C.R. Licklider, et W. A. Clark., « Online Man-Computer Communication », *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference*, San Francisco, Californie, 1^{er}-3 mai, 1962, vol. 21, pp. 113-128.

²⁸⁹ Pour « interface de traitement de messages » ou plus simplement « serveurs de messages ».

nœud d'ARPANET, c'est-à-dire avec n'importe quel ordinateur connecté au réseau, et cela quels que soit son constructeur, son type et son système d'exploitation. Ce mode opératoire singulier possédait deux gros avantages immédiats: d'une part les gens en charge de la programmation des ordinateurs hôtes n'auraient à effectuer que des modifications mineures à leurs logiciels pour permettre à leurs machines de collecter et d'envoyer des données en provenance ou en direction d'ARPANET (ou plutôt en provenance ou en direction de l'interface sérielle de l'I.M.P. qui assurait leur connexion au réseau). D'autre part, les applications installées sur les I.M.P. devant être semblables, leur conception serait aisée et économique (les particularités de chaque installation n'ayant pas à être prises en compte). Le projet consistant à incorporer des dispositifs tels que les *Interface Message Processors* au réseau ARPANET impliqua donc dès le départ que celui-ci posséderait une architecture *ouverte*. La présence de ces mini-ordinateurs spécialisés et la double fonction de gestionnaire de commutation par paquets/routeur qu'ils assumaient garantissaient ainsi que l'évolution et l'extension futures du réseau seraient toujours possibles et faciles.

L'idée de la mise en place du réseau ARPANET ne rencontrant désormais plus de résistance parmi les principaux *Contractors* de l'agence, une nouvelle réunion fut organisée au tout début du mois d'octobre 1967 afin de passer en revue différentes questions d'ordre technique. C'est aussi lors de cette nouvelle assemblée que Larry G. Roberts présenta un plan qui, en deux temps, prévoyait la connexion de 19 sites informatiques. La première phase de mise en place du réseau envisageait le raccordement de 4 grandes installations:

- L'*Augmentation Research Center* du *Stanford Research Institute*, où Douglas C. Engelbart avait programmé l'*ON-line System* avec le mainframe *Scientific Data Systems 940* que possédait l'institution. Le S.R.I. devait accueillir le *Network Information Center*.
- Le *Graphics Department* de l'Université de l'Utah, où Ivan E. Sutherland, l'ancien Directeur de l'A.R.P.A./I.P.T.O. travaillait désormais.
- L'Université de Californie à Santa Barbara (U.C.S.B.) où le *Culler-Fried Interactive Mathematics Center* exploitait un système I.B.M. 360/75.

- L'Université de Californie à Los Angeles (U.C.L.A.), où travaillait Léonard Kleinrock, un des pionniers de la technique de la commutation par paquets. C'est à U.C.L.A. que fut implanté le *Network Measurement Center*, centre de mesures du réseau ARPANET.

Au cours du mois d'octobre 1967 un symposium international sur le thème des *Operating System Principles* («Principes des systèmes d'exploitation»), fut organisé à l'initiative de l'*Association for Computing Machinery*, à Gatlingburg, dans le Tennessee. Lors de cette très importante réunion où devaient être notamment abordés les thèmes de l'informatique en temps partagé et des réseaux, Lawrence G. Roberts présenta un papier intitulé « Multiple Computer Networks and Intercomputer Communication ²⁹⁰ », qui récapitulait les standards et les caractéristiques alors retenus pour le déploiement futur d'ARPANET. Au cours du même colloque, le chercheur britannique Roger A. Scantlebury effectua également une communication dont le titre était « *A Digital Communications Network for Computers Giving Rapid Response at Remote Terminals*²⁹¹ ». Il s'agissait d'une présentation détaillée des travaux sur les réseaux informatiques que lui et ses collègues D. W. Davis, K. A. Bartlett, et P. T. Wilkinson étaient en train de réaliser au *National Physical Laboratory*. Durant sa conférence, Scantlebury aborda dans le détail la technique du *Packet Switching*²⁹² et il mentionna aussi les travaux que Paul Baran avait menés à la *RAND Corporation* au cours de la première moitié des années 60. D'après Donald Davies²⁹³, R. A. Scantlebury et Lawrence G. Roberts eurent immédiatement après cela une discussion au cours de laquelle ils parlèrent longuement du principe de la commutation par paquet. Scantlebury convainquit également Roberts d'utiliser des lignes de transmission à haute vitesse (50 Kbps en lieu et place des 2 Kbps) pour les connexions d'ARPANET. Le chercheur britannique lui recommanda enfin vivement de consulter l'ensemble des rapports que Paul Baran avait écrits. Ce symposium international correspondit donc en quelque sorte au moment où les trois grands pôles scientifiques où le concept de commutation par paquets avait vu le jour – le M.I.T. avec

²⁹⁰ Lawrence G. Roberts, « Multiple Computer Networks and Intercomputer Communication », *Association for Computing Machinery Symposium on Operating System Principles*, Gatlingburg, Tennessee, octobre 1967. Document consultable en ligne sur le site de L. G. Roberts : <http://www.packet.cc/files/multi-net-inter-comm.html>.

²⁹¹ D. W. Davis, R. A. Scantlebury, K. A. Bartlett, P. T. Wilkinson, « A Digital Communications Network for Computers Giving Rapid Response at Remote Terminals », *National Physical Laboratory, Association for Computing Machinery Symposium on Operating System Principles*, Gatlingburg, Tennessee, octobre 1967.

²⁹² Rappelons que Kleinrock, Baran, Davis et Scantlebury avaient indépendamment réinventé le principe de la commutation par paquets au début des années 60.

²⁹³ Donald W. Davies, « Early Thoughts on Computer Communications », in *The Computer Communication Revolution Multi-Disciplinary Retrospective and Prospective*, édité par S. Ramani et Pramode K. Verma I.C.C.C. Press, pp. 189-193. L'article de Davies peut être consulté en ligne sur le site de l'éditeur I.C.C.C. Press : www.icccpress.com/icccpress/pdf/Donald_Davies_historical_papers.pdf

Kleinrock²⁹⁴ (via Roberts), le N.P.L. avec Scantlebury (et Davies) et la RAND Corporation avec Paul Baran (via Scantlebury) - se « rencontrèrent ».

En novembre 1967, l'*Information Processing Techniques Office* signa un contrat de recherche avec le *Stanford Research Institute*. Il s'agissait pour le S.R.I. (et pour le chercheur Elmer B. Shapiro qui hérita en l'occurrence de la tâche), de définir les caractéristiques techniques du futur réseau informatique de l'A.R.P.A. et plus précisément de réfléchir à la mise au point de protocoles informatiques qui autoriseraient les machines à communiquer entre elles. Au début de l'année 1968, une première version du rapport Shapiro fut remise aux responsables de l'I.P.T.O. Son titre était *Study of Computer Network Design Parameters*. C'est en partant de cette base que Larry G. Roberts et Larry Wessler rédigèrent ensuite un rapport final d'une dizaine de pages, le *Program Plan n°723*, qui précisait les objectifs principaux du programme ARPANET :

« [Il s'agissait] ... : (1) *De développer des techniques et d'acquérir de l'expérience dans le domaine des réseaux d'ordinateurs de telle sorte qu'une très large classe d'interactions soit possible, et (2) D'améliorer et d'augmenter la productivité de la recherche informatique grâce au partage de ressources. En établissant un réseau raccordant ensemble les centres de recherche financés par l'IPT(O), ces deux objectifs sont atteints. En fait la manière la plus efficace de développer les techniques nécessaires à un réseau efficace consiste à impliquer les [talents scientifiques] de ces centres dans une activité prototype.*

De la même manière que les systèmes informatiques opérés en temps partagé ont permis à des centaines d'utilisateurs individuels de partager des ressources matérielles et logicielles avec d'autres [utilisateurs], les réseaux connectant des douzaines d'installation de ce genre permettront de partager ces ressources entre des milliers d'utilisateurs. Chaque système informatique, en vertu du fait qu'il fonctionne selon le principe du time-sharing, peut à la demande mettre à la disposition d'un autre ordinateur n'importe lequel de ses services. Le critère le plus important pour le type d'interconnexion envisagé ici est que n'importe quel utilisateur ou programme d'un ordinateur connecté au réseau puisse utiliser n'importe quel programme ou sous-système disponible sur n'importe quel autre ordinateur [du réseau] sans qu'il ait jamais à modifier le programme distant.²⁹⁵».

²⁹⁴ Léonard Kleinrock avait soutenu sa thèse doctorale (*Information Flow in Large Communication Nets*) au M.I.T. *Research Laboratory of Electronics* en juillet 1961.

²⁹⁵ Lawrence G. Roberts, Larry Wessler, *Resource Sharing Computer Networks, Advanced Research Projects Agency, Program Plan n°723*, Washington D.C., 3 juin 1968, p. 1. Un fac similé digital de ce document peut être consulté et/ou téléchargé (au format djvu) à l'adresse qui suit:

Dans leur rapport *Resource Sharing Computer Networks* Roberts et Wessler spécifiaient quelques-unes des principales caractéristiques techniques du réseau (notamment celles touchant à la capacité des lignes), estimaient le coût des *Interface Message Processors*, et présentaient le protocole de communication devant permettre aux différents ordinateurs raccordés à la structure d'échanger des données (*Communication System*, p.5). En page 7 du rapport, les auteurs présentaient également un calendrier, une feuille de route, où ils indiquaient une série de dates (assez précises d'ailleurs) pour la réalisation des premières phases de la mise en place du réseau. :

- « a. Juillet 1968 - - Attribution du contrat pour les I.M.P.
b. Mars 1969 - - Démonstration du fonctionnement initial du réseau avec 4 nœuds.
c. Avril 1969 - - Validation du design et extension du contrat de sorte à inclure l'installation de 19 I.M.P.
d. Décembre 1969 - - Réseau complètement opérationnel.
e. 1970 - - Adjonction de lignes de communication.
f. 1971-1972 - - Réalisation du transfert du système de communication par des voies d'acheminement communes.²⁹⁶».

Le document de Robert et Wessler fut soumis le 3 juin 1968 au nouveau Directeur de l'*Advanced Research Projects Agency*, le Dr. Eberhardt Rechtin²⁹⁷. Celui approuva le plan proposé par les deux hommes dans des délais remarquablement brefs puisqu'il donna son aval au projet le 21 juin suivant. A la fin du mois de juillet 1969, l'A.R.P.A./I.P.T.O. rédigea et expédia par courrier une *Request For Quotation* (c'est-à-dire un appel d'offres), à quelques 140 compagnies susceptibles d'être intéressées par un contrat portant sur le développement des *Interface Message Processors* et sur la construction d'un réseau informatique à commutation par paquets connectant quatre grands centres universitaires (ce réseau devant dès le départ être conçu de façon à ce que le nombre de ses nœuds puisse rapidement être porté à 19). Sur les 140 entreprises initialement contactées pour cette R.F.Q. – parmi lesquelles I.B.M. et la C.D.C. qui ne soumissionnèrent pas sous prétexte que le réseau que

<http://ia300207.us.archive.org/3/texts/ResourceSharingComputerNetworks/ResourceSharingComputerNetworks.djvu>

²⁹⁶ *Ibidem*, p.7.

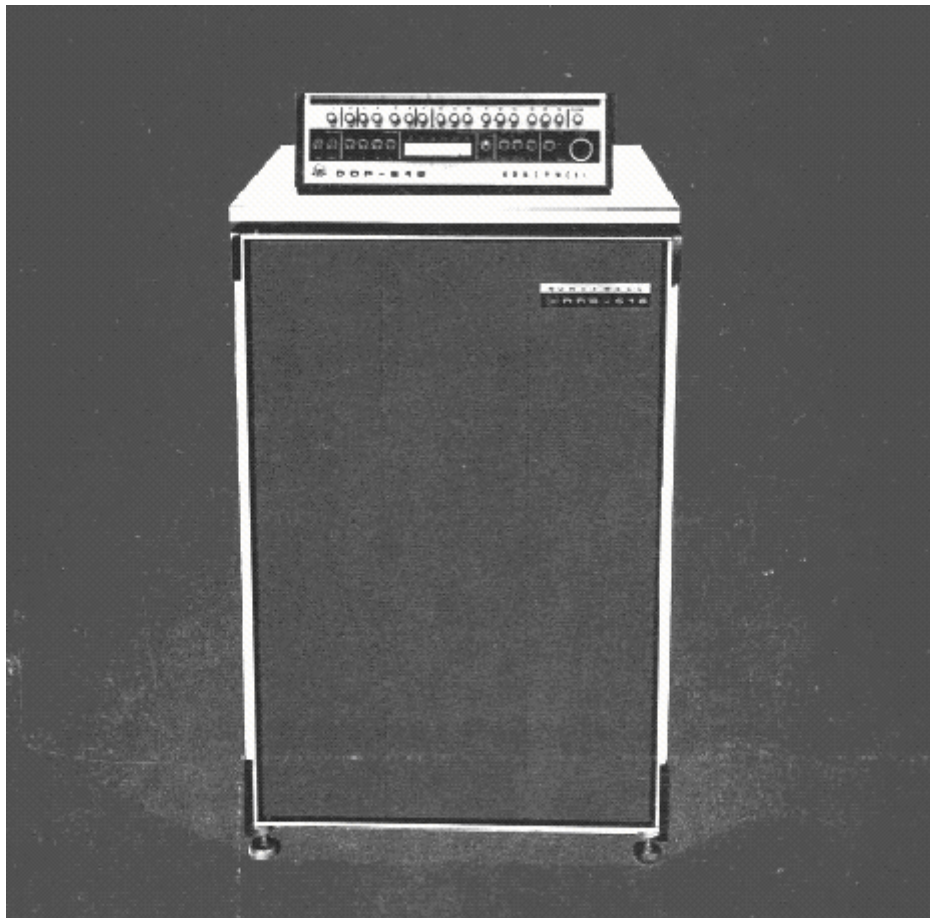
²⁹⁷ Ancien Directeur du N.A.S.A./J.P.L. *Deep Space Network* et ancien Directeur Assistant du *Jet Propulsion Laboratory*, Eberhardt Rechtin devint directeur de l'*Advanced Research Project Agency* au mois de novembre 1967 (et cela à la demande du *Department of Defense*). Il prit ainsi la succession de Charles Herzfeld.

l'A.R.P.A. envisageait de construire était irréalizable - seules une cinquantaine envoyèrent des représentants à la réunion de présentation organisée peu de temps après. Au final l'*Information Processing Techniques Offices* sélectionna douze contractants potentiels, avant de ramener le chiffre de ces offres à 4. Il s'agissait de la proposition conjointement présentée par la *Digital Equipment Corporation* et la *Computer Corporation of America*, de l'offre de la *Raytheon Company*, de celle de la *Bunker-Ramo Corporation* et enfin de celle de la *Bolt, Beranek & Newman Technologies*. Après examens supplémentaires des dossiers soumis par ces différentes entreprises, le nombre des postulants se vit encore réduit de moitié. Restaient désormais en lice pour l'obtention du contrat de développement des I.M.P. et de mise en œuvre du réseau ARPANET la *Raytheon Company*, un industriel spécialisé dans le secteur de l'armement qui en raison de la nature de son activité principale entretenait des liens particulièrement privilégiés avec le Pentagone et les armées, et la firme de consulting en informatique *Bolt, Beranek & Newman Technologies*. On sait qu'à la fin de l'année 1968 l'A.R.P.A./I.P.T.O. entama de sérieux pourparlers avec le missilier américain. Cependant ces discussions ne débouchèrent sur rien de concret et c'est finalement l'entreprise *Bolt, Beranek & Newman Technologies* qui remporta le contrat ARPANET. Il semblerait que plusieurs éléments aient joué ici en faveur de la B.B.N. D'abord, *Raytheon* était une très grande compagnie. Aussi ses modalités de fonctionnement et son organisation hiérarchique souffraient-elles des maux (pesanteur, cloisonnement vertical et horizontal, etc.), qui, inévitablement ou presque, affectent les structures industrielles de grande envergure. A l'inverse, la *Bolt, Beranek & Newman Technologies* ne souffrait pas de ce genre de défauts. C'était une société jeune, de taille relativement modeste, qui avait été créée par d'anciens responsables scientifiques du M.I.T. et qui comptait désormais dans ses effectifs de consultants et de chercheurs certains des individus les plus brillants de l'époque. En raison de ses origines, de son organisation, de la façon dont on y travaillait et des personnes qui l'animaient, la *Bolt, Beranek & Newman Technologies* ressemblait finalement beaucoup plus à un laboratoire de recherches de pointe qu'à une entreprise au sens où l'on entend conventionnellement ce terme. Outre le fait que l'*Advanced Research Projects Agency* et la *Bolt, Beranek & Newman Technologies* possédaient l'une avec l'autre des liens très étroits – par exemple J.C.R. Licklider avait été vice-président de la B.B.N. à la fin des années 50 avant de prendre la tête de l'A.R.P.A./I.P.T.O. de 1962 à 1964 – la « philosophie » de la B.B.N. correspondait nettement plus à celle des entités avec lesquelles l'A.R.P.A. était habituée à traiter que celle qui caractérisait habituellement les grands groupes industriels comme

Raytheon. D'autres éléments déterminants, techniques cette fois-ci, entrèrent également en jeu ici.

Les dossiers de candidature présentés respectivement par la *Raytheon Company* et la *Bolt, Beranek & Newman Technologies* répondaient tous deux parfaitement aux exigences mentionnées dans le cahier des charges fixé par l'*Information Processing Techniques Office*. Les deux sociétés prétendaient également qu'elles se trouvaient en mesure de construire les *Interface Message Processors* et le réseau ARPANET dans des délais inférieurs à ceux qui avaient été spécifiés par l'A.R.P.A. dans son appel d'offres. Cependant, et quels qu'aient pu être par ailleurs l'importance des moyens dont disposait effectivement *Raytheon*, l'industriel ne précisait pas comment il entendait s'y prendre pour atteindre cet objectif. A l'opposé, l'ensemble des éléments techniques requis pour conduire au plus vite ces développements et ce déploiement figurait clairement dans le dossier présenté par B.B.N. Extrêmement détaillé et complet, ce dossier comprenant près de 200 pages avait exigé plusieurs semaines de travail intensif à Frank Heart - un ingénieur en électronique diplômé du M.I.T. et expert dans les systèmes informatiques - et à son équipe de spécialistes. Ce groupe se composait de Dave Walden, un programmeur spécialisé dans le domaine du time-sharing, de Will Crowther, un programmeur renommé pour sa capacité à produire du code complexe de manière optimisée, de Bernie Cosell, un programmeur et débogueur de génie, et, pour le versant matériel du projet, de Severo Ornstein (ingénierie matérielle) et du génial théoricien des architectures réseau et des communications informatiques Robert E. Kahn. Diplômé de Princeton, ancien employé des *AT&T Bell Telephone Laboratories*, ancien Professeur Assistant en ingénierie électrique au M.I.T., le docteur R. E. Kahn²⁹⁸ est l'homme qui conçut les plans d'ARPANET. Le caractère remarquablement accompli du dossier technique constitué par Heart et son équipe, auquel devaient venir s'ajouter les compétences reconnues des membres de son groupe, la réputation d'excellence de la société *Bolt, Beranek & Newman Technologies* et peut-être aussi l'ancienneté des liens qui existaient entre cette dernière et l'A.R.P.A. firent qu'au tout dernier moment, les responsables de l'I.P.T.O. préférèrent confier le développement des I.M.P. et d'ARPANET à la B.B.N. plutôt qu'à la *Raytheon Company*. La petite société implantée à Cambridge remporta donc officiellement ce marché historique d'un montant d'un million de dollars au mois de décembre 1968.

²⁹⁸ R. E. Kahn est aussi celui qui, avec Vinton G. Cerf, mit au point la célèbre suite de protocoles TCP/IP (pour *Transmission Control Protocol* et *Internet Protocol*), en 1973 et 1974. A cette époque, Khan avait été engagé par l'I.P.T.O. de la D.A.R.P.A. (l'*Advanced Research Projects Agency* ayant été rebaptisée *Defense Advanced Research Projects Agency* le 23 mars 1972). Le fonctionnement d'Internet repose massivement sur l'emploi de TCP/IP.



Photographie 4 : d'un mini-ordinateur *Honeywell DDP-516*. Ce document constituait l'illustration de la couverture d'une brochure publicitaire éditée par le constructeur américain en 1966. *Image Courtesy of Honeywell Inc.*

Le contrat passé entre les deux parties stipulait que le premier des 4 serveurs de messages (I.M.P./routeurs), constitutifs du réseau devrait être livré à U.C.L.A. (le centre universitaire où travaillait Leonard Kleinrock et où devait être implanté le *Network Measurement Center*), à la date du 1^{er} septembre 1968. Les 3 sites restants, à savoir le *Stanford Research Institute*, l'Université de l'Utah et l'Université de Californie à Santa Barbara, devaient prendre ensuite possession de leurs *Interface Message Processors* respectifs jusqu'en décembre 1968 (ceci à raison d'une unité livrée chaque mois). Finalement, il était prévu que le réseau de l'A.R.P.A. devienne opérationnel au plus tard au début du mois de janvier 1969²⁹⁹. Pour mettre au point les I.M.P., l'équipe de la *Bolt, Beranek & Newman Technologies* porta rapidement son choix sur le μ -COMP DDP-516 *General Purpose I/C*

²⁹⁹ De façon un peu ironique (si l'on songe rétrospectivement aux difficultés rencontrées par Paul Baran), c'est avec l'*American Telephone & Telegraph* que l'A.R.P.A. conclut le contrat portant sur l'installation des lignes dédiées à haut débit d'ARPANET.

Digital Computer, une petite machine introduite sur le marché des systèmes informatiques durant l'année 1965. Mis au point à l'origine par la société *Computer Control Company*³⁰⁰ le μ -COMP DDP-516 *General Purpose I/C Digital Computer* était un mini-ordinateur 16 bits à architecture parallèle que la *Computer Control Division* de *Honeywell* continua à produire et à commercialiser après que ce fabricant ait absorbé la 3C, en 1966. Le DDP-516 était vendu aux environs de 80000 dollars. Il en existait deux versions. La première variante de cette machine était destinée au marché civil classique (par exemple pour l'équipement des établissements scolaires ou des petites entreprises), tandis que la seconde³⁰¹, compte tenu de son exceptionnelle robustesse, était plutôt réservée à un usage de type (le DDP-516R était donc aussi un peu plus onéreux que le DDP-516). L'unité arithmétique et logique des μ -COMP DDP-516 et DDP-516R était composée de circuits intégrés monolithiques en silicium³⁰². Dotée d'un cycle en lecture/écriture de 0,96 microseconde, la mémoire à matrice en tores de ferrite commune à ces deux machines possédait une capacité d'enregistrement de 4096 mots en configuration de base (elle pouvait néanmoins se voir étendue jusqu'à 32768 mots, par tranches de 4096 mots). Cadencés au moyen d'une horloge interne tournant à une fréquence de 100 microsecondes, les deux mini-ordinateurs d'*Honeywell* possédaient une unité de contrôle à 16 canaux indépendants multiplexés, la *Direct Multiplex Control Unit* ou D.M.C.U., qui leur permettait d'avoir un accès direct à leur mémoire principale. Ajoutées à un niveau de performances tout à fait honorable, toutes ces caractéristiques matérielles leur conféraient d'excellentes capacités dans le domaine de la gestion des flux de données entrants et sortants.

Frank Heart et son groupe de travail chez B.B.N. choisirent la version « R » du DDP-516 pour fabriquer les *Interface Message Processors* d'ARPANET. Etant donné que le réseau de l'*Advanced Research Projects Agency* était une construction expérimentale et qu'il était le premier dispositif de ce genre à voir le jour, la fiabilité de ces petits systèmes dont la fonction était d'assurer 1°) la compatibilité entre les différents ordinateurs universitaires connectés au

³⁰⁰ La *Honeywell Incorporated* acquit la *Computer Control Company* (3C) en 1966. Cette petite société spécialisée dans la production de mini-ordinateurs possédait 3 usines, dont une était implantée dans le Massachusetts.

³⁰¹ Baptisée DDP-516R, cette seconde version du mini-ordinateur d'*Honeywell* était dite « *ruggerized* », un terme que l'on pourrait rendre en français par le mot « renforcé ». Dans *Where Wizards Stay Up Late, the Origins of the Internet*, Katie Hafner et Matthew Lyon rapportent qu'à l'occasion d'une conférence informatique, un exemplaire de la version militaire du DDP-516 fut suspendu à une petite grue. Un employé d'*Honeywell* équipé d'un marteau de forgeron frappa alors vigoureusement le mini-ordinateur avec son instrument mais la petite machine, une fois redescendue et remise en ordre de marche, fonctionnait toujours parfaitement. L'objectif de cet exercice était de démontrer que le DDP-516R pouvait opérer sur un champ de bataille. In [Hafner, Lyon, 1998], p. 80.

³⁰² D'où la présence des lettres I/C (pour *Integrated Circuit*) dans la désignation complète de ce mini-ordinateur.

réseau et 2°) la commutation (le routage) des paquets (des messages) circulant sur le réseau, représentait un paramètre absolument essentiel de l'équation de mise en œuvre.



Photo 5 : Le chercheur Leonard Kleinrock (U.C.L.A.), pionnier de la technologie du *Packet Switching*, pose ici devant un *Interface Message Processor DDP-516*, à l'occasion des 35 ans d'ARPANET.
Image Courtesy of UCLA Henry Samueli School of Engineering and Applied Science.

Déployés en sous réseau, capables de supporter jusqu'à 4 hôtes simultanément, les I.M.P. étaient équipés d'interfaces sérielles physiques 16 bits et de modulateurs/démodulateurs qui, une fois raccordés aux ordinateurs hôtes des universités³⁰³, permettaient à ces derniers d'être effectivement connectés au réseau ARPANET. Le premier

³⁰³ Rappelons encore une fois que chaque site universitaire appartenant au réseau était responsable de l'écriture de la suite d'applications qui permettaient à son mainframe (ou ordinateur hôte) de communiquer avec l'I.M.P. auquel il était physiquement raccordé.

Interface Message Processor (I.M.P. 1) fut livré le 1^{er} septembre 1969 à l'Université de Californie à Los Angeles. Le jour suivant, l'équipe de Franck Heart avait achevé son installation et son paramétrage et l'unité était déjà en mesure d'échanger des informations avec le mainframe *Scientific Data Systems Sigma-7* que possédait U.C.L.A.³⁰⁴ Le *Stanford Research Institute (Augmentation Research Center)*, prit possession du deuxième I.M.P. le 1^{er} octobre suivant et le DDP-516R fut aussitôt raccordé à l'ordinateur S.D.S. 940 de l'organisation. La *Bolt Beranek & Newman Technologies* livra les deux derniers I.M.P. à l'Université de Los Angeles à Santa Barbara et à l'Université de l'Utah le 1^{er} novembre et le 1^{er} décembre.

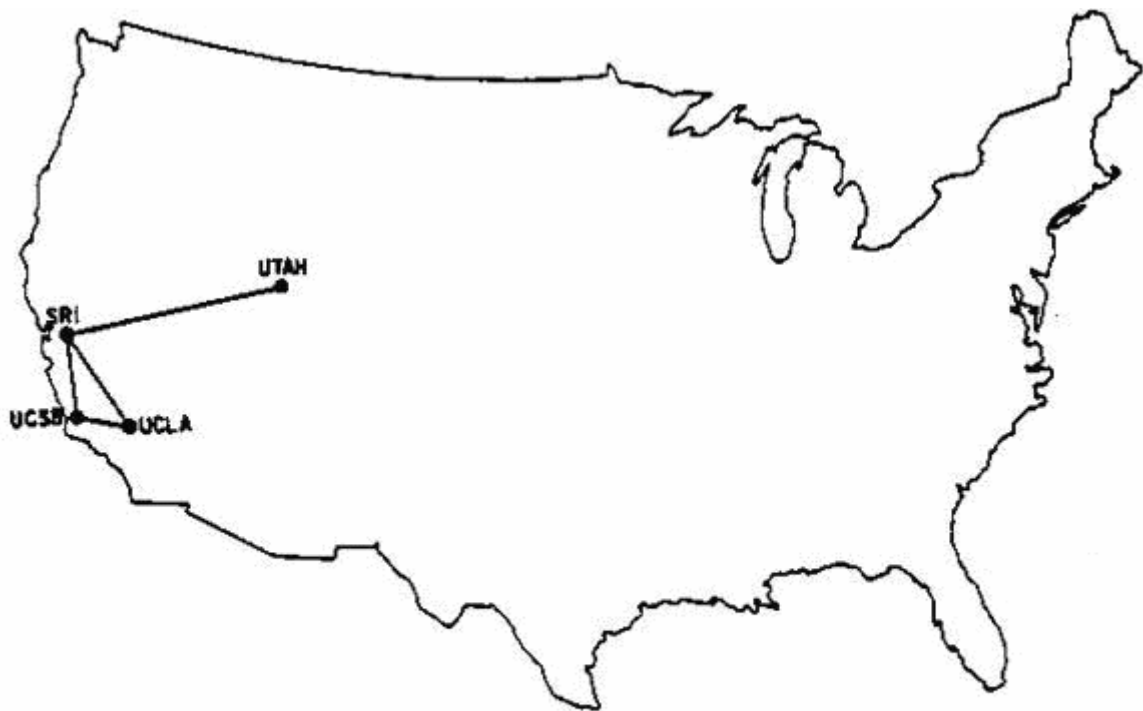


Fig. 11: carte géographique du réseau ARPANET tel qu'il était au mois de décembre 1969.
Courtesy of F.Heart, F., A. McKenzie, J. McQuillan, et D. Walden, ARPANET Completion Report Technical Report #4799, Bolt, Beranek & Newman, Burlington, Mass. 4 janvier 1978.

Ces deux mini-ordinateurs furent connectés respectivement à un système I.B.M. 360/75 (U.C.S.B.), et un D.E.C. P.D.P.-10 (Utah). Entre-temps et après une première tentative avortée³⁰⁵, le 29 octobre 1969, la première connexion réussie entre deux nœuds du réseau

³⁰⁴ Il s'agissait en conséquence de la première connexion jamais réalisée entre un serveur de messages et un ordinateur hôte.

³⁰⁵ Cette tentative de connexion fut réalisée par Charley Kline, un étudiant en informatique d'U.C.L.A. La machine de l'Université de Californie crasha au moment où Kline tapait la lettre « G » de l'instruction de connexion « LOGIN ».

ARPANET – en l’occurrence il s’agissait des systèmes informatiques de U.C.L.A. et du S.R.I. – avait été réalisée par Leonard Kleinrock le 21 novembre, à l’occasion d’une visite de Lawrence G. Roberts. Au mois de décembre 1969, les quatre premiers nœuds du réseau ARPANET étaient installés et, comme il avait été spécifié dans le contrat conclu près d’un an auparavant entre l’agence gouvernementale américaine et la société *Bolt, Beranek et Newman Technologies.*, ce dernier était opérationnel.



Fig.12: état du réseau ARPANET au mois de juin 1970. Aux 4 nœuds de la structure initiale (U.C.L.A., S.R.I., U.C.S.B., Université de l’Utah) étaient progressivement venus s’ajouter les installations informatiques de la B.B.N., de l’Université d’Harvard, du M.I.T. (pour la côte est des Etats-Unis), de la S.D.C. et de la RAND Corporation (pour la côte ouest). In F. McKenzie, J. McQuillan, et D. Walden, *ARPANET Completion Report, Technical Report #4799, Bolt, Beranek & Newman Inc., Burlington, Mass. 4 janvier 1978, p. III-78.*

Pour ARPANET, les années 1970 et 1971 furent déterminantes. En l’espace d’une quinzaine de mois à peine, le nombre de nœuds composant le réseau passa de 4 à 15 unités (pour 23 ordinateurs hôtes). En mars 1970, on raccorda à ARPANET le système de la firme B.B.N., un D.E.C. P.D.P.-10. Avec cette nouvelle connexion, et puisque B.B.N. était implanté sur la côte est des Etats-Unis, ARPANET était donc devenu un réseau transnational (c’est-à-dire dans ce cas précis un réseau transcontinental). Notons que le raccordement des machines de B.B.N. au réseau ARPANET marqua l’entrée en service du *Network Control Center* (centre de contrôle du réseau), une instance de contrôle automatisée à laquelle tous les nœuds d’ARPANET devaient envoyer un signal spécifique à échéances régulières, ceci afin

d'indiquer au N.C.C. qu'ils étaient toujours opérationnels. D'avril à juin 1970, quatre nœuds supplémentaires furent encore ajoutés à ARPANET (voir figure ci-dessus). Pour la côte est il devait s'agir des installations informatiques du *Massachusetts Institute of Technology* (un D.E.C. P.D.P.-10 et un G.E. 645), et de l'université d'Harvard (D.E.C. P.D.P.-1 et P.D.P.-10). Quant aux sites localisés sur la côte ouest, c'était ceux de la *Scientific Data Corporation* (I.B.M. 360/67) et de la *RAND Corporation* (I.B.M. 360/65 et 1800). De juin 1970 à septembre 1971, l'expansion du réseau se poursuivit sans discontinuer.

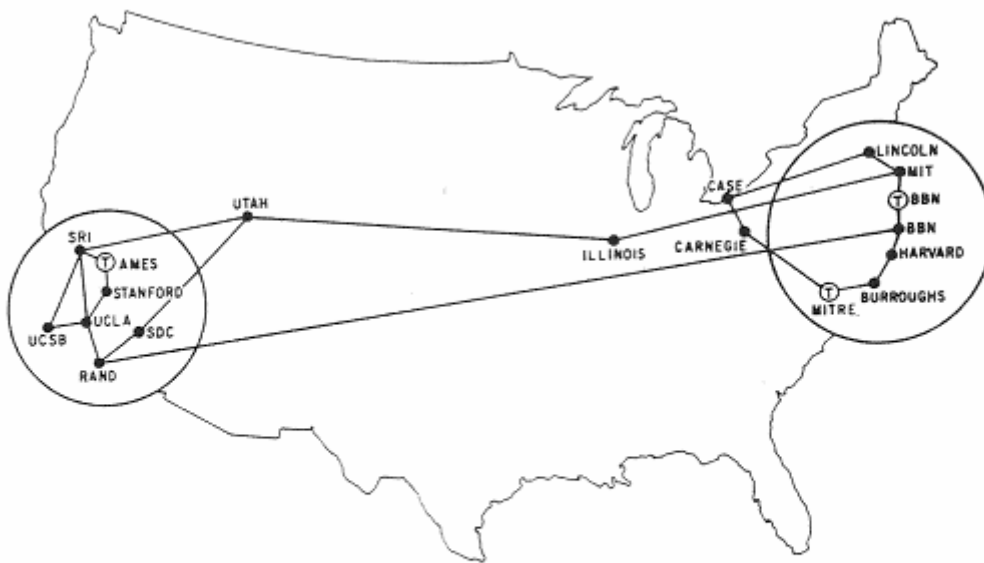


Fig 13: état du réseau ARPANET au mois de septembre 1971. A ce moment, le réseau comportait 18 nœuds.
In F. Heart, F. McKenzie, J. McQuillan, et D. Walden, *ARPANET Completion Report, Technical Report #4799*, Bolt, Beranek & Newman Inc., Burlington, Mass. 4 janvier 1978, p. III-82.

Ainsi au cours de cette période de 13 mois ARPANET gagna encore 8 sites supplémentaires et 9 nouveaux systèmes informatiques: l'I.B.M. 360/67 et le *Lincoln TX-2* du M.I.T. *Lincoln Laboratory* (Lexington, Massachusetts), le D.E.C. P.D.P.-10 de l'Université de Stanford (comté de Santa Clara, Californie) le D.E.C. P.D.P.-11 de l'Université de l'Illinois (campus d'Urbana-Champaign, Illinois), de D.E.C. P.D.P.-10 de l'Université de *Case Western Reserve* (Cleveland, Ohio), le D.E.C. P.D.P.-10 de l'Université de *Carnegie Mellon* (Pittsburgh, Pennsylvanie), l'I.B.M. 360/67 de l'*Ames Research Center* de la *National Aeronautics and Space Administration* (Mountain View, Californie), de la *MITRE Corporation* (Bedford, Massachusetts), les B6500 et ILLIAC IV de la *Burroughs Corporation* (Détrout, Michigan). Le nombre total de sites connectés à ARPANET était désormais de 18. Mais les

évolutions qui touchèrent ARPANET au cours des deux années suivant immédiatement le moment de la mise en service de ses quatre premiers sites ne concernèrent pas seulement son extension géographique et la multiplication de ses nœuds et de ses systèmes hôtes. Elles concernèrent également les technologies matérielles et logicielles que l'on employait afin d'assurer son fonctionnement.

La première modification notable apportée au réseau et à son économie générale devait regarder le protocole de communication utilisé pour permettre aux machines, qu'elles soient hôtes ou I.M.P., d'échanger des données entre elles. Jusqu'au mois de décembre 1970, la suite de protocoles de communication universellement mise en œuvre était celle qui avait été définie en 1969 dans le rapport technique #1822 de la société *Bolt, Beranek et Newman*³⁰⁶. Sobrement baptisée « protocole 1822 » et composée de trois couches de bas niveau (une couche physique, une couche de liaison de données et une couche réseau), cette suite spécifiait la méthode permettant de connecter un ordinateur hôte à un serveur de messages (I.M.P.). Implémenté sur les *Interface Message Processors*, le *Host-IMP Protocol 1822* exigeait du ou des systèmes hôtes connecté(s) à un I.M.P. donné qu'ils élaborent des messages composés de deux champs. Le premier de ces champs servait à contenir l'adresse numérique identifiant la machine hôte destinataire sur le réseau. Le second emplacement était un champ de données destiné à recevoir l'information à transmettre. Une fois le message formaté par l'hôte transmis à l'I.M.P. dont il dépendait, ce dernier l'acheminait jusqu'à sa destination (ou un I.M.P. relais) et, le cas échéant, informait l'hôte émetteur de l'échec ou de la réussite de l'opération³⁰⁷. Le principal avantage offert par le protocole 1822 était certainement la fiabilité. Ainsi, malgré la grande diversité des machines connectées à ARPANET, le taux d'échec effectivement rencontré dans le cadre des procédures de délivrance des messages demeurait très faible. Malheureusement, la suite 1822 possédait aussi quelques imperfections, au nombre desquelles une certaine incapacité à prendre en charge les multiples connexions générées par les différentes applications installées sur les nombreuses machines hôtes du réseau. Pour mettre un terme à ce problème l'A.R.P.A. *Network Working Group*³⁰⁸ dirigé par Steve Crocker élaborait une deuxième suite de protocoles – la suite 1822

³⁰⁶ Un document spécifiant le protocole 1822 a été officiellement publié l'année suivante : F. Heart, R. Kahn, S. Ornstein, W. Crowther, D. Walden, « The Interface Message Processor for the ARPA Computer Network », in *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference, American Federation of Information Processing Societies*, 1970, pp.551-567.

³⁰⁷ Dans ce dernier cas, l'I.M.P. envoyait un message de type RFNM (*Ready for Next Message*) à l'hôte émetteur du message.

³⁰⁸ Le *Network Working Group* (N.W.G.), fut créé au cours du second semestre de l'année 1968. Constitué de jeunes chercheurs, sa mission concernait essentiellement la recherche et le développement sur les protocoles de communication informatiques.

installée sur les I.M.P. continuant ici à gérer les opérations de commutation par paquets du réseau - désignée sous l'appellation de *Network Control Program* (programme de contrôle du réseau). Achievé au mois de décembre 1970, le *Network Control Program* (ou N.C.P.) était un ensemble standardisé de procédures informatiques résidentes que partageaient la totalité des systèmes hôtes du réseau (le N.C.P. était donc installé sur les mémoires de masse de tous les ordinateurs d'ARPANET). La fonction première du N.C.P. consistait à créer et à prendre en charge les multiples flux de données informatiques³⁰⁹ occurring entre deux ordinateurs hôtes. Le N.C.P. assurait ainsi l'établissement et le contrôle de liaisons bidirectionnelles entre des programmes installés sur les différentes machines hôtes connectées au réseau. Il servait également de passerelle ou d'interface à ARPANET, à des applications informatiques comme SMTP (*Simple Mail Transfert Protocol*), Telnet (*Terminal Network*) ou bien encore FTP (*File Transfert Protocol*). Totalemment opérationnel à compter du dernier trimestre de l'année 1971, bénéficiant constamment d'améliorations au cours des années suivantes, le *Network Control Program* est demeuré la principale suite de protocoles de communication d'ARPANET jusqu'en 1983. Cette année-là, il a en effet été remplacé par la suite de protocoles TCP/IP. (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). Au jour où nous écrivons, TCP/IP constitue toujours la principale suite de protocoles de communication utilisée sur Internet.

Le deuxième changement important apporté au jeune réseau ARPANET au tout début des années 70 devait concerner ses composantes physiques, et plus précisément les petits ordinateurs en charge de la gestion des opérations de commutation par paquets. Si le concept des *Interface Message Processors* avait largement fait ses preuves durant les deux premières années d'activation du réseau, la solution matérielle retenue à l'origine pour son implémentation était telle que seuls quatre systèmes hôtes pouvaient être concurremment connectés à un I.M.P. Or cette limitation de la capacité des I.M.P. à prendre en charge un nombre plus important d'ordinateurs bornait les possibilités d'extension et de densification d'ARPANET. Pour remédier à cela, les ingénieurs de B.B.N. développèrent un nouveau type de serveurs de messages – les *Terminal Interface Message Processors* – plus performants que les systèmes en cours d'utilisation. Susceptibles d'être connectés à un nombre relativement important d'ordinateurs hôtes mais aussi à de nombreux terminaux informatiques de toutes sortes, les T.I.M.P. (que l'on appelle souvent et plus simplement des T.I.P.) intégraient deux composantes majeures : le mini-ordinateur *Honeywell H-316* et un dispositif informatique spécial nommé *Multi-Line Controller* (M.L.C.).

³⁰⁹ Ces tâches étaient notamment dévolues aux protocoles AHHP (*ARPANET Host-to-Host Protocol*) et ICP (*Initial Connection Protocol*).

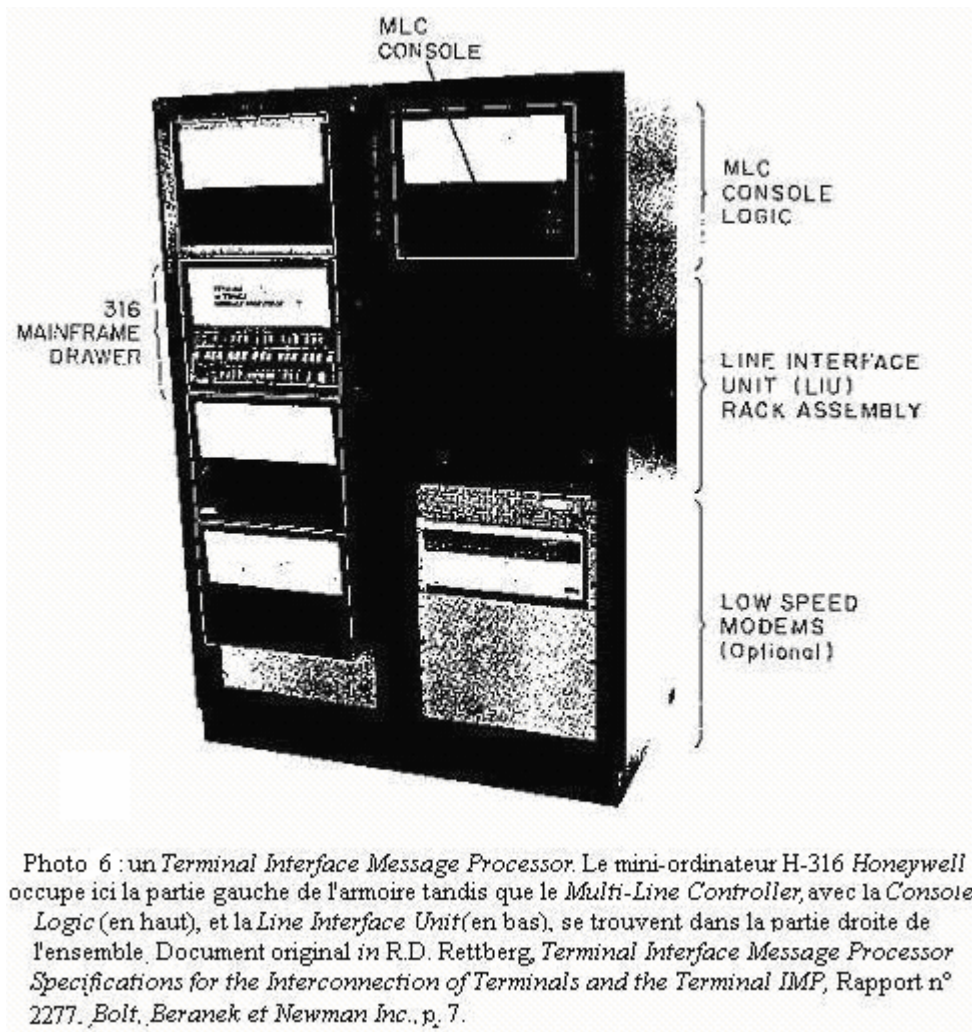


Photo 6 : un *Terminal Interface Message Processor*. Le mini-ordinateur H-316 Honeywell occupe ici la partie gauche de l'armoire tandis que le *Multi-Line Controller*, avec la *Console Logic* (en haut), et la *Line Interface Unit* (en bas), se trouvent dans la partie droite de l'ensemble. Document original in R.D. Rettberg, *Terminal Interface Message Processor Specifications for the Interconnection of Terminals and the Terminal IMP*, Rapport n° 2277. Bolt, Beranek et Newman Inc., p. 7.

Le H-316 était une petite machine que le constructeur américain avait introduite sur le marché en juillet 1969. Il reprenait nombre des caractéristiques logiques du DDP-516. En raison de cela, son niveau de compatibilité avec ce dernier était total. La conception du mini-ordinateur H-316 étant un peu plus récente que celle du DDP-516, il était légèrement plus performant que son prédécesseur immédiat. Mais, et c'était là un élément tout à fait déterminant pour l'avenir du réseau, il était également beaucoup moins cher que celui-ci (son coût unitaire était environ de 10000 dollars, contre 80000 dollars pour le DDP-516). Sur les *Terminal Interface Message Processors* la sous partie H-316 assurait l'ensemble des fonctions de communication (suite de protocoles 1822) que les mini-ordinateurs DDP-516 prenaient en charge en tant qu'*Interface Message Processors*. Composé lui aussi de deux modules - le *Console Logic* (C.L.) et la *Line Interface Unit* (L.I.U.) - le *Multi-Line Controller* (M.L.C.) était le dispositif auquel les modulateurs/démodulateurs et les terminaux de l'installation informatique hôte devaient être raccordés, via les racks *Line Interface Unit*. Chaque M.L.C.

pouvait ainsi gérer jusqu'à 63 terminaux et/ou modems. Sur le plan de la croissance de la structure réticulaire et à une époque où le nombre d'hôtes raccordés à ARPANET commençait déjà à repousser les équipements du réseau dans leurs limites, le pouvoir démultiplicateur ou « vascularisant » des *Terminal Interface Message Processors* joua un rôle considérable. En effet pour un coût relativement modique ces nouveaux matériels dont la phase de déploiement débuta au mois de septembre 1971 (mais qui furent décrits pour la première fois en 1972³¹⁰), permirent d'augmenter considérablement le nombre de systèmes raccordés à ARPANET, sans que rien ne soit perdu ici en termes de fiabilité globale. Grâce à l'introduction progressive des T.I.M.P. la croissance du réseau put encore se poursuivre à un rythme soutenu. En août 1972, le nombre d'ordinateurs hôtes connectés à ARPANET était ainsi de 29. D'autres progrès réalisés dans le secteur des technologies de la transmission numérique – nous parlons ici aussi bien des matériels que des logiciels - contribuèrent également à renforcer cette dynamique d'expansion, en exploitant (et en amplifiant du même coup) l'ouverture architecturale d'ARPANET.

Tel fut par exemple le cas de la technique de transmission et de commutation par paquets utilisant les ondes radio comme signal porteur. Les premiers travaux concernant cette nouvelle technologie avaient été réalisés en 1970 par Norman Abramson – un professeur d'ingénierie électrique issu de Stanford – à l'Université d'Hawaï. Féru de surf, ce dernier avait obtenu sa nomination dans l'archipel hawaïen en 1965 et avait commencé à travailler à l'élaboration d'un réseau informatique exploitant les ondes radio deux ans plus tard. Cinquantième état des Etats-Unis, l'archipel d'Hawaï est rappelons-le composé de 19 îles et atolls. Il est évident que ce particularisme géographique excluait d'emblée le recours à des technologies filaires (du genre de celles qui avaient par exemple été utilisées pour construire ARPANET), pour assurer le déploiement d'un réseau informatique inter insulaire. Si le campus principal de cette université se situait à Manoa Valley, près de la ville d'Honolulu, l'établissement possédait en effet plusieurs annexes – en l'occurrence il s'agissait de six *Colleges* implantés sur les îles d'Hawaï, d'Oahu, de Kauai, et de Maui - dispersées dans l'archipel. Chacune de ces structures était dotée de sa propre installation informatique.

³¹⁰ S. M. Ornstein, F. E. Heart, W.R. Crowther, S.B. Russell, H.K. Rising, et A. Michel, « The Terminal IMP for the ARPA Computer Network », in *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference, American Federation of Information Processing Societies*, vol. 40, pp. 243-254, 1972 et aussi R.D. Rettberg, *Terminal Interface Message Processor: Specifications for the Interconnection of Terminals and the Terminal IMP*, Rapport n°2277, Bolt Beranek and Newman Inc., 47 pages, non daté. Document consultable au format djvu à l'adresse suivante: <http://ia301102.us.archive.org/3/items/TerminalInterfaceMessageProcessorReport2277SpecificationsForTheInterconnectionOfTerminalsAndTheTerminalImp/TerminalInterfaceMessageProcessorReport2277SpecificationsForTheInterconnectionOfTerminalsAndTheTerminalImp.djvu>.

Abramson ambitionnait donc de mettre en place un réseau afin de les connecter les unes aux autres.

Le recours à des liaisons téléphoniques à haut débit étant inenvisageable ici pour les motifs précédemment évoqués, Abramson et son équipe sélectionnèrent la technologie des ondes radio afin de connecter entre eux les différents sites de l'Université d'Hawaï. Bénéficiant des conseils avisés du Dr. David Braverman, de l'Hugues *Aircraft Company*, les gens de l'Université d'Hawaï travaillèrent étonnamment vite, au point qu'au mois de juin 1971, la première unité d'ALOHANET entra en service. La construction du réseau hawaïen se poursuivit durant toute l'année 1972. Précisons immédiatement que l'ensemble de ces travaux put être réalisé grâce à un financement obtenu auprès de l'*Information Processing Techniques Offices*. La mise en place d'ALOHANET ne se fit cependant pas sans difficultés. Elle nécessita notamment que l'on conçoive des appareillages et des logiciels spéciaux. Ainsi, pour assurer le formatage et la transmission des paquets de données informatiques par moyens radio³¹¹, des dispositifs informatiques dédiés, les *Terminal Control Unit* (T.C.U.), durent être imaginés et produits. L'usage de fréquences radio dans la bande UHF exigea aussi que l'on développe de nouveaux programmes informatiques pour prendre en charge les échanges de données réalisés selon ce mode. Ici, et à la différence de ce qui se passait avec ARPANET, tous les nœuds du réseau devaient en effet partager un même médium (une même fréquence) pour transmettre et recevoir des informations. En conséquence, des applications de contrôle et de régulation³¹² permettant de surveiller le trafic - c'est-à-dire finalement d'optimiser l'usage de la bande passante en indiquant de façon automatique et régulière quelle machine était autorisée à émettre à quel moment en fonction de l'état courant du réseau - durent également être définies et testées.

L'architecture d'ALOHANET était de type stellaire. Outre les *Terminal Control Unit*, le réseau était doté de répéteurs et de modulateurs/démodulateurs capables d'émettre des informations à la vitesse de 9600 bits par seconde. Chaque paquet de données émis sur le réseau radio – ou dans « l'éther » pour reprendre un terme alors employé par les informaticiens de l'époque - faisait bien entendu l'objet d'un formatage spécifique. Typiquement, un paquet de données formant un message ALOHANET se

³¹¹ Les fréquences des deux canaux à large bande (100 KHz) réservées aux transmissions d'ALOHANET étaient les suivantes : 407,350 Mhz (*Random Access Channel*) et 413,475 Mhz (*Broadcast Channel*).

³¹² Deux protocoles au moins virent ici le jour : *Pure Aloha* et *Slotted Aloha*. Le schéma le plus élémentaire était *Pure Aloha*. Dans ce cas, un ordinateur effectuait une émission dès qu'une trame (datagramme) était prête à être envoyée. Si cette trame parvenait à destination, alors la trame suivante pouvait être expédiée. Dans le cas contraire (la première trame était entrée en collision avec une trame envoyée au même moment par un autre ordinateur), alors elle devait être réémise après un délai d'attente de longueur aléatoire. Ce processus se répétait jusqu'à ce que le système informatique destinataire réceptionne avec succès la trame réexpédiée.

composait d'une séquence d'informations longue de 80 octets. A celle-ci venait s'ajouter un en-tête de 16 bits réservé à la spécification de l'adresse numérique de la machine destinataire sur le réseau, ainsi que deux emplacements de 16 bits. Le premier de ces champs était placé en début de message et le second à la fin. Les informations qui s'y trouvaient inscrites servaient à la vérification automatique de l'intégrité du paquet (méthode du contrôle par vérification de la parité). Le cœur de la structure (bien évidemment implanté à l'Université d'Hawaï) était un mini-ordinateur 16 bits *System 2100* fabriqué par la *Hewlett-Packard Company*. La fonction assignée à cette petite machine consistait à recevoir les multiples messages émis par les nœuds périphériques du réseau sur la fréquence des 407,350 Mhz (*Random Access Channel*), à les sauvegarder temporairement, puis à les rediffuser en direction des systèmes informatiques destinataires en employant cette fois la fréquence des 413,475 Mhz (*Broadcast Channel*). A la fin de l'année 1971, ALOHANET était devenu complètement opérationnel.

Le raccordement d'ALOHANET à ARPANET intervint grosso modo une année après cette entrée en fonction, au mois de décembre 1972. La décision d'opérer ce rattachement – véritablement le premier du genre puisqu'en plus de concerner la mise en réseau de deux réseaux informatiques il devait également mobiliser des moyens de transmission *satellites* - fut « prise » dans des circonstances plutôt inattendues. Norman Abramson est revenu sur cet épisode particulier de l'histoire d'ALOHANET dans une conférence qu'il a prononcée en mars 1985, lors des *I.E.E.E. Transactions on Information Theory*. A cette occasion, Abramson raconta que dans le courant de l'année 1972, il avait rencontré Lawrence G. Roberts afin d'examiner différents points techniques et administratifs touchant au déploiement d'ALOHANET (le réseau Hawaïen était financé par l'I.P.T.O.). Le scientifique d'Honolulu avait d'emblée eu l'intention de soulever la question de la connexion d'ALOHANET à ARPANET et à un moment donné, alors que L. G. Roberts s'était absenté momentanément de la pièce où tous deux se trouvaient, il avait ajouté le nom du « système ALOHA » dans une liste où figurait la désignation des différents sites informatiques où l'A.R.P.A. envisageait de déployer des *Interface Message Processors* pour la période des six mois à venir. Des dates précises correspondant aux jours prévus pour réaliser l'installation de ces équipements de raccordement à ARPANET étaient également mentionnées en regard du nom des différentes institutions concernées. En face de l'inscription qu'il venait d'insérer dans la liste, Abramson écrivit la date du 17 décembre 1972. Une fois le Directeur de l'I.P.T.O. revenu dans son bureau, les deux hommes reprirent leur entretien mais la discussion suivant son cours et le temps passant, ils n'eurent pas la possibilité d'aborder la question du

raccordement des deux réseaux informatiques. L'adjonction qu'Abramson avait faite en toute bonne foi à la liste des sites devant être prochainement rattachés à ARPANET ne fut cependant ni effacée, ni modifiée à l'issue de la conversation. En réalité, elle avait tout simplement été oubliée.

Particulièrement chargée en raison de la poursuite des phases d'installation et d'expérimentation des nœuds d'ALOHANET, l'année 1972 suivit son cours et Norman Abramson ne songea plus vraiment à la question du raccordement du réseau qu'il était en train de construire à ARPANET. Cette situation perdura jusqu'à ce qu'un coup de téléphone donné au début du mois de décembre 1972 par les techniciens de l'A.R.P.A. responsables de la mise en place des *Interface Message Processors* ne l'informe de l'imminence de la livraison d'un *Terminal Interface Message Processor* (T.I.M.P.). L'ajout qu'il avait réalisé quelques mois auparavant sur la liste prévisionnelle de L. G. Roberts venait de porter ses fruits. A la fin de l'année 1972 l'interface informatique conçue par *Bolt, Beranek et Newman* fut installée à l'Université d'Hawaï, ce qui permit aux ordinateurs d'ALOHANET et d'ARPANET de communiquer les uns avec les autres. L'élément fondamental assurant la jonction entre le réseau informatique continental et le réseau informatique archipélagique était un satellite³¹³. Compte tenu de l'hétérogénéité des composants de ces réseaux et de la spécificité de leurs modalités opérationnelles respectives – transmission par radio, liaison satellitaire et connexion filaire bidirectionnelles – des mesures matérielles et logicielles (protocoles) durent être développées et mises en œuvre des deux côtés afin de leur garantir un niveau satisfaisant d'interopérabilité.

³¹³ Les informations historiques et techniques concernant ALOHANET sont relativement peu nombreuses. On pourra tout de même se référer à deux documents : Norman Abramson, « Development of the ALOHANET », in *I.E.E.E. Transactions on Information Theory*, Vol. IT-31, n°2, pp. 119-123, mars 1985 et Daniel P. Siewiorek, Gordon C. Bell Allen Newell, *Computer Structures: Principles and Examples*, Section 5, Chapitre 25 (*ALOHA Packet Broadcasting: A Retrospect*), New-York, McGraw-Hill Inc., 1982, pp. 416-429.

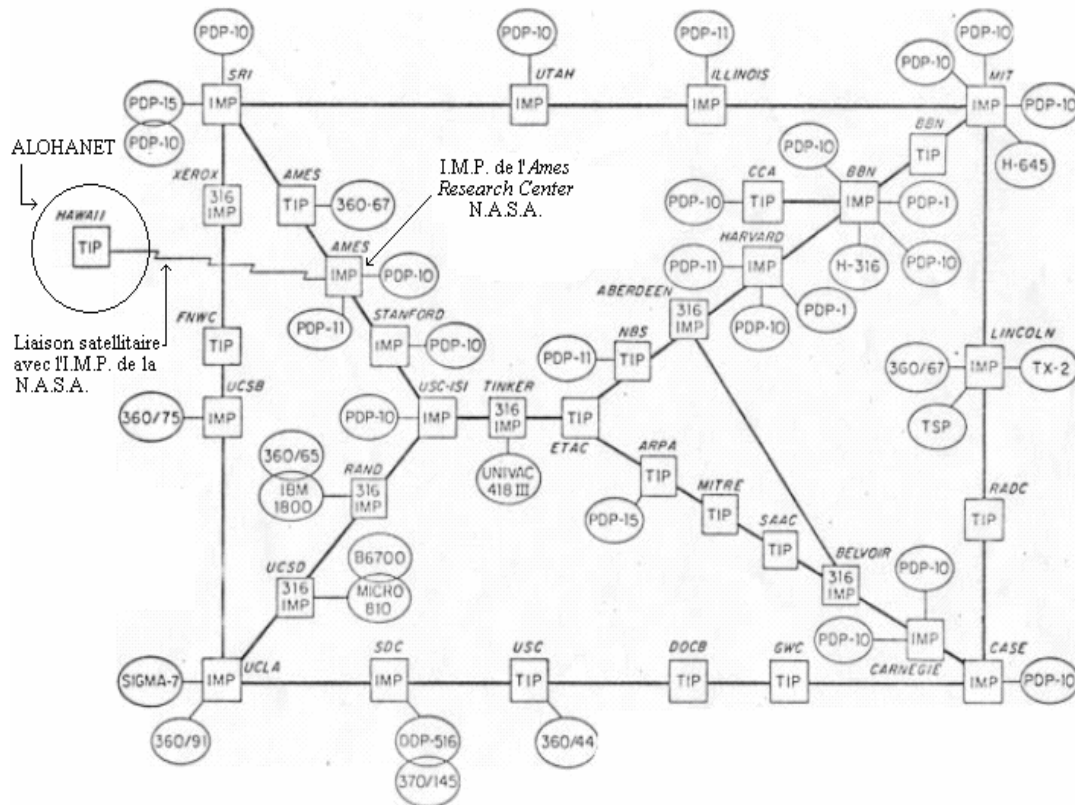


Fig 14: diagramme logique du réseau ARPANET, tel qu'il était au mois de janvier 1973. La liaison satellitaire entre ARPANET et ALOHANET (partie gauche du diagramme, soulignée et indexée par nos soins) est représentée ici au moyen d'un trait figurant un éclair. La connexion fut établie entre le Terminal Interface Message Processor (T.I.P.) de l'Université d'Hawaï et l'Interface Message Processor (I.M.P.) du N.A.S.A. Ames Research Center. In Nancy J. Neigus, *Network Working Group, Request for Comment: 432 BBN-NET, NIC: 13490*, décembre 1972, p.2.

Dans les années 1972-73, la structure que l'on désigne depuis 1983 sous le nom d'*Internet* n'existait pas encore mais un réseau de réseaux informatiques à commutation par paquets capable d'échanger des séquences d'informations binaires par le biais de lignes téléphoniques à haute vitesse et de liaisons radio et satellitaires avait déjà été mis en place aux Etats-Unis. Toutes les technologies matérielles et logicielles qui furent conçues ou améliorées à cette occasion servirent ensuite à l'augmentation du réseau, ou plutôt du méta réseau ARPANET. Elles inspirèrent également des chercheurs, comme Robert M. Metcalfe du *Xerox Palo Alto Research Center Computer Science Laboratory*, pour le développement de nouveaux standards informatiques de connexion d'ordinateurs et de transmission de données³¹⁴.

³¹⁴ On pensera notamment à l'*Atlantic Packet Satellite Experiment* et au protocole *Ethernet* très largement utilisé sur les réseaux locaux à câbles droits ou coaxiaux. Reposant sur l'utilisation d'un médium unique (en l'espèce un câble), *Ethernet* fut créé dans les années 70 par Robert M. Metcalfe.

2.2.7.4.3. Evolution et internationalisation d'ARPANET.

Si le raccordement d'ALOHANET à ARPANET constitua à proprement parler la première extension extracontinentale du réseau informatique de l'*United States Defense Advanced Research Projects Agency*, il ne changea cependant rien au fait qu'à la fin de l'année 1972, ce dernier était encore et toujours une construction informatique intégralement nationale. A compter de l'année 1973, cette situation commença à évoluer de manière tout à fait radicale. Notre réflexion sur les origines d'Internet s'est jusqu'à présent focalisée sur les Etats-Unis et le rôle absolument déterminant que certaines institutions et compagnies commerciales américaines (A.R.P.A., M.I.T., S.R.I., B.B.N., etc.), ont joué dans le processus de sa création et de son déploiement. De fait, la plus grande partie des travaux de recherche et de développement, mais aussi des besoins sociétaux et politico-militaires, qui ont permis et déterminé d'abord l'apparition de l'ordinateur, puis celle des réseaux d'instruments informatiques, ont été réalisés aux Etats-Unis. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut en évoquant les recherches sur le principe du *Packet Switching* qui furent conduites durant la première moitié des années 60 au *National Physical Laboratory* par les britanniques Donald W. Davies et Roger A. Scantlebury, les U.S.A. n'étaient pas le seul endroit dans le monde où l'on réfléchissait à la possibilité de faire communiquer entre elles des plateformes informatiques localisées dans des sites géographiques distants les uns des autres.

A bien des égards, un évènement scientifique d'envergure mondiale programmé par Lawrence G. Roberts (I.P.T.O.) et organisé à Washington D.C. par Robert E. Kahn (B.B.N.) joua dans le développement national et international d'ARPANET un rôle tout à fait prépondérant. L'*International Computer Communication Conference* fut voulue et mise sur pied afin de répondre à deux objectifs primordiaux: 1°) permettre à des scientifiques du monde entier d'examiner ensemble les questions et les problèmes touchant au domaine des communications informatiques; 2°) faire la promotion d'ARPANET en proposant aux personnes présentes d'assister et de participer à différentes démonstrations destinées à illustrer (entre autres choses remarquables) la puissance, la robustesse, l'utilité, la rapidité des temps de réponse et la facilité d'utilisation du réseau³¹⁵. La première *International Computer Communication Conference*, et avec elle la première démonstration publique d'ARPANET, eut lieu du 24 au 26 octobre 1972, à l'hôtel Hilton de Washington. Pour les besoins de la

³¹⁵ Trois mois avant sa tenue, cette conférence a fait l'objet d'une présentation générale dans une *Request for Comments* (R. E. Khan (B.B.N.), *Demonstration at International Computer Communications Conference, Network Working Group*, R.F.C. #371, NIC 11020, 12 juillet 1972). Cette R.F.C. peut être consultée à l'adresse suivante : <http://www.rfc-archive.org/getrfc.php?rfc=371>).

présentation un *Interface Message Processor* avait été installé dans sur un podium, dans une des salles de conférence de l'hôtel. Donald W. Davis (N.P.L.) était au nombre des personnes qui assistèrent à l'I.C.C.C. d'octobre 1972. Dans son article « Early Thoughts on Computer Communications », Davies a raconté combien, à son sens, cette première conférence sur les techniques de communication informatiques, s'est révélée décisive pour la communauté de chercheurs qui y assistèrent et y prirent part:

« La réunion qui s'est tenue au Hilton de Washington en 1972 est très certainement la plus importante et la plus décisive de toutes les conférences auxquelles il m'a été donné d'assister... Je suis arrivé à l'Hôtel Hilton suffisamment tôt pour voir ce qui s'y déroulait et être le témoin d'une scène extraordinaire... Sur une tribune était disposé un Terminal I.M.P. ou T.I.P., connecté au réseau ARPANET existant et entouré de nombreux périphériques terminaux de toutes sortes... La chose la plus étonnante était la foule de chercheurs jeunes et enthousiastes qui se précipitait autour [de l'installation] et se lançait dans des discussions sérieuses tout en s'efforçant de tout faire fonctionner. En écoutant leurs conversations, nous entendîmes toutes les choses que nous tentions de promouvoir depuis cinq ans être évoquées comme la chose la plus évidente du monde – il s'agissait là d'une expérience nouvelle et étrange. Plus que tout, on avait le sentiment qu'un effort intellectuel de premier ordre était à présent à l'œuvre dans le domaine des réseaux d'ordinateurs, qui devrait [encore] gagner en puissance... C'était un complet bouleversement, apparemment accompli en une journée, bien qu'en fait cette démonstration et ce changement de mentalité révolutionnaire par rapport aux réseaux aient résulté des énormes efforts réalisés par l'équipe de l'A.R.P.A. Cela modifia totalement les attitudes vis-à-vis des communications informatiques... Pourtant, nombreuses étaient les idées mises en avant ici qui avaient discutées cinq ou six années auparavant. Ce qui advint à Washington était que les gens pouvaient à présent voir ces idées sous la forme de réalisations pratiques. Ils avaient [désormais] la possibilité de jeter un œil sur l'impact intellectuel que les réseaux étaient destinés à avoir³¹⁶.

L'*International Computer Communication Conference* d'octobre 1972 connut un immense succès, tant auprès du grand public – la totalité des démonstrations lui était en effet accessible - que des membres de la communauté scientifique mondiale qui avaient fait le

³¹⁶ Donald W. Davies, « Early Thoughts on Computer Communications », in *The Computer Communication Revolution Multi-Disciplinary Retrospective and Prospective*, édité par S. Ramani et Pramode K. Verma I.C.C.C. Press, pp. 189-193. L'article de Davies peut être consulté en ligne sur le site de l'éditeur I.C.C.C. Press : www.icccpress.com/icccpress/pdf/Donald_Davies_historical_papers.pdf

déplacement. Les scientifiques américains ne furent pas non plus en reste. Pendant près d'une année Robert E. Kahn, assisté pour l'occasion de Al Vezza (M.I.T. *Project M.A.C.*), avait parcouru les Etats-Unis et littéralement rencontré et convaincu des dizaines d'industriels et de chercheurs engagés dans le secteur informatique de venir participer, avec leurs matériels, à l'I.C.C.C. 72. C'était en réalité la première fois que la communauté des chercheurs en informatique dans son ensemble se retrouvait en un même endroit, à un même moment. Comme R. E. Kahn devait d'ailleurs le rappeler de manière imagée : « *Si quelqu'un avait lancé une bombe sur le Hilton de Washington [à ce moment précis] il aurait annihilé la majeure partie de la communauté des réseaux existant alors aux Etats-Unis*³¹⁷ ». Le même sort funeste eut assurément attendu la communauté des scientifiques étrangers puisque ces derniers furent très nombreux à se rendre à Washington dans le but de participer à l'I.C.C.C. Une cinquantaine de pays étaient ainsi représentés, parmi lesquels la Norvège, le Royaume-Uni et la France. Cette réunion sans précédent constitua pour eux l'occasion d'exposer l'état des recherches (ou des plans de recherche) en matière de technologie réseau qui se trouvaient alors conduites dans leurs pays respectifs. On confia à Robert E. Metcalfe (M.I.T. / Harvard) la tâche d'imaginer les différents scénarios informatiques devant servir de base aux démonstrations destinées à illustrer tout ce qu'il était possible de faire au moyen d'ARPANET. Pour accompagner les 19 démonstrations qu'il avait conçues, Metcalfe rédigea un livret où il :

*« ...consigna toutes les ressources disponibles sur les différents nœuds du réseau, montra comment se connecter à un hôte distant, comment accéder à l'une des applications [disponibles], et comment contrôler un programme ou s'engager dans une forme ou une autre de communication interactive, via le réseau.*³¹⁸ ».

Au nombre de la vingtaine de démonstrations qui avaient été prévues, il y avait :

«... plusieurs jeux d'échecs, un quiz interactif à propos de la géographie de l'Amérique du Sud, une connexion permettant de lire les communiqués de l'Associated Press, et de nombreux autres jeux, outils et démonstrations. Une des applications les plus utiles simulait un scénario de contrôle de trafic aérien dans lequel la responsabilité de la surveillance d'un appareil en vol était transférée d'un ordinateur à un autre, ces derniers

³¹⁷ In [Hafner, Lyon, 1998], p. 179.

³¹⁸ *Ibid*, p.181.

*représentant ici les centres de contrôle aériens, au fur et à mesure que l'avion traversait les limites géographiques.*³¹⁹ ».

D'autres démonstrations eurent encore lieu, qui sont demeurées relativement fameuses dans l'histoire de l'informatique. On mentionnera ici la « rencontre », via ARPANET, entre ELIZA³²⁰, la parodie informatique de thérapeute Rogérien programmé en 1966 par Joseph Weizenbaum au M.I.T. *Artificial Intelligence Laboratory*, et PARRY, la simulation de schizophrène paranoïde conçue en 1972 par le psychiatre Kenneth M. Colby au *Stanford Artificial Intelligence Laboratory*³²¹. Les entrées et les sorties de chacun des deux « psycho programmes » avaient été croisées et connectées aux systèmes sur lesquels ils étaient installés (ELIZA au S.A.I.L. PARRY à la B.B.N.), de manière à ce qu'une dynamique de rétroaction basée sur les questions et les réponses faites de part et d'autre alimente et oriente cet étrange processus d'interaction synthétique. C'était la première fois que, devant un parterre stupéfait, l'intelligence artificielle et les réseaux informatiques se rencontraient publiquement. Une autre expérience conduite par Jonathan B. Postel de l'Université de Californie à Los Angeles avait pour objectif le téléchargement et l'impression d'un fichier stocké sur une machine du M.I.T., via l'I.M.P. de U.C.L.A. Au moment où Postel tenta de lancer l'impression dudit fichier sur une des imprimantes du système installé au Hilton de Washington, un dysfonctionnement survint et la tortue LOGO programmable qui faisait la joie des plus jeunes, non loin de là, se mit soudainement à se comporter de façon chaotique. Une analyse ultérieure révéla qu'en lieu et place du port de l'imprimante, les informations binaires qui composaient le fichier importé par Postel avaient été envoyées accidentellement sur le port d'entrée de la tortue (celle-ci était programmable grâce au réseau, via des terminaux). La tortue cybernétique avait interprété ces données comme s'il s'agissait de commandes de contrôle puis elle les avait exécutées comme telles. D'où la conduite erratique du petit robot. Là encore, et même si cette « collision inter expérimentale » se solda par une issue cocasse, ce fut certainement la première fois où la robotique rencontra les réseaux informatiques.

³¹⁹ *Ibid.*

³²⁰ Le programme ELIZA était aussi connu sous le nom de THE DOCTOR.

³²¹ ELIZA et PARRY s'étaient déjà « rencontrés » le 18 septembre 1972, soit un mois avant la tenue de la première édition de l'I.C.C.C. Le programme ELIZA était installé sur une machine du *Stanford Artificial Intelligence Laboratory* (S.A.I.L.) tandis que PARRY se trouvait sur un ordinateur de la B.B.N. Au cours de cette expérience, les deux systèmes étaient accédés et contrôlés depuis les installations informatiques de l'Université de Californie à Los Angeles. L'intégralité du « dialogue » entre le « docteur » et son « patient » a été reproduit dans la R.F.C. #439 (Vinton Cerf, S.U.-E.R.L., *PARRY Encounters the DOCTOR, Network Working Group, Request for Comments #439*, NIC: 13771, 21 janvier 1973.). Il est possible de consulter cette *Request for Comments* à l'adresse suivante : <http://www.faqs.org/rfcs/rfc439.html>

A nouveau, on peut affirmer sans exagérer le moins du monde que la première édition de l'*International Computer Communication Conference* représenta l'un des événements les plus décisifs de toute l'histoire de l'informatique et des réseaux d'ordinateurs. A l'origine, ARPANET avait été voulu par les responsables de l'A.R.P.A./I.P.T.O. afin de permettre la mise en commun des ressources informatique (temps et puissance de calcul, partage d'applications en temps réel), des principaux ARPA *Contractors*. Pour l'agence américaine il s'agissait là d'un moyen intéressant pour réaliser des économies financières importantes, tout en favorisant la coopération entre les différents groupes de chercheurs auxquelles elle apportait son aide financière. L'origine et les fonctions spécifiques du réseau firent que durant les deux premières années de son existence, il n'intéressa de façon directe que les institutions universitaires et les centres de recherche qui se trouvaient contractuellement liés avec l'*Advanced Research Projects Agency*. Et encore fallait-il que les thèmes de travail de ces A.R.P.A. *Contractors* concernent directement ou indirectement les technologies réseau (time-sharing, commutation par paquets, théorie des files d'attente, mise au point de suites de protocoles de communication de logiciels de partage, etc.). Eu égard à cela, le réseau ARPANET, même s'il était connu et/ou couramment utilisé par une certaine frange de la communauté des informaticiens américains et étrangers, ne constituait pas nécessairement quelque chose de notoire en dehors de ce cercle somme toute restreint. Pendant deux journées et demie, des centaines de personnes fréquentèrent la salle d'exposition où le *Terminal Interface Message Processor* et les quarante terminaux reliés à ARPANET étaient disposés. En compagnie des nombreux représentants que les constructeurs de matériels informatiques et les industriels des télécommunications avaient dépêchés sur place, celles-ci furent invitées à assister et même à participer aux différentes démonstrations d'informatique interactive en ligne que R. E. Kahn et son équipe avaient organisées pendant quasiment toute une année. Parfaitement efficaces car en plus de prouver clairement et en direct la robustesse et la vitesse d'ARPANET, elles mettaient à la disposition de l'assistance les ressources logicielles multiples dispersées sur les différents nœuds du réseau, ces démonstrations à la mise en scène parfois spectaculaires amenèrent la composante professionnelle du public – et tout spécialement les personnes issues de l'industrie des télécommunications³²² – à passer progressivement d'une posture franchement sceptique à une attitude globalement convaincue vis-à-vis d'ARPANET. De leur côté, les personnels mandatés par les fabricants d'ordinateurs se rendirent assez vite compte que tout ce qui leur était présenté avait très certainement valeur

³²² Notamment les gens d'AT&T puis le géant industriel avait fourni les lignes téléphoniques à haut débit utilisées pour la démonstration.

de nouveau marché pour leurs entreprises respectives. En plus de la reconnaissance et du gain de crédibilité que cette manifestation lui apporta incontestablement, l'*International Computer Communication Conference* permit à la communauté des chercheurs en informatique spécialisés dans les réseaux de prendre pleinement conscience de son importance, de sa force, de la consistance et de l'efficacité de ses réalisations, mais aussi de l'ampleur et de la diversité des moyens et des outils qui se trouvaient désormais à sa disposition. L'inspiration, l'excitation et la confiance nouvelles que firent naître les démonstrations et les conférences faites lors de l'I.C.C.C. 72 touchèrent les américains en premier lieu bien sûr, mais elles gagnèrent également les scientifiques étrangers qui y étaient présents. Profitant de cette synergie et de ce socle nouvellement établi, les chercheurs du N.W.G. (parmi lesquels Vinton G. Cerf, Robert, E. Kahn, Elmer Shapiro et Jonathan B. Postel), décidèrent de procéder à l'élargissement de leur groupe de recherche en proposant aux scientifiques étrangers engagés dans des travaux similaires aux leurs de les rejoindre. Cette proposition de coopération reçut immédiatement un accueil très favorable et l'*International Network Working Group* fut créé. Les objectifs primordiaux de ce groupe de travail étendu présidé par le Dr. Vinton G. Cerf devaient consister à définir les modalités et les outils matériels et logiciels nécessaires afin de pouvoir connecter ensemble les différents réseaux informatiques qui, indépendamment les uns des autres, avaient été développés ou étaient en train d'être développés dans différentes parties du monde. Notons qu'aussitôt la conférence terminée, Robert E. Kahn quitta la *Bolt, Beranek & Newman Inc.* pour rejoindre la D.A.R.P.A. et y prendre la tête des programmes SATNET (*Packet Switched Satellite Network*), *Packet Radio Net* (PRNET) et *Packet Voice*³²³.

Les premiers raccordements de nœuds informatiques étrangers à ARPANET intervinrent au cours de l'été 1973. Il devait s'agir ici du réseau à commutation par paquets *Mark I*³²⁴ mit en place par Donald W. Davies au *National Physical Laboratory* à partir de 1970, et du site informatisé du NORSAR (*NORwegian Seismic Array*), implanté en Norvège. En 1965, un contrat avait été passé entre le *Nuclear Monitoring Research Office* (N.M.R.O.), une division de l'A.R.P.A. chargée des opérations de surveillance des activités nucléaires

³²³ Ces trois projets avaient été démarrés par Lawrence G. Roberts, quelques temps avant qu'il ne quitte la présidence de la D.A.R.P.A./I.P.T.O. pour créer TELENET, le premier réseau à commutation par paquets à vocation commerciale. SATNET était un réseau informatique à commutation par paquets employant des liaisons satellites, PRNET était aussi un réseau à commutation par paquets, utilisant des unités radio mobiles. Quant au *Packet Voice*, c'était une technologie destinée par autoriser la transmission de la voix sur les réseaux informatiques. A terme, l'idée était de raccorder SATNET, PRNET et ARPANET, ce dernier servant d'épine dorsale (*backbone*) aux deux autres réseaux. Roberts avait demandé à Kahn de rejoindre la D.A.R.P.A. au début de l'année 1972.

³²⁴ L'appellation « *Mark I* » fut choisie pour désigner la première version du réseau du N.P.L. Cependant des améliorations ne cessèrent de lui être apportées à tel point qu'en 1973, la structure avait tellement évolué que cette appellation fut changée en « *Mark II* ».

militaires dans le monde, et le *Norwegian Defence Research Establishment* (N.D.R.E.). Cet accord avait comme objectif la mise en place d'une station de veille sismique à Kjeller, non loin d'Oslo. L'*Advanced Research Projects Agency* et le *Royal Technical Research Council of Norway* étaient les bailleurs de fonds du projet. Deux autres stations d'écoute de ce genre existaient déjà aux Etats-Unis. La première, qui constituait le centre du réseau de veille *Seismic Data Analysis Center* (S.D.A.C.), était implantée dans l'état du Montana tandis que l'autre était localisée en Alaska. La Norvège représentait une zone extrêmement intéressante pour les services de renseignement américains, eu égard à la proximité géographique qui existait entre ce pays et l'U.R.S.S.

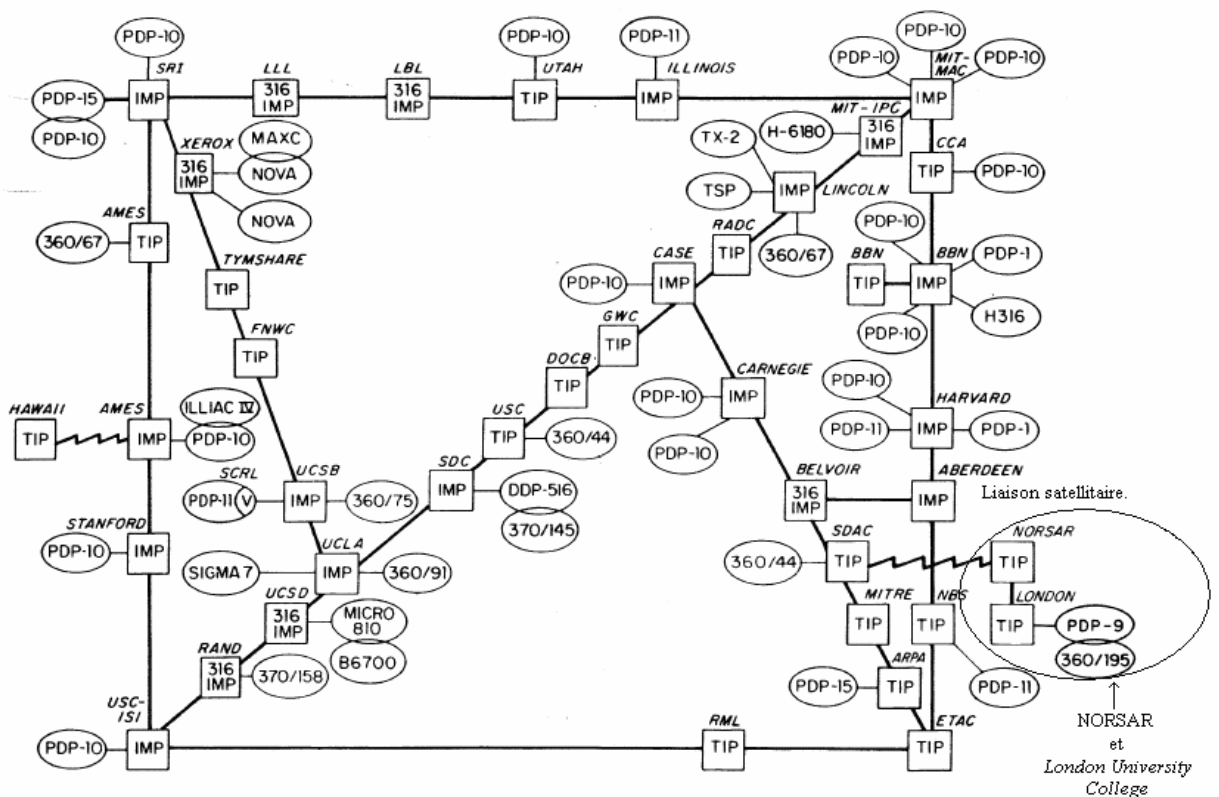


Fig 15: topologie logique du réseau ARPANET, au mois de septembre 1973. Le sous-réseau constitué par la connexion des sites informatiques du *London University College* et du *NORwegian Seismic Array* (NORSAR) figure en bas et à droite du diagramme (entouré et indexé par nos soins). D'après F. Heart, F. McKenzie, J. McQuillan, et D. Walden, *ARPANET Completion Report, Technical Report #4799, Bolt, Beranek et Newman Inc., Burlington, 4 janvier 78, p.199.*

En 1972, les américains et leurs alliés norvégiens prirent d'un commun accord la décision de connecter le dispositif NORSAR à ARPANET. Au cours du premier semestre 1973, l'A.R.P.A./I.P.T.O. envoya donc un *Terminal Interface Message Processor* à Kjeller et une liaison par voie satellitaire fut rapidement établie entre NORSAR et ARPANET, via la station nordique de Tanum, en Suède. A la même époque, Lawrence G. Robert prit contact avec Donald W. Davies dans le but de lui offrir de raccorder le réseau informatique expérimental *Mark I* du *National Physical Laboratory* à ARPANET. Davies ne put cependant

faire autrement que de décliner cette proposition de projet. A cette époque le gouvernement de la Grande-Bretagne ambitionnait en effet de faire entrer l'Angleterre dans la Communauté Européenne. Aussi, étant donné que le N.P.L. était un laboratoire d'état dépendant du *Department of Technology*, ses responsables ne pouvaient raisonnablement envisager de s'engager dans une collaboration de ce genre avec les Etats-Unis. Pour des motifs politiques évidents le *National Physical Laboratory* et les autres institutions similaires devaient plutôt s'efforcer de prendre part à des projets scientifiques européens (comme l'*European Informatics Network* par exemple). C'est à ce point que Peter T. Kirstein, un professeur d'informatique au *London University College* très intéressé par la perspective de rejoindre le réseau américain, proposa une solution alternative qui devait permettre de raccorder un site informatique anglais à ARPANET, tout en ménageant les différentes susceptibilités politiques et diplomatiques qui autrement auraient pu se trouver froissées par la réalisation d'une telle opération. Sachant que le mini-ordinateur D.E.C. P.D.P.-9 du *London University College* était déjà connecté au puissant I.B.M. 360/195 du *Rutherford High Energy Laboratory* (R.H.E.L.), la proposition de Kirstein devait consister à raccorder ce petit réseau à ARPANET, en mettant en œuvre une liaison entre le centre d'écoute sismique norvégien NORSTAR et un *Terminal Interface Message Processor* spécialement installé à cette occasion dans les locaux du *London University College*³²⁵. Accédé depuis le P.D.P.-9³²⁶ du *London University College*, le mainframe I.B.M. du R.H.E.L. devait servir ici à réaliser des opérations de mesure et de surveillance de trafic sur le pont satellitaire transatlantique reliant les machines du NORSTAR et du S.D.A.C. La liaison ARPANET Royaume-Uni/Norvège/Etats-Unis entra en opération le 25 juillet 1973. Pionnières en matière de recherches en communications informatiques la Norvège et la Grande-Bretagne furent donc les premières nations étrangères à voir un de leurs réseaux d'ordinateurs raccordés à ARPANET. Cependant ces deux pays du vieux continent étaient loin de détenir un monopole dans le domaine des réseaux informatiques et d'autres nations travaillaient elles aussi à l'élaboration de leurs propres structures.

2.2.7.5. Le réseau CYCLADES (I.R.I.A.).

³²⁵ La connexion entre les machines du *London University College* et celles du NORSTAR était réalisée au moyen d'une ligne téléphonique sous-marine.

³²⁶ Le mini-ordinateur fut programmé de manière à émuler un terminal I.B.M.

Ainsi au même moment, et six ans après le lancement du Premier Plan Calcul par le Général De Gaulle, Louis Pouzin démarra dans l'hexagone le projet CYCLADES³²⁷. Ce programme destiné à élaborer un réseau des Universités et de la Recherche fut initié par la Délégation à l'Informatique (D.A.I.) et coordonné par une équipe de l'Institut de Recherche en Informatique et en Automatique (I.R.I.A.). La décision de construire le réseau CYCLADES intervint après qu'une délégation française composée notamment de Claude Kaiser (I.R.I.A.), Sacha Krakowiak (I.R.I.A.), Michel Monpetit (D.A.I.), et Alain Profit (Centre National d'Études des Télécommunications, futur France Télécom), se fut rendue à l'Université de Californie à Los Angeles pour y voir fonctionner le *Xerox Data Systems SIGMA-7*³²⁸ et l'*Interface Message Processor* qui assurait son raccordement à ARPANET. Une fois revenus en France, les chercheurs de l'I.R.I.A. et du C.N.E.T. rédigèrent plusieurs rapports qui éveillèrent l'intérêt des plus hautes autorités scientifiques et politiques. Convaincu de l'utilité et de la puissance de cette nouvelle technologie, mais aussi séduit par l'idée de pouvoir renforcer ici un peu plus l'indépendance du pays en matière de technologie informatique, le gouvernement prit très rapidement la décision de démarrer au sein de l'I.R.I.A. la construction d'un réseau à commutation par paquets pour relier les ordinateurs des universités et des laboratoires de recherche français. Prévu initialement pour mettre en rapport une vingtaine d'ordinateurs hétérogènes implantés en autant de sites géographiques différents, le réseau CYCLADES devait permettre de « *développer [en France] un savoir-faire dans divers domaines, dont la transmission de données, les applications interactives, les bases de données réparties et le travail coopératif à distance* »³²⁹.

La direction du projet CYCLADES fut confiée à Louis Pouzin. Ce dernier était secondé dans sa tâche par Hubert Zimmerman et Gérard Lelan. On se rappelle que dans les années 1964-85 le polytechnicien se trouvait au *Massachusetts Institute of Technology* afin d'y achever sa formation scientifique. Durant ces quelques années passées aux Etats-Unis,

³²⁷ Dans une interview accordé au mois de juin 2005 à Daniel Dalarossa et John Lima, les cofondateurs de la société informatique américaine *Cyclades Corporation*, Louis Pouzin a indiqué que le nom « Cyclades » avait évidemment été choisi (par lui d'ailleurs) en référence à l'archipel de la mer Egée. Le groupe d'îles, selon le scientifique français évoquait irrésistiblement un réseau d'ordinateurs. De surcroît et toujours d'après le Polytechnicien, les soubresauts politiques et guerriers que l'archipel avait connus au cours de la période classique n'étaient pas sans rappeler les dissensions qui existaient très souvent entre les personnes et les institutions qui prenaient part à la conception et à la mise en place des réseaux informatiques. Cet entretien intitulé « Louis Pouzin : Influencing the Evolution of the Internet. » est consultable sur le site de la compagnie Cyclades, à l'adresse suivante : <http://www.cyclades.com/company/interview.php>.

³²⁸ Ordinateur à architecture 32 bits, le SIGMA-7 fut introduit par la *Scientific Data Systems Corporation* en 1966. En 1969, l'entreprise fondée à la fin de l'année 1961 fut vendue à la *Xerox Data Systems Corporation*. Aussi l'appellation SIGMA-7 est-elle souvent précédée des sigles S.D.S. et/ou X.D.S.

³²⁹ Louis Pouzin, « Cyclades, ou comment perdre un marché », in *La Recherche*, n°328, pp 32-37, février 2000.

Pouzin avait pris une part active à la conception du *Compatible Time Sharing System* (dans le cadre du *Project M.A.C.*), suggérant notamment l'idée d'un programme permettant l'échange de messages électroniques entre terminaux (sur un même système en temps partagé), et développant l'application RUNCOM, laquelle est en général tenue pour l'ancêtre du *Shell* de commandes. S'il était une personne en France qui en plus des compétences théorétiques et techniques possédait aussi l'expérience nécessaire – elle était à l'époque d'une grande rareté rappelons-le – pour mener à bien la conduite d'un projet de cette sorte, c'était très assurément Louis Pouzin. Les premières phases du développement du réseau CYCLADES (et de son sous réseau CIGALES) se déroulèrent si rapidement qu'en 1972, ses créateurs étaient déjà en mesure d'en organiser une première démonstration. Bien qu'assez peu souvent mentionné dans la littérature consacrée à l'histoire d'ARPANET et d'Internet³³⁰, le réseau CYCLADES, en raison de certaines des solutions technologiques qui se virent définies et employées dans le cadre de sa conception, a exercé une influence décisive sur l'évolution d'ARPANET. L'architecture feuilletée de la suite de protocoles de communication de CYCLADES intégrait trois couches réseau à la fois indépendantes et ordonnées: la couche de liaison de données (*Data Transmission Layer* en anglais), la couche de transport (*Transport Layer*) et la couche application (*Application Layer*). Au sein de cette hiérarchie, la couche de transmission de données était la plus basse. Elle était implémentée dans les systèmes informatiques du sous réseau CIGALES. Les machines du CIGALES étaient des mini-ordinateurs C.I.I. MITRA-15³³¹. Les principales fonctions qui leur étaient dévolues consistaient à réaliser toutes les opérations de commutation par paquets (routage) de CYCLADES en optimisant le temps d'exécution, à fournir un service d'assemblage/désassemblage de datagrammes à ses nœuds et à assurer le cas échéant son interopérabilité avec d'autres réseaux travaillant également en *Packet Switching*³³². La couche de transport représentait ici l'élément logiciel de prise en charge des communications interprocessus. Enfin la couche application fournissait des services réseau aux programmes utilitaires employés tout à tour par les utilisateurs des mainframes appartenant à CYCLADES. Une des choses les plus importantes qui furent imaginées ici était incontestablement la notion de datagramme. Nommé ainsi par analogie avec le télégramme, le datagramme est un bloc de données (*data* en anglais) composite qui, transitant sur un réseau informatique, possède la particularité d'intégrer dans des en-têtes

³³⁰ Et encore lorsque c'est le cas il ne s'agit souvent que de simples notes de bas de page.

³³¹ Les machines du sous réseau CIGALES étaient des mini ordinateurs MITRA-15 à architecture 16 bits, fabriqués par l'entreprise française *Compagnie Industrielle pour l'Informatique* (laquelle deviendra *Honeywell-Bull-CII* en 1975).

³³² Les MITRA-15 du sous réseau CIGALES fournissaient aussi de petits services élémentaires, comme par exemple une application de configuration de nœuds.

spéciaux – le terme exact pour qualifier cette technique d’incorporation est « encapsulation » - l’ensemble des informations nécessaires à son propre acheminement sur le réseau. Le routage était adaptatif et les datagrammes étaient pourvus d’une capacité d’avertissement à l’expéditeur en cas d’échec de l’opération de délivrance à l’hôte destinataire.

Ainsi en France, à la fin de l’année 1972, il existait un réseau informatique expérimental parfaitement opérationnel, dont l’architecture et le mode opératoire s’inspiraient largement et ouvertement d’ARPANET. A l’instar du grand réseau américain, ce dernier exploitait ainsi le principe de la commutation par paquets et autorisait l’envoi de milliers de datagrammes – ces mêmes objets logiques autoguidés qui aujourd’hui transitent par centaines de millions sur Internet – en direction de ses différents systèmes hôtes. Les choix bien évidemment décisifs concernant l’architecture réseau et les protocoles de communication qui devaient être employés pour construire CYCLADES firent l’objet de discussions plutôt âpres au moment où débutèrent les premières réunions du projet. Sachant que le développement du réseau CYCLADES devait exiger l’intervention de plusieurs grandes entités institutionnelles – il devait pour l’essentiel s’agir ici de l’Institut de Recherche en Informatique (I.R.I.A.), du Centre national d’études des télécommunications (C.N.E.T.), de la *Compagnie Industrielle pour l’Informatique* (C.I.I.), des Postes et Télécommunications (P.T.T.), et de la Direction Générale de Télécommunications (D.G.T.) - des dissensions, pour ne pas dire de franches oppositions, commencèrent à apparaître dès lors que la question de la sélection des solutions technologiques capitales du réseau fut portée à l’ordre du jour. Deux camps ou écoles se trouvaient ici en opposition directe quant à la nature des solutions qu’il convenait d’adopter pour l’élaboration du réseau français. Même si cette dimension du problème revêtait un caractère éminemment important, elle ne constituait pas le seul élément déterminant qui motivait et alimentait cette confrontation de vues. D’autres facteurs participant de la sphère économique et de l’ordre politique entrèrent aussi en ligne de compte et entraînèrent des conséquences notables à court et long terme. Dans un article écrit en 2000 Louis Pouzin a résumé la situation qui était celle d’alors en soulignant particulièrement les rôles que jouèrent le Centre national d’études des télécommunications et les Postes et Télécommunications dans l’écriture d’un improbable scénario – en tout cas nous apparaît-il tel rétrospectivement - qui six années après son démarrage aboutit à la mort discrète du réseau CYCLADES :

« Les PTT, dont la place dans le projet n’était pas définie, ont joué un rôle majeur dans le destin de Cyclades. La délégation à l’informatique avait besoin de leur participation pour des raisons politiques et financières. Mais, alors que les entreprises s’orientaient vers des réseaux informatiques, ou du moins tentaient de le faire, les PTT ne disposaient d’aucun

plan d'infrastructure pour la transmission de données. On vivait le paroxysme de la grande misère téléphonique. Il fallait donc les pousser à prendre des initiatives. Il fallait aussi s'en faire des alliés pour obtenir des services car les circuits nécessaires pour construire le réseau auraient coûté près de la moitié du budget s'ils avaient été facturés au tarif en vigueur à l'époque, qui était véritablement prohibitif. Lors d'un premier contact, la situation s'est compliquée : le Centre national d'études des télécommunications (CNET) a en effet exposé un projet de réseau dont la Délégation à l'Informatique n'avait jamais entendu parler. Ce réseau devait utiliser des ordinateurs PDP-11 du constructeur américain Digital Equipment, et non pas ceux de la CII. Du point de vue des informaticiens, cet abandon du matériel français constituait évidemment une hérésie. Par ailleurs, la conception du réseau exposée par le CNET reposait sur une technique de circuit virtuel, attitude prévisible dans le monde de la téléphonie. Mais Cyclades reposait sur un concept nouveau, le datagramme, qui permettait de faire l'économie de la notion de circuit, comme nous le verrons plus loin. Cette fois-ci, l'hérésie se situait du côté des informaticiens, et elle était parfaitement ciblée par les PTT. Tout était en place pour garantir une relation orageuse.³³³ ».

Pour condensé qu'il puisse être, le récit de Louis Pouzin laisse très clairement apparaître les dynamiques antagonistes qui existaient entre les principaux groupes d'acteurs du projet CYCLADES. Rappelant d'une certaine manière ce qui s'était passé entre la compagnie AT&T et Paul Baran dix années auparavant, la classe des ingénieurs en télécommunication (C.N.E.T., P.T.T.), et celle des informaticiens (C.I.I., I.R.I.A.) étaient entrées ici en conflit au sujet du choix des équipements de commutation des réseaux informatiques et aussi à propos de celui de leurs architectures fondamentales. Deux conceptions, deux philosophies, s'affrontaient ici. Comme le rappelle Louis Pouzin les spécialistes des télécommunications – ici ceux du C.N.E.T. - souhaitaient recourir à des D.E.C. P.D.P.-11 américains pour l'implémentation des équipements de routage du réseau. La préférence des informaticiens, elle, allait à des matériels (MITRA-15) produits par la société française C.I.I. Quant à la question des possibilités de réalisation architecturale, le premier groupe défendait le concept de réseau à commutation par paquets à *circuits virtuels* tandis que le second se prononçait vigoureusement en faveur de celui de réseau à commutation par paquets à datagrammes. Selon une définition couramment admise dans le secteur des télécommunications, un circuit virtuel « *par opposition à un circuit physique indépendant, est*

³³³ Louis Pouzin, « Cyclades, ou comment perdre un marché », in *La Recherche*, n°328, pp. 32-37, février 2000.

*une voie de communication logique entre deux terminaux ou systèmes qui n'utilisent pas un circuit physique dédié. Cette voie correspond temporairement à celle d'un chemin physique disponible, éventuellement partagé avec d'autres communications*³³⁴ ».

Pour les ingénieurs des télécommunications, cette manière de procéder présentait plusieurs avantages notables. Primo, pour des raisons d'ordre culturel, la possibilité de conserver ici la notion de « circuit » revêtait pour cette corporation un caractère particulièrement attractif. Ensuite le principe des circuits virtuels lui paraissait plus intéressant parce qu'il offrait une certaine sûreté de la facturation des services (pour le coup assez similaire à celle pratiquée dans le secteur de la téléphonie), et une bonne capacité de contrôle des flux de données. Mise en avant par la communauté des informaticiens la méthode du réseau à commutation par paquets à datagrammes comportait elle aussi de nombreux avantages, à commencer bien sûr par le fait que les datagrammes n'étaient astreints à aucune forme de séquentialité. En d'autres termes l'ordre d'arrivée des datagrammes à la machine destinataire pouvait complètement différer de l'ordre dans lequel ils avaient été expédiés par l'hôte source. En outre différents datagrammes composant une même unité informationnelle pouvaient parfaitement prendre différents chemins sur le réseau et aboutir finalement à la même extrémité. Si un ou plusieurs nœuds de la structure étaient victimes de difficultés techniques temporaires ou prolongées, les communications ne s'interrompaient pas, elles empruntaient tout simplement d'autres voies. Chose inacceptable pour les spécialistes des télécommunications cette dernière propriété signifiait également que l'utilisation des datagrammes permettait de faire l'économie du concept de circuit³³⁵. Comme l'a rappelé Louis Pouzin : « ...l'approche datagramme est de souche informatique. L'approche circuit virtuel est de souche télécom. Ces deux courants de pensée sont comme l'eau et l'huile, et s'opposent depuis les origines ».

En définitive et malgré la force de cette opposition, l'auteur rappelle qu'un accord put finalement être conclu entre les différents partis. Le réseau fut finalement construit selon les spécifications des informaticiens et une première démonstration « médiatique » put être organisée au début du mois de novembre 1973, en présence du Ministre de l'Industrie et des Postes et Télécommunications. Le démarrage relativement difficile qu'avait connu le projet

³³⁴ In [Odier, Zennaki 1992], p.118.

³³⁵ Pour reprendre ici une analogie parlante à laquelle Louis Pouzin a recouru dans son article, « *les datagrammes sont analogues à des voitures se rendant de Rennes à Limoges par des itinéraires laissés au choix des conducteurs. Tandis que les paquets sur un circuit virtuel sont analogues aux wagons d'un train Rennes-Limoges* ».

CYCLADES était cependant de bien mauvais augure pour la suite. Au début de la seconde moitié des années 70, le Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique, organisme international en charge de l'élaboration des normes et des protocoles de télécommunication commença à peser de tout son poids afin de promouvoir et d'imposer au niveau européen la norme X.25, une méthode de transmission de données par paquets reposant sur l'utilisation de circuits virtuels que la France, la Belgique, le Canada, la Grande-Bretagne avaient conjointement proposées pour leur réseaux de communication publics. Ce premier coup dur porté au réseau CYCLADES fut bientôt suivi par un autre, à l'échelon national cette fois. Ainsi :

« ...le passage au pouvoir giscardien avait eu aussi pour effet de supprimer la délégation à l'informatique en 1974. La fusion de CII et de Honeywell Bull a rapidement suivi. Dans le même mouvement, le budget de Cyclades a été transféré à la nouvelle direction des industries électroniques et de l'informatique (DIELI), une branche du ministère de l'Industrie, dont le principal souci était de remplacer les ordinateurs CII par ceux de Honeywell Bull. Tous ces chambardements, qui reflètent la fin des ambitions françaises dans le domaine du matériel informatique, ont finalement abouti à une réduction du financement de Cyclades et même à un blocage des crédits de paiement. Dans ce contexte de revirement politique, la norme X.25 apportait évidemment de l'eau au moulin des PTT et leur permettait de traiter officiellement le datagramme comme une hérésie à réprimer. La décision de construire Transpac contraignait les institutions à s'aligner sur X.25, et elle servit d'argument, voire de prétexte, pour arrêter les activités liées à Cyclades. Malgré les efforts de certaines équipes de chercheurs pour maintenir une partie au moins du réseau en état de marche, l'infrastructure s'est dissoute vers la fin de 1978, sans témoin, pourrait-on dire, sans bruit non plus. »

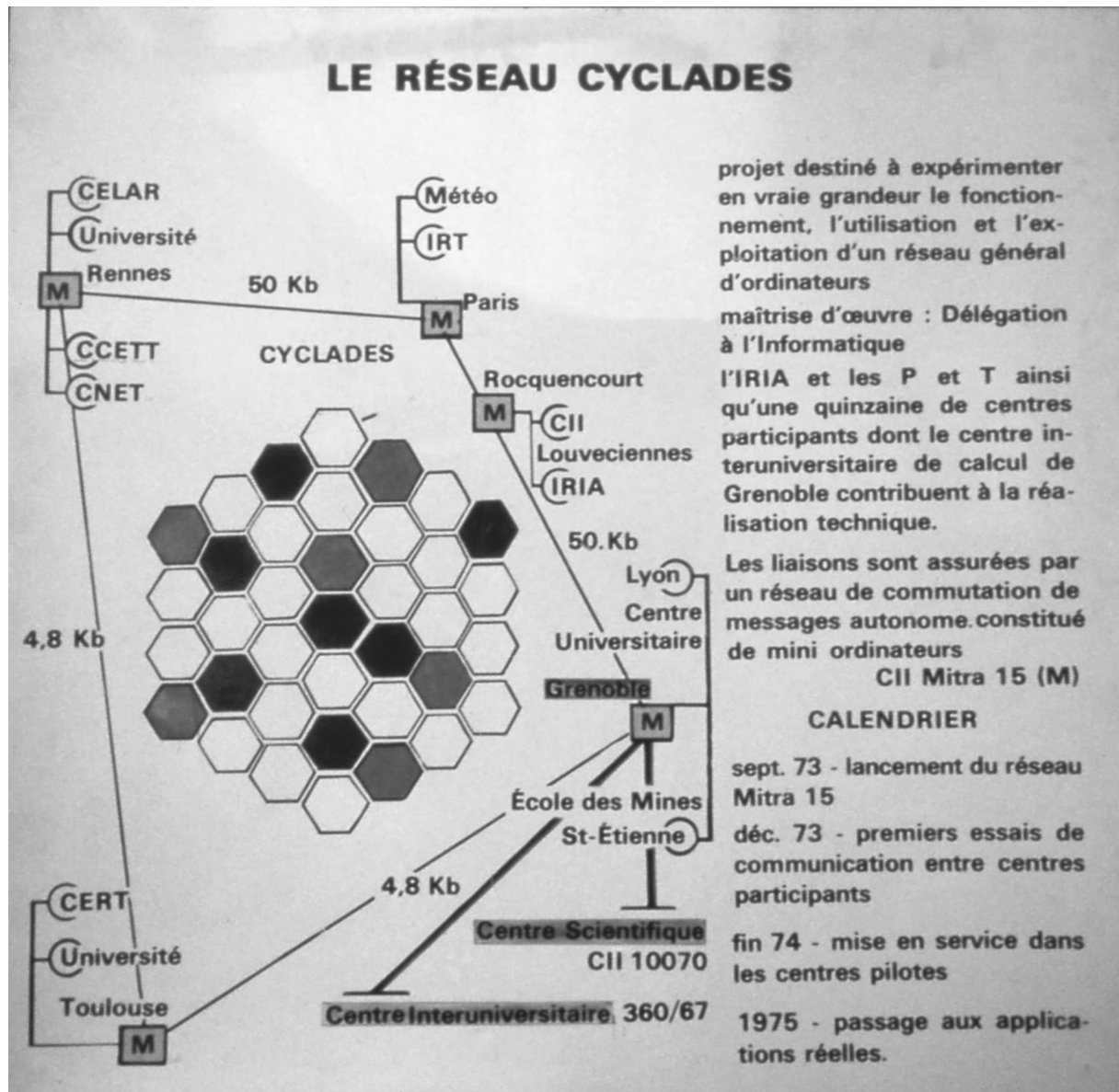


Fig. 16: Diagramme logique du réseau CYCLADES et calendrier du programme de déploiement. Document Institut d'Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble (I.M.A.G.), *Exposition 50 ans Informatique Grenoble*, 23 novembre – 2 décembre 2002.

Des bouleversements économiques et des choix d'orientation faits aux plus hauts niveaux des sphères politiques nationales, ajoutés à la puissance d'influence du lobby européen des télécommunications, lequel défendait en l'occurrence un modèle d'architecture réseau et des technologies différents du sien, finir par avoir raison du réseau informatique CYCLADES, six ans seulement après son lancement. Tout cela se fit au profit de *Transpac*, le réseau de télécommunications de *France Télécom* (ancienne Direction Générale des Télécommunications). Basé sur la norme X.25, promu par les instances dirigeantes et soutenu par de puissants intérêts financiers, le réseau *Transpac* entrainé de fait en concurrence directe

avec le réseau CYCLADES. Il n'est guère exagéré de dire que le second fut purement et simplement sacrifié au pied du berceau du premier. Lorsque l'on considère rétrospectivement cette suite d'évènements, on en arrive nécessairement à cette double conclusion ahurissante. La France disposait au début des années 70 d'un réseau informatique à commutation par paquets d'ampleur nationale : CYCLADES. Les caractéristiques techniques de ce réseau avaient été directement empruntées à ARPANET, et pour l'acheminement des données, il recourrait à une méthode de routage évoluée - celle des datagrammes - qui possédait l'avantage précieux de conjuguer souplesse et robustesse. Sur les plans de la technique, du développement des logiciels et des infrastructures de contrôle, CYCLADES était certainement plus lourd à mettre en œuvre et plus complexe à gérer qu'un réseau opéré sous standard X.25, tel *Transpac*³³⁶. Cependant le réseau informatique expérimental français de l'I.R.I.A. était tout à fait viable et prometteur. En cela il était parfaitement capable de remplir les différentes missions pour lesquelles il avait été voulu et mis en œuvre. Durant les années 1974 et 1975, la fréquence des démonstrations et des expériences s'intensifia. Une première liaison internationale fut ainsi établie entre CYCLADES et le réseau *Mark II* du *National Physical Laboratory*, puis une deuxième, avec le site romain de l'Agence Spatiale Européenne. Toute l'expérience que les concepteurs de CYCLADES s'étaient trouvés en mesure de gagner au cours de son processus de construction, toutes les solutions qu'ils avaient imaginées – notamment dans le domaine des protocoles³³⁷ - contribuèrent à faire de la France le numéro 2 mondial en matière de réseaux informatiques à commutation par paquets, juste derrière les Etats-Unis. Or pour les divers motifs qui viennent d'être exposés on a renoncé à CYCLADES et littéralement mis au ban des techniques de transmission informatiques le principe du datagramme. Cela bien sûr afin (de tenter) d'asseoir définitivement la suprématie de la norme européenne X.25 et du principe des circuits virtuels. Il est difficile de prendre ici la mesure exacte de tout ce que la France a pu perdre à cause de cette manœuvre stratégique. En revanche, il est aisé de voir ce que les Etats-Unis y ont effectivement gagné.

³³⁶ Par exemple, avec un réseau tel que *Transpac*, le meilleur chemin entre deux points du réseau est choisi au moment de la connexion et maintenu pendant toute la durée de celle-ci. A la différence de ce qui se passe lorsque l'on a affaire à un réseau à datagrammes, il n'est nul besoin ici dans ce cas de procéder à des opérations d'assemblage/désassemblage sur les paquets de données envoyés/reçus. En contrepartie, si la connexion ou l'un des deux hôtes connaît un dysfonctionnement au cours de la transmission, alors une nouvelle connexion doit être établie et l'intégralité des données retransmises.

³³⁷ Que ce soit de manière directe, et l'on songera alors au modèle ISO/OSI (*International Standards Organisation/Open Systems Interconnection*), ou indirecte, et l'on pensera dans ce cas à TCP/IP.

2.2.7.6. Conception du *Transmission Control Protocol* (TCP).

Comme nous le précisions ci-dessus, Robert E. Kahn quitta l'entreprise *Bolt, Beranek & Newman Inc.* peu de temps après la fin de l'*International Computer Communication Conference* d'octobre 1972. Répondant ici à l'invitation de Lawrence G. Roberts, le jeune homme intégra les effectifs de l'*Information Processing Techniques Office* de la D.A.R.P.A. en qualité de responsable des projets de réseau SATNET, PRNET et *Packet Voice*. Assez vite, R. E. Kahn commença à travailler sur une nouvelle suite de protocoles de communication qui, commun, devait permettre de connecter ces réseaux spécifiques entre eux et à ARPANET. Pour mener à bien cette tâche, il avait impérativement besoin d'un collaborateur possédant une excellente connaissance des systèmes d'exploitation et des réseaux informatiques. Il trouva ce spécialiste en la personne de Vinton G. Cerf³³⁸. Ancien étudiant de Leonard Kleinrock à U.C.L.A., celui-ci exerçait désormais la fonction de professeur assistant au *Computer Science and Electrical Engineering Department* de la *Stanford University*. Depuis peu il dirigeait également le tout récent *International Network Working Group*. Vinton G. Cerf avait été impliqué dans la conception et le développement du *Network Control Protocol*, le protocole de communication employé sur ARPANET. Son expérience dans le domaine des réseaux était importante et il connaissait assez bien les problèmes que l'interfaçage de différents systèmes d'exploitation pouvait poser dans un pareil cadre de travail. Robert E. Kahn et Vinton G. Cerf étaient si l'on ose dire de vieilles connaissances. En effet, lorsque la société B.B.N. avait délivré le premier *Interface Message Processor* du futur réseau ARPANET au mois d'août 1969, les deux hommes avaient participé ensemble aux phases de tests préliminaires de ce nouvel équipement. A ce moment ils avaient sympathisé et leurs relations professionnelles étaient depuis lors restées excellentes. Fort de tout cela, Robert E. Kahn proposa à Vinton G. Cerf de travailler avec lui au début de l'année 1973. Le démarrage de cette collaboration marqua ainsi les commencements de l'« *Internetting Project* », c'est-à-dire le lancement du projet de mise en réseau des réseaux qui, au fil du temps, est devenu cette structure informatique planétaire que nous connaissons sous le nom d'Internet.

A l'occasion d'une discussion qu'ils eurent ensemble au mois de janvier ou de février 1973, V. G. Cerf se souvient que son ami de la D.A.R.P.A./I.P.T.O. lui présenta ce qui lui faisait alors difficulté en ces termes : « ... *mon problème est de savoir comment procéder*

³³⁸ De 1965 à 1967, c'est-à-dire pendant les deux années qui ont immédiatement suivi l'obtention de son diplôme de mathématiques à l'Université de Stanford, Vinton G. Cerf a travaillé pour la compagnie I.B.M., en tant qu'ingénieur système.

pour faire en sorte qu'un ordinateur connecté à un réseau satellitaire, un ordinateur raccordé à un réseau radio et un ordinateur branché à ARPANET communiquent de manière uniforme les uns avec les autres sans qu'ils se rendent compte de ce qui se passe [entre les réseaux]³³⁹ ».

Etant donné que ces trois réseaux informatiques reposaient sur l'utilisation d'un médium spécifique pour l'acheminement des données, qu'ils mobilisaient des catégories d'équipements hétérogènes, que les logiciels qui assuraient leur fonctionnement différaient, tout comme les contraintes physiques et logiques auxquelles ils devaient individuellement obéir d'ailleurs, l'objectif devait consister ici à définir une méthode globale - un métaprotocole de communication si l'on veut - qui permettrait aux datagrammes en transit de passer d'un réseau à l'autre de façon totalement transparente, c'est-à-dire qui prendrait en charge et garantirait la continuation des communications sans que les ordinateurs hôtes des réseaux concernés n'aient ici à se charger de quoi que ce soit. Bien évidemment ni le *Network Control Protocol* d'ARPANET, ni les protocoles de communication expérimentaux utilisés respectivement sur SATNET et PRNET n'étaient capables de réaliser ce genre d'opérations. Chaque réseau devait cependant conserver ses propres protocoles et ses propres spécificités afin de pouvoir continuer à être exploité indépendamment des autres. L'interconnexion des réseaux devait donc être opérée à un niveau supérieur. Robert E. Kahn et Vinton G. Cerf n'étaient pas les seuls scientifiques qu'intéressait ce thème de recherches. Lors de la *Comsat Corporation Conference* qui eut lieu à L'Enfant Plaza Hôtel (Washington D.C.) au début de 1973, l'*International Network Working Group* tint une de ses premières réunions, jetant par là même les bases futures d'Internet. Pionnier des réseaux informatiques en Norvège, Yngvar Lundh était présent à ce rassemblement. Selon le chercheur scandinave³⁴⁰, une quinzaine de personnes étaient là ce jour parmi lesquelles Peter Kirstein (*University College London*), Louis Pouzin (I.R.I.A.), Roger Scantlebury³⁴¹ (*National Physical Laboratory*), Gesualdo Lemoli (*Politecnico di Milano*), Dick Binder (B.B.N.), Vinton G. Cerf (U.C.L.A.) et Robert E. Kahn (D.A.R.P.A./I.P.T.O.). De fait s'il était possible de concevoir une méthode à la fois élémentaire et universelle capable d'autoriser l'interconnexion de réseaux informatiques aussi technologiquement disparates que pouvaient l'être PRNET, ARPANET et SATNET, alors pour les mêmes raisons, celle-ci pourrait également servir à relier entre eux les réseaux qui

³³⁹ In [Hafner, Lyon, 1998], 223. La traduction de ce passage est nôtre.

³⁴⁰ Yngvar Lundh, courrier électronique à Ronda Hauben, 26 avril 2002. Cité dans Ronda Hauben, *The Internet: On its International Origins and Collaborative Vision (A Work In Progress)*. Document consultable en ligne à l'adresse suivante : <http://www.ais.org/~jrj/acn/ACn12-2.a03.txt>.

³⁴¹ Y. Lundh évoque aussi la possible présence de Donald Davies, sans toutefois se trouver en mesure d'affirmer de façon absolument certaine que le savant britannique était bel et bien là.

avaient été mis en place dans les pays représentés ici. Selon Y. Lundh : « ...les discussions étaient plutôt d'ordre général et pour autant que je m'en souviens, elles consistèrent principalement à clarifier les raisons [nous poussant à] établir un réseau de réseaux, où chaque réseau individuel emploierait le meilleur protocole de bas niveau pour l'utilisation des transmissions respectives³⁴² ».

A partir du début de l'année 1973, cette collaboration internationale tendit à se renforcer. Cette montée en puissance devait tout particulièrement concerner les rapports qui existaient entre Robert E. Kahn, Vinton G. Cerf et les français Louis Pouzin et Gérard Lelan. A l'invitation de V. G. Cerf, ce dernier séjourna ainsi pendant une année entière à l'Université de Stanford, faisant par là même bénéficier les américains de toute l'expérience acquise lors de la construction du réseau CYCLADES. C'est au cours de cette période que Kahn et Cerf imaginèrent certains des dispositifs et concepts qui permirent au réseau des réseaux d'exister. Le premier de ces concepts fut le « Gateway » (un terme que l'on peut traduire par « passage » ou encore « passerelle » en français). D'après les souvenirs de V. G. Cerf l'idée du Gateway, « un ordinateur de routage installé entre les différents réseaux afin de faire passer les messages d'un système à un autre³⁴³ » et celle du *Transfert Control Protocol* (il s'agissait encore d'une forme très élémentaire de T.C.P.) ont été pour la première fois exprimées par lui et R.E. Kahn pendant le mois de mars 1973. Les deux hommes prirent le soin de matérialiser ces idées au moyen d'un diagramme (voir figure ci-dessous). En apparence relativement simple, le principe de la passerelle était en réalité plus difficile à réaliser qu'il n'y paraissait de prime abord. Ainsi :

« Nous [Kahn et Cerf] savions que nous ne pouvions modifier les paquets des réseaux eux-mêmes. Ils faisaient ce qu'ils faisaient car ils étaient optimisés pour cet environnement [...] Clairement notre conviction était que chaque passerelle devait savoir comme parler à chaque réseau auquel elle se trouvait reliée. Disons que vous avez connecté un réseau radio à paquets à ARPANET. La machine passerelle est équipée de logiciels qui la fait passer pour un hôte aux yeux des I.M.P. d'ARPANET. Mais elle a également l'apparence d'un hôte sur le réseau radio à paquets³⁴⁴ ».

³⁴² Ronda Hauben, *The Internet: On its International Origins and Collaborative Vision (A Work In Progress)*. Document consultable en ligne à l'adresse suivante : <http://www.ais.org/~jrh/acn/ACn12-2.a03.txt>.

³⁴³ In [Hafner, Lyon, 1998], 223. La traduction de ce passage est nôtre.

³⁴⁴ *Ibidem*, p. 223-224.

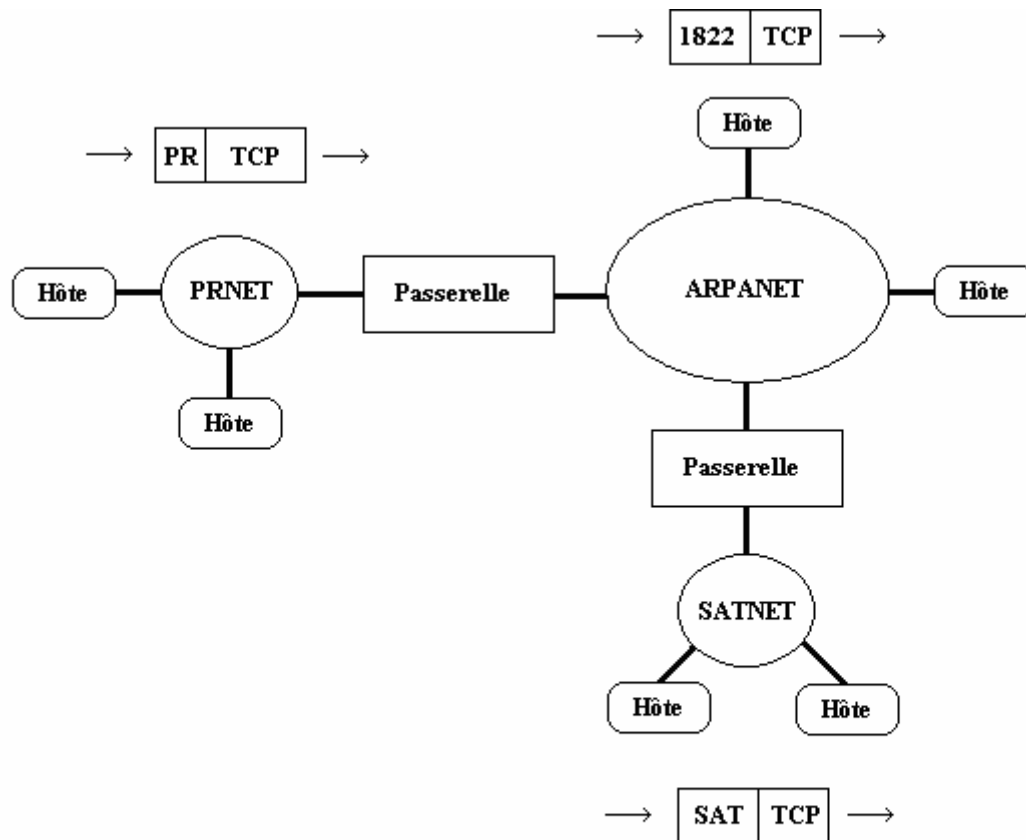


Fig. 17: un des premiers diagrammes présentant l'architecture du réseau reliant les réseaux PRNET, SATNET et ARPANET. On remarquera ici le rôle central joué par ARPANET, et la présence des passerelles qui assurent la continuité de la communication entre les réseaux. D'après un dessin reproduit dans K. Hafner et M. Lyon, *Where Wizards Stay Up Late, the Origins of the Internet*, New York, Touchstone Editions, 1998, p 224.

On aura aisément compris que les *Gateways* étaient des systèmes informatiques spécialement programmés pour jouer le rôle d'interface traductrice entre les réseaux d'ordinateurs auxquels ils étaient simultanément raccordés. Ces machines dédiées se comportaient comme de véritables Janus informatiques. Dans l'hypothèse où l'une d'entre elles, G_{R1-R2} , aurait été connectée à deux réseaux $R1$ et $R2$, alors G_{R1-R2} aurait présenté pour $R1$ « l'apparence » et les fonctionnalités d'un de ses systèmes hôtes typiques, et il en aurait été exactement de même pour $R2$. Si $R1$ et $R2$, à cause de leurs multiples différences structurelles et fonctionnelles, étaient dans l'absolue impossibilité de communiquer ensemble *directement*, la présence, entre eux, d'un équipement G_{R1-R2} n'appartenant ni l'un ni à l'autre, mais qui serait capable 1°) de les « comprendre » parfaitement tous les deux et 2°) d'être tout aussi parfaitement reconnu et « compris » par eux deux, permettait de lever totalement cette restriction. Demeurait encore la question du protocole de communication qui permettrait au système informatique interfaçant deux réseaux individuels d'être identifiés par chacun d'entre eux comme une machine hôte (quel que soit bien sûr le « côté » considéré), de comprendre leurs « langages » respectifs – de quelle manière et sous quelle configuration chacun

transmettait-il ses propres paquets de données ? - et de jouer pour eux le rôle d'un « traducteur » infaillible. Spécialistes de l'histoire de l'informatique, les américains Katie Hafner et Matthew Lyon ont présenté la situation à laquelle R. E. Khan et V. G. Cerf étaient alors confrontés dans les termes suivants :

« La notion de passerelle étant désormais définie, le problème suivant résidait dans la transmission par paquets. Comme avec ARPANET, le chemin réel que les paquets devraient emprunter sur un réseau de réseaux [internet] devrait être immatériel. Ce qui importait le plus était que les paquets arrivent intacts [à leur destination]. Mais il y avait un problème contrariant : tous ces réseaux – paquets radio [PRNET], SATNET et ARPANET - avaient des interfaces, des tailles maximales de paquets et des fréquences de transmission différentes. Comment toutes ces différences pouvaient-elles être standardisées afin d'autoriser le transport des paquets sur tous ces réseaux ? Un second problème concernait la fiabilité des réseaux. Les dynamiques propres des transmissions par radio et satellites faisaient qu'il ne serait pas possible d'atteindre le niveau de fiabilité qui avait été si laborieusement « construit » dans ARPANET³⁴⁵».

Il fallait donc réussir à mettre au point ici quelque chose qui puisse s'accommoder de toutes ces disparités, de toutes ces spécificités techniques, de toutes ces règles de fonctionnement particulières, sans que les facteurs de fiabilité et de précision forcément requis pour toute opération de transit de données informatiques sur des distances courtes, moyennes et longues ne soient affectés négativement. Unanimement considérés comme les pères fondateurs d'*Internet*, Vinton G. Cerf et Robert E. Kahn reconnaissent fort volontiers la dette qu'ils ont contractée envers Louis Pouzin, Hubert Zimmerman et Gérard Lelan eu égard à la solution qu'ils ont été capables d'apporter à ce problème précis. Ainsi, d'après Cerf :

« ... plusieurs personnes ont eu de l'influence sur le design [de TCP]. Bob [Robert E. Kahn] et moi-même avons passé beaucoup de temps à travailler sur divers concepts et nous avons écrit cet article en 1974. Mais j'ai eu aussi beaucoup de contacts avec Hubert Zimmerman et Louis Pouzin qui avaient réalisé des expériences à l'INRIA, on l'appelait IRIA à cette époque, sur la commutation par paquets. Ils avaient développé un système qu'ils avaient appelé CYCLADES et le réseau sous-jacent était dénommé CIGALE. C'était un

³⁴⁵ *Ibidem*, p. 224.

réseau qui fonctionnait uniquement avec des datagrammes. Les idées de Pouzin sur les techniques de fenêtrage me paraissaient extrêmement intéressantes et je les ai intégrées dans le design initial de TCP³⁴⁶ ».

Un autre élément technologique que le *Transmission Control Protocol* hérita du mode opératoire caractérisant le réseau CYCLADES était la prise en charge, par les systèmes hôtes de la structure réticulaire et non plus par ses *Interface Message Processors*, des opérations de récupération des erreurs de transmission. Cette propriété fut donc aussi implémentée dans T.C.P. Durant le second semestre 1973 V. G. Cerf coucha sur le papier les premières spécifications du protocole T.C.P. Ces travaux préliminaires prirent la forme d'un brouillon d'article intitulé « A Partial Specification of an International Transmission Protocol ³⁴⁷ », dont un exemplaire fut adressé à Robert E. Kahn, Eric M. Aupperle (Université du Michigan), Alex McKenzie (B.B.N. / I.N.W.G.), Robert Metcalfe (Xerox P.A.R.C.), Roger A. Scantlebury (N.P.L.), David C. Walden (B.B.N., I.N.W.G.) et Henri Zimmerman (I.R.I.A.). Les discussions et les séances de réflexions réunissant Kahn, Cerf, et les scientifiques de l'*International Network Working Group* se poursuivirent jusqu'au mois de mai 1973 avec en point d'orgue une première présentation générale, devant les membres de l'I.N.W.G., de l'avancée de ces recherches lors d'un symposium à l'Université du Sussex (Angleterre) en septembre 1973. Progressivement ces sessions de travail conduisirent à des modifications et des perfectionnements des esquisses premières du nouveau protocole de communication avant de finalement déboucher, en mai 1974, sur la parution aux *International Electrical and Electronic Engineering Transactions on Communication* d'un article signé par R. E. Kahn et V. G. Cerf. Portant le titre suivant, « A Protocol for Packet Network Intercommunication ³⁴⁸ » ce dernier présentait et documentait pour la première fois le *Transmission Control Protocol*. Les auteurs présentaient en les décrivant très exactement les concepts liés d'encapsulation et de datagramme (ils parlaient ici de *TCP Messages*), et aussi la notion de passerelle (*Gateway*). Ils évoquaient également la méthode du fenêtrage et la technique consistant à confier aux ordinateurs hôtes du réseau, ou plutôt des réseaux, les fonctions de sécurisation de

³⁴⁶ In *Smithsonian Oral and Video Histories, Oral History Interview with Vinton G. Cerf*, Entretien avec Judy O'Neill (*Charles Babbage Institut*, Université du Minnesota), 24 avril 1990. La transcription de ce document peut être consultée sur ce site : <http://americanhistory.si.edu/collections/comphist/vc1.html#net>.

³⁴⁷ Vinton G. Cerf, « A Partial Specification of an International Transmission Protocol », *First Pass Draft of International Transmission Protocol*, Article non publié, 1973. Ce document (PDF) consultable sur le site de l'Université du Texas à Austin : http://www.cs.utexas.edu/users/chris/DIGITAL_ARCHIVE/TCPIP/Cerf.pdf

³⁴⁸ Vinton G. Cerf, Robert E. Kahn, « A Protocol for Packet Network Intercommunication », in *I.E.E.E. Transactions on Communication*, Vol. Com. 22, n° 5, mai 1974. Article consultable et téléchargeable au format PDF à l'adresse suivante : <http://www.ics.uci.edu/~xwy/ics243c-s06/papers/ck74.pdf>.

l'acheminement des messages TCP et leur récupération en cas de perte ou d'altération des données contenues dans les datagrammes. Toutes ces méthodes étaient directement dérivées de celles que Louis Pouzin et son équipe avaient conçues dans le cadre du projet CYCLADES³⁴⁹. Vinton G. Cerf a résumé comme suit les grands principes de fonctionnement de T.C.P. :

« ... Si un datagramme ne parvenait pas à destination ou était déformé durant la transmission, et que le [système] hôte expéditeur ne recevait aucun message de bonne réception, une copie [de ce même datagramme] était expédiée... Nous nous sommes concentrés sur une fiabilité [de type] extrémité-extrémité. [Nous] ne nous appuyons sur rien dans ces réseaux. La seule chose que nous demandions au réseau était de prendre une séquence de bits et de le faire traverser. C'est tout ce que nous [lui] demandions. Prends juste ce datagramme et fais de ton mieux pour le conduire à bon port.

En filant une analogie empruntée à K. Hafner et M. Lyon, on pourrait dire ici que les messages T.C.P. sont aux réseaux informatiques ce que les containers peuvent être au domaine des transports. Si l'on est d'accord pour s'en tenir à une description physique sommaire un container peut être défini comme une grande boîte extrêmement solide, de dimensions standardisées, qui est potentiellement susceptible de contenir toutes sortes de biens matériels pourvus seulement que ceux-là soient plus petits qu'elle. Une fois chargé et fermé il n'est rien qui ressemble plus à un container qu'un autre container. Il suffit pour se convaincre définitivement de cela de n'observer qu'une seule fois une grande zone de stockage portuaire. Devenu temporairement inaccessible – en fait pendant toute la durée du transport – son contenu désormais n'importe plus. La particularité des containers est qu'ils peuvent successivement, et sans considération d'ordre aucun, voyager par voie maritime (ou fluviale), par chemin de fer et route. Les containers sont conçus de telle manière qu'ils peuvent être chargés sur un bateau, un camion ou un train sans qu'il soit besoin de leur faire subir à chaque fois une ou plusieurs modifications structurelles. La seule chose, ici, qui revêt un caractère véritablement fondamental est la compatibilité bimodale des équipements spéciaux qui permettent de transférer les containers d'une catégorie de plateforme de transport à une autre. Les fleuves, les mers et les océans (voies maritimes), les routes et les autoroutes,

³⁴⁹ Dans leur article « A Protocol for Packet Network Intercommunication », Cerf et Kahn font ouvertement référence au réseau CYCLADES (p. 7). Dans la partie consacrée aux remerciements, le nom de Louis Pouzin apparaît mentionné aux côtés de ceux de R. Metcalfe, R. Scantlebury, D. Walden.

les voies ferroviaires, représentent pour l'homme autant de vecteurs possibles pour l'acheminement de ses marchandises. Il est d'usage de se référer à ces différents modes de transport en parlant de réseau (réseau routier, réseau ferroviaire, réseau maritime, fluvial...). Si maintenant l'on transpose ces différents éléments et concepts dans le domaine des communications informatiques telles que les pensaient V. G. Cerf, R. E. Kahn et les autres membres de l'*International Network Working Group*, alors on peut dire que les réseaux ferroviaires, maritimes et routiers correspondent aux différents types de grands réseaux informatiques (ARPANET, SATNET, PRNET) qui existaient aux U.S.A. durant les années 70, que les containers sont équivalents aux datagrammes (ou messages T.C.P.) transitant sur ces réseaux, et que les équipements de chargement et de déchargement qui permettent de transférer les containers d'un moyen de transport à un autre peuvent être comparés aux dispositifs passerelles installés à l'interface des réseaux informatiques.

Définissant un format de datagramme spécifique, un mode d'adressage capable de supporter jusqu'à 4 milliards de machines hôtes et aussi un mécanisme de contrôle de flux et de détection/correction d'erreurs, la suite de protocoles de communication T.C.P. représentait la clef, avec les ordinateurs interfaces/passerelles bien sûr, de la transformation d'ARPANET en une méta structure informatique totalement ouverte et extensible. Jusqu'à ce point le réseau de la *Defense Advanced Research Projects Agency* avait été un grand réseau expérimental en constante évolution. Pourtant il avait beau eu gagner en extension tout en voyant son nombre de systèmes hôtes croître quasiment sans discontinuer, il n'en était pas moins demeuré clos sur lui-même. Grâce à T.C.P. qui garantissait son ouverture et sa compatibilité avec d'autres constructions informatiques réticulaires, ARPANET disposait à présent de toutes les capacités nécessaires pour devenir un réseau de réseaux.

2.2.7.7. ARPANET change de mains, les « Killer Applications » FTP, TELNET et MAIL, spécification de TCP/IP, création d'Internet.

Entre les derniers mois de l'année 1973 et la fin de l'année 1975, le milieu des réseaux informatiques américains fut marqué par divers évènements de toute première importance. Tout d'abord, après que Lawrence G. Roberts ait quitté la D.A.R.P.A. pour rejoindre la société *Bolt, Beranek et Newman* et y diriger le projet TELENET, la présidence de l'*Information Processing Techniques Offices* revint à celui qui en avait été à la fois le

fondateur et le premier directeur, Joseph C. R. Licklider³⁵⁰. Au moment où J. C. R. Licklider reprit la direction de l'I.P.T.O., la situation dans laquelle le bureau des techniques de traitement de l'information de la D.A.R.P.A. se trouvait était relativement inconfortable. Certes l'I.P.T.O. n'avait que des raisons tout à fait légitimes de se féliciter de la réussite de sa réalisation technologique majeure, ARPANET. En l'espace d'une demie décennie à peine le réseau expérimental dont l'essentiel des techniques logicielles et une partie non négligeable des équipements clefs (*Interface Message Processor*, passerelles) avaient été créés ex-nihilo ou presque, était devenu l'outil de partage de ressources informatiques le plus puissant et le plus étendu de la planète. Dans les années 73-74, le rythme de croissance d'ARPANET se montait en moyenne à un nouveau nœud par mois (le coût unitaire de chaque connexion supplémentaire au réseau se montant quant à lui à environ un quart de million de dollars de l'époque). Au fur et à mesure que l'extension d'ARPANET se poursuivait et que ses ramifications gagnaient en densité, sa complexité augmentait, de la même façon que tendaient à le faire la fréquence, le nombre et la difficulté des divers problèmes posés par son exploitation. Il n'avait jamais été dans les intentions des dirigeants de la D.A.R.P.A. d'administrer le réseau informatique expérimental qu'elle avait si largement contribué à créer et à mettre en place depuis les années 1967-68. En effet l'agence du ministère de la défense américain avait toujours fermement souhaité demeurer fidèle à sa mission première et à celle-là seulement, à savoir assurer le financement de projets de recherche avancée liés au secteur de la défense. Compte tenu de tous ces éléments, la D.A.R.P.A. était disposée à confier la responsabilité de la gestion opérationnelle d'ARPANET à un tiers privé dès 1972. Toutefois les conséquences dont nous venons de faire mention ne furent pas les seules répercussions que la montée en puissance d'ARPANET – une ascension réellement formidable tant du point de vue de sa rapidité que de celui de son intensité - entraîna aux Etats-Unis.

La fin des années soixante et le début des années soixante-dix vit naître en Amérique du Nord un mouvement contestataire radical qui, sur fond d'insondable borbier vietnamien, de crise Khmer au Cambodge, et de main mise sur les sociétés civile, médiatique, politique et économique, par le complexe militaro-industriel et l'U.S. *Department of Defense*, commença à s'organiser et à lutter contre le pouvoir en place en recourant aux mêmes technologies avancées que ce dernier – c'est-à-dire les systèmes informatiques et plus particulièrement les ordinateurs raccordés à ARPANET – pour poursuivre ses propres fins politiques. Les

³⁵⁰ Entre le départ de L. G. Roberts de l'I.P.T.O. (à la fin de l'année 1973) et l'arrivée de J.C.R. Licklider à sa tête (en janvier 1974), il s'écoula une période de quelques mois. Au cours de celle-ci la direction du bureau des techniques de traitement de l'information fut provisoirement assurée par Robert E. Kahn.

principaux foyers d'agitation se situaient sur les campus, l'Université de Californie à Berkeley constituant ici très certainement l'épicentre de la dynamique protestataire nationale. L'intensité et la persistance de ces troubles, leur impact croissant sur l'opinion publique, la portée et l'acceptation grandissantes du message pacifique dans la société civile déterminèrent les autorités américaines – Pentagone en tête – à démarrer de manière on ne peut plus discrète – en tous cas le croyait-on – un programme de surveillance à large échelle destiné à recueillir et à centraliser un maximum d'informations personnelles au sujet des individus impliqués dans le mouvement pacifiste. Cette campagne anticonstitutionnelle fut menée plusieurs années durant par les représentants de l'armée, d'abord sous l'administration Johnson, puis sous le gouvernement Nixon. Toutes les données sensibles rassemblées par les militaires étaient aussitôt mises sous la forme de fichiers informatiques. Selon toutes vraisemblances ces fichiers étaient ensuite enregistrés à fins de stockage et d'exploitation sur les ordinateurs de l'*U.S. Army Intelligence Command Headquarters* à Fort Holabird, dans l'état du Maryland. En 1970-71 cependant la situation tourna brutalement au désavantage de l'armée. Des informations commencèrent à filtrer dans les médias quant au fait que l'armée, de manière totalement illicite, était en possession de fichiers informatisés secrets contenant des informations sur un nombre important d'activistes politiques (en règle générale ceux-là étaient plutôt jeunes, de gauche, pacifistes et anti-racistes). Afin de rassurer l'opinion publique et de prévenir le durcissement des actions contestataires que l'annonce d'une telle nouvelle aurait parfaitement pu entraîner, les plus hautes instances politiques ordonnèrent que soit détruite sans délai la totalité des fichiers détenus illégalement par l'armée. Grâce au caractère radical de cette mesure de suppression et aussi à l'immédiateté de sa mise en oeuvre, les politiques parvinrent à contenir les tensions sociales et à limiter la portée du scandale public. Les choses rentrèrent ensuite progressivement dans l'ordre (pour autant que cela ait été possible à l'époque et pour quelques temps seulement).

Cinq ans plus tard des bruits commencèrent à nouveau à filtrer dans la presse américaine³⁵¹, qui émanaient de différentes sources. Certains des informateurs avec lesquels les journalistes qui les avaient relayés se trouvaient en contact étaient selon toutes vraisemblances d'anciens officiers du renseignement militaire. Ces derniers prétendaient qu'en lieu et place d'avoir procédé à la destruction pure et simple des fichiers confidentiels stockés sur les machines de Fort Holabird, ainsi qu'il avait été formellement ordonné par les autorités, les personnels militaires en charge de l'opération de suppression les avaient

³⁵¹ Un article fut par exemple consacré à ce sujet par Norman D. Sandler et Mike McNamee dans l'édition du 11 avril 1975 (Vol. 95, n°17) du journal *The Tech*, l'organe du *Massachusetts Institute of Technology*.

seulement escamotés, n'en annihilant en réalité et pour la forme qu'une partie infime et fort peu utile. Quelques temps après cela – la période avancée ici par les journalistes correspond à celle du mois de janvier 1972 – les fichiers « fantômes » furent discrètement transférés par les militaires sur les systèmes informatiques du quartier général de la *National Security Agency*³⁵², laquelle était encore à l'époque l'agence de renseignement la plus secrète et la mieux protégée de la planète. Or cette procédure de transfert, ainsi que l'affirmaient les journalistes et tous ceux qui soutenaient cette thèse, avait été rendue possible grâce à l'utilisation du réseau ARPANET³⁵³.

En 1975 l'informatique n'était certes plus une nouveauté pour le grand public. Les gens, peu à peu, s'étaient habitués à travailler et à cohabiter avec ces machines étranges et étonnantes qu'une trentaine d'années plus tôt, on leur avait présentées comme des cerveaux électroniques enfantés dans le secret des laboratoires militaires. Cependant ARPANET était très loin de leur être aussi familier que les multiples systèmes informatiques qui en participaient. Le scandale qu'occasionna le présumé transfert des fichiers informatiques constitués et conservés illégalement par les militaires américains révéla soudainement aux yeux des masses l'existence d'un grand réseau informatique dont la conception et la construction avait été intégralement financée avec les fonds de la D.A.R.P.A., une agence gouvernementale directement rattachée à l'U.S. *Department of Defense*. Dans une Amérique déjà en proie à de très sérieux troubles sociétaux et politiques – le scandale du Watergate était rappelons-le venu s'ajouter à la crise Cambodgienne, au coup d'Etat de Pinochet au Chili et à un conflit vietnamien que les Etats-Unis avaient d'ores et déjà perdu – l'annonce qu'il existait dans le pays un vaste réseau informatique reliant les centres de recherche les plus prestigieux et des organismes tels que la *RAND Corporation*, la *MITRE Corporation* et le Pentagone, un réseau que, supposément, les forces armées avaient employé afin de transférer des fichiers normalement détruits depuis plusieurs années et qui contenaient des informations sur un très grand nombre de citoyens américains, ne contribua évidemment en rien à arranger une situation sociale déjà passablement dégradée. La confiance que la population des Etats-Unis nourrissait envers ses gouvernants et tous ceux qui étaient censés la protéger (qu'il s'agisse des forces armées ou des services de renseignement intérieurs et extérieurs), cette confiance donc se trouvait déjà très sérieusement érodée par tout ce qui s'était déjà passé au cours de la quinzaine d'années précédente. Tout au long de cette période les principes de la démocratie s'étaient vus régulièrement foulés aux pieds au nom des intérêts tout-puissants de la défense

³⁵² Le Q.G. de la N.S.A. se trouvait également dans le Maryland, à Fort Meade.

³⁵³ Des personnels du M.I.T. auraient pris part à cette manipulation.

nationale. En parallèle l'armée, mais aussi la *Central Intelligence Agency* et la *National Security Agency* avaient mobilisé les technologies informatiques et électroniques les plus coûteuses et les plus abouties de l'époque pour conduire (parfois) des opérations intérieures et extérieures de la façon la plus opaque qui se pouvait certainement imaginer. Dans de pareilles conditions la « révélation » par la presse de l'existence d'un réseau d'ordinateurs financé par le gouvernement et les militaires ne fit qu'ajouter à la lourdeur sociale ambiante. ARPANET était une sorte de Big Brother informatique couvrant silencieusement et dans son intégralité le territoire des Etats-Unis. En raison de sa puissance et de son caractère omniprésent, le réseau représentait une menace sans précédent pour les libertés individuelles. Comme l'a remarqué Philippe Breton : « *Tout cela, pour beaucoup d'Américains, semblait contraire à la nature même de cette technologie qui devait permettre, comme Wiener l'avait souhaité, l'avènement d'une société de communication, transparente et pacifique*³⁵⁴ ».

Or si la communication était parfaitement au rendez-vous, ni la transparence, ni le pacifisme désirés par le mathématicien et qui devaient selon lui accompagner l'avènement de l'informatique dans la société, ne l'étaient. Suite à ces révélations journalistiques, une commission sénatoriale spéciale fut créée afin d'entendre les hauts responsables de la *Defense Advanced Research Projects Agency* quant à la façon dont ARPANET était exactement employé par ceux qui y étaient connectés. L'examen des centaines de sorties de Télétypes récupérées chez B.B.N. et au M.I.T., lesquelles contenaient l'historique des connexions sur le réseau pour la période concernée, permit de démontrer que les fichiers informatiques soi-disant détenus de façon clandestine par l'armée puis par la N.S.A. n'avaient *jamais* transité sur ARPANET. Les accusations qui pesaient sur la D.A.R.P.A. furent en conséquence levées, mais dans l'opinion, le sentiment qui voulait que le gouvernement et ses agences se livraient en secret à des agissements anti-démocratiques - orwelliens pour les nommer autrement - en s'appuyant sur la puissance de l'outil informatique, se trouva grandement renforcé.

Ce faisceau d'évènements et sa visibilité médiatique poussèrent l'armée, et plus particulièrement la D.A.R.P.A., à faire effectivement ce qu'elles projetaient de faire depuis l'année 1972, c'est-à-dire à se désengager du projet ARPANET. Toutefois le Département de la Défense ne désirait pas perdre toute capacité de contrôle sur le réseau. Avec son extension et son internationalisation croissantes, l'intérêt stratégique que celui-ci pourrait revêtir un jour restait encore à déterminer. Dans l'expectative, la plus grande prudence était de rigueur et imposait que l'*U.S Department of Defense* gardât encore la mainmise sur ARPANET. La

³⁵⁴ In [Breton, 1990], p. 231.

responsabilité du réseau qui relevait jusqu'ici des compétences de la D.A.R.P.A. fut par conséquent transférée à la *Defense Communications Agency*³⁵⁵ – la même agence à laquelle Paul Baran avait refusé de confier son projet une dizaine d'années plus tôt - au mois de juillet 1975. Après quelques péripéties émaillées de moment passablement contradictoires, le contrat portant sur l'exploitation opérationnelle d'ARPANET fut attribué à la *Bolt, Beranek & Newman Inc.* Moments quelque peu contradictoires parce que la B.B.N. qui avait été longtemps l'employeur de J.C.R. Licklider³⁵⁶ se refusait à présent obstinément à communiquer le code source des *Interface Message Processor* (et celui des T.I.M.P.). Or la possession de ces données système que la B.B.N. avait mises au point avec des fonds gouvernementaux – en d'autres termes elles ne lui appartenaient pas - était absolument nécessaire à quiconque recevrait la charge de l'exploitation et de la maintenance d'ARPANET. Pour rendre compte du fait que la B.B.N. refusait de confier à un tiers ces données réseau stratégiques on peut avancer trois explications au moins. La première que l'on qualifiera d'officielle, était celle que la société d'ingénierie avançait elle-même. Elle consistait à prétendre que le code informatique dont la D.A.R.P.A. demandait la communication était sujet à de très fréquentes opérations de remaniement (débugage, mises à jour). Le caractère inabouti et transitoire du logiciel des I.M.P. interdisait par conséquent à son concepteur de le diffuser puisque aussitôt distribué, il serait sans doute déjà frappé d'obsolescence. La réputation de la *Bolt, Beranek & Newman Inc.* n'aurait pu qu'en souffrir, bien évidemment.

Il est parfaitement possible que cette explication produite par la B.B.N. pour légitimer sa conduite ait comportée une certaine part de vérité. Cependant cela n'exclut pas le fait que l'on peut rendre compte de la posture de résistance adoptée ici par la société d'ingénierie de deux autres manières encore, plus officieuses celles-là. Ainsi et pour commencer, il est évident que la possession exclusive du code source des I.M.P. plaçait la *Bolt, Beranek & Newman* en position de force – de quasi monopole dirons-nous - vis-à-vis d'ARPANET et de la D.A.R.P.A. C'était un peu comme occuper une place forte militaire lourdement pourvue en moyens d'artillerie, qui, sise au sommet d'une proéminence surplombant un détroit stratégique, aurait permis d'exercer un absolu contrôle sur le trafic maritime local. Les *Interface Message Processors* représentaient en effet des composants absolument essentiels du réseau. Tant que leur maître d'œuvre se refusait à faire la pleine lumière sur les

³⁵⁵ Au mois de juin 1991, la *Defense Communications Agency* a été rebaptisée *Defense Information Systems Agency*.

³⁵⁶ Nous nous souvenons qu'avant d'avoir été Directeur de *L'Information Processing Techniques Office*, J.C.R. Licklider avait occupé le poste de vice-président de la *Bolt, Beranek e& Newman Inc.* (de 1957 à 1962).

programmes qui assurait leur fonctionnement, la D.A.R.P.A. et, à travers elle, le *Department of Defense*, ne possédaient donc pas la pleine maîtrise de la méta structure informatique qu'ils avaient pourtant intégralement financée. Ensuite il convient certainement de rappeler à ce point que la *Bolt, Beranek & Newman* s'apprêtait à la même époque à lancer une version publique et commerciale d'ARPANET baptisée TELENET. Pour diriger la *TELENET Communications Corporation*, sa filiale en charge de la gestion et de l'exploitation de ce nouveau réseau informatique à commutation par paquets, on se souvient qu'en mars 1973 le Président de la B.B.N. était parvenu à débaucher Lawrence G. Roberts, le prédécesseur de J.C.R. Licklider à la tête de l'I.P.T.O. En plus, donc, de « verrouiller » ARPANET grâce à son refus de dévoiler le code source des I.M.P. à la D.A.R.P.A., la société d'ingénierie possédait des compétences hors norme en matière de technologie réseau et disposait désormais au sein de ses effectifs de certains des hommes qui avaient exercé le plus d'influence dans le processus d'élaboration d'ARPANET. La convergence plutôt intéressante pour les affaires en devenir de la *Bolt, Beranek & Newman*, de ces trois facteurs, peut laisser à penser qu'il ne s'agissait pas nécessairement ici d'une coïncidence.

En fin de compte, un chantage financier exercé par la D.A.R.P.A. eut raison du manque criant de coopération manifesté ici par la B.B.N. A l'époque, la somme d'argent que la *Bolt, Beranek & Newman* gagnait annuellement grâce aux différents contrats de recherche et de développement qui la liaient à la *Defense Advanced Research Projects Agency* se montait en effet à six millions de dollars. Ce montant substantiel représentait environ un quart des revenus de la société. La menace brandie par la D.A.R.P.A., de dénoncer l'ensemble des contrats passés avec la B.B.N. pour les confier ensuite à d'autres compagnies de R&D ou à des laboratoires universitaires de recherche eut donc tôt fait de ramener ses dirigeants à la raison, en résolvant du même coup ce qui pourrait fort bien avoir été une des premières affaires de spoliation – ou à tout le moins de confiscation temporaire - de la propriété intellectuelle sur un réseau informatique. Une fois la situation débloquée – cela se produisit au cours du mois de juillet 1975 - la gestion d'ARPANET passa sous la juridiction de la *Defense Communications Agency*. Dans le même temps une *Bolt, Beranek & Newman Inc.* ramenée à plus de docilité par le spectre de réductions budgétaires radicales, vit son contrat de maintenance opérationnelle du réseau conforté dans ses termes. Simple exécutant, la B.B.N. devrait désormais se contenter d'appliquer les décisions prises par les responsables de la D.C.A.

Au mois de janvier 1975, ARPANET comptait plus de soixante nœuds différents. Quant au nombre des utilisateurs réguliers du réseau dans les universités, les agences

gouvernementales, les centres de recherches et les administrations civiles ou militaires, ils n'avaient eu de cesse d'augmenter spectaculairement depuis son entrée en service.

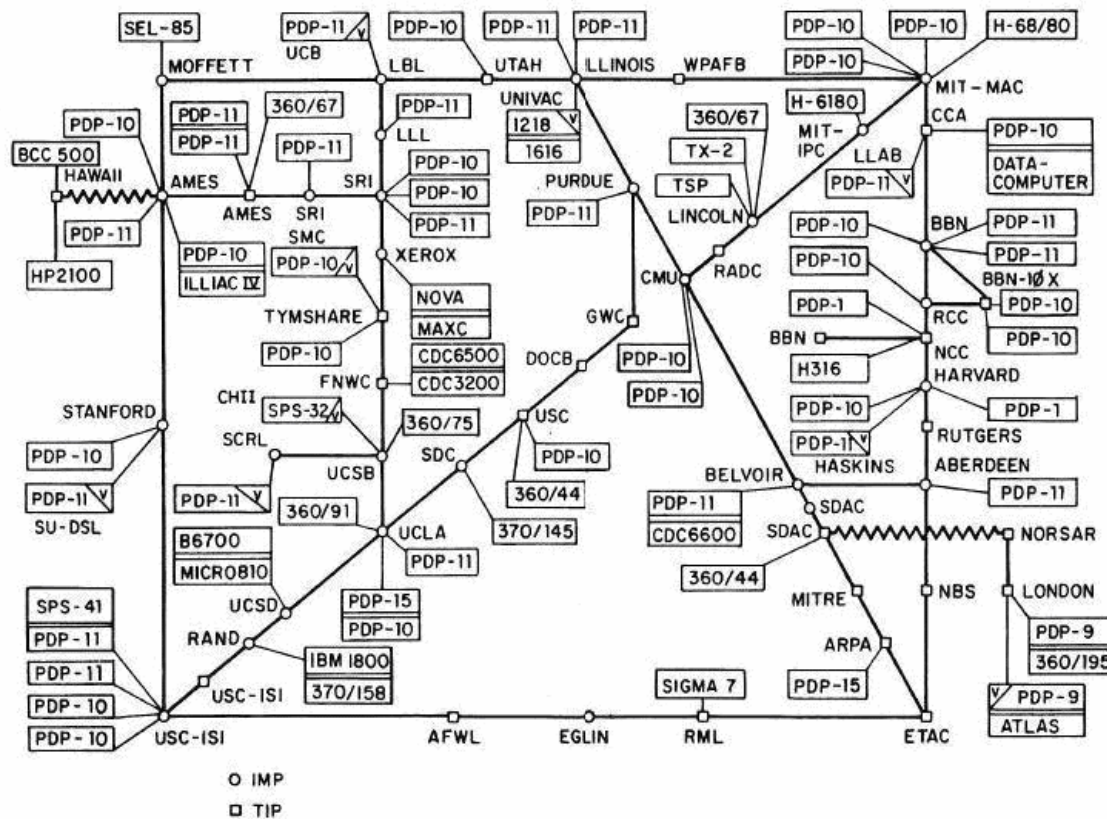


Fig. 18: topologie logique du réseau ARPANET, au mois de janvier 1975. Alors que la D.A.R.P.A. se préparait à transférer l'administration du réseau à un tiers, ARPANET comptait déjà une vingtaine de nœuds. D'après F. Heart, F. McKenzie, J. McQuillan, et D. Walden, *ARPANET Completion Report, Technical Report #4799*, Bolt, Beranek et Newman Inc., Burlington, 4 janvier 1978, p. 202.

Au cours de la première moitié des années 70 l'introduction de nouvelles applications réseau contribua très largement à accroître la fréquentation d'ARPANET. Ces logiciels devinrent si extraordinairement populaires en un laps de temps si réduit que la communauté des informaticiens en vint tout aussi rapidement à leur donner le nom d'« applications tueuses³⁵⁷ ». Entre 1970 et 1975, trois de ces « Killer Apps » firent leur apparition : FTP (*File Transfer Protocol*), TELNET (TERminAL NETwork) et SNDMSG³⁵⁸/READMAIL. Le premier de ces logiciels réseau, FTP, avait vu le jour au *Massachusetts Institute of Technology*, dans le cadre du projet M.A.C., dans les années 1968-69. Abhay K. Bhushan, son développeur au M.I.T., avait mis au point ce logiciel afin de permettre aux utilisateurs de deux de ses

³⁵⁷ Soit en anglais « Killer Applications ». Les informaticiens, dans leur jargon, parlent volontiers de « Killer Apps » à leur sujet.

³⁵⁸ SNDMSG : pour « SeND MeSsaGe », c'est-à-dire littéralement « envoyer message »

systèmes configurés en réseau – en l'occurrence ces machines était un *General Electric 645* opérant sous *Multics* et un D.E.C. P.D.P.-10 – de déplacer et plus largement de manipuler (c'est-à-dire de copier, de transférer, de supprimer, de modifier, etc.) des fichiers informatiques. Le *File Transfer Protocol* fut documenté pour la première fois par A. K. Bhushan dans la *Request for Comments* #114, le 16 avril 1971. Comme bon nombre d'applications du même genre, F.T.P. évolua considérablement au fil des années. Oeuvrant ici de concert avec les membres du *Network Working Group*, A. K. Bhushan apporta des modifications au protocole de transfert de fichiers de manière à ce que ce dernier puisse fonctionner sur un réseau à commutation par paquets. Les R.F.C. #172 (éditée en juin 1971) et R.F.C. # 265 (éditée en novembre 1971), introduisirent par la suite quelques nouveautés mineures jusqu'à ce que la *Request for Comments* #354, éditée au mois de juillet 1972, ne précise en détail la plupart des spécificités dont T.C.P. est encore doté aujourd'hui. La R.F.C. #542 (produite en août 1973) précisa encore davantage le modèle de T.C.P. en y ajoutant de nouvelles fonctionnalités. Si l'on fait abstraction du fait que le protocole de communication dominant sur ARPANET était alors le *Network Control Program* tandis qu'à ce jour, sur Internet, c'est comme nous le savons tous TCP/IP qui est universellement utilisé, alors force nous est faite de constater que le *File Transfer Protocol* que nous employons actuellement est encore toujours très proche de la définition que Bhushan et les gens du N.W.G. en avaient donnée dans leurs R.F.C. de 1972-73. Etant donné qu'ARPANET, au moins originellement, était un réseau dédié au partage des ressources informatiques entre structures de recherche, une application comme FTP ne pouvait être que très favorablement accueillie par les usagers du réseau.

La deuxième « *Killer Application* » introduite sur le réseau de la D.A.R.P.A. au cours de la première moitié des années 70 fut TELNET. Développé dès 1969 par le *Network Working Group*, ce protocole de communication généraliste travaillant avec des séquences de données formatées sur 8 bits et codées en ASCII³⁵⁹, avait été conçu afin de fournir un service de connexion bidirectionnel entre terminaux et/ou applications informatiques distants. Le caractère élémentaire et la facilité d'usage de ce mécanisme d'interfaçage fondamental lui valurent de connaître une diffusion et une popularité considérables. Le protocole TERminal NETwork existe encore et il est encore beaucoup usité à ce jour.

³⁵⁹ *American Standard Code for Information Interchange* : norme de codage très communément utilisée en informatique pour le codage des caractères alphanumériques. Publiée pour la première fois sous forme standardisée en 1969, elle fut ensuite adaptée pour les réseaux l'année suivante (RFC # 20 du 16 octobre 1969 par Vinton Cerf). Depuis lors, divers perfectionnements ont encore été apportés au standard ASCII.

La troisième est dernière « application tueuse » du début des années 70 n'est autre que le courrier électronique. Comme il a été indiqué plus haut, le principe de l'échange de messages électroniques est antérieur à ARPANET. Avec l'avènement des systèmes opérant en temps partagé, durant la décennie 60, la plupart des usagers des centres disposant de ce genre d'installations informatiques avaient rapidement perçu la nécessité de développer de petites applications pour envoyer (et bien sûr recevoir) des messages aux personnes utilisant également les terminaux connectés à l'ordinateur central de leur institution. Le *Compatible Time-Sharing System* du M.I.T. était équipé pour cela du logiciel MAILBOX (on se souvient que la création de MAILBOX avait entre autres été suggérée par Louis Pouzin), tandis que le mainframe I.B.M. AN/FSQ-32 de la *System Development Corporation*, à Santa Monica, disposait de deux fonctionnalités équivalentes (MAIL et DIAL). D'autres programmes similaires (tels le *Mercury* de Bolt, Beranek & Newman ou l'AUTODIN de Philco-Ford), furent également développés et employés à la même période. On voit donc sans difficulté aucune que des messages électroniques étaient régulièrement échangés sur des systèmes informatiques en temps partagé – lesquels ne sont en définitive rien d'autre que des sortes de réseaux locaux où un nombre n de terminaux sont rattachés à un même ordinateur central – plusieurs années avant que ne soient connectés ensemble les quatre premiers nœuds d'ARPANET. Cependant on doit bien remarquer ici que les mails envoyés et reçus sur tous les systèmes en time-sharing ne circulaient pas à proprement *entre* différents ordinateurs. Si les utilisateurs de ces installations pouvaient de fait les expédier et les recevoir depuis tel ou tel terminal informatique, en tout et pour tout, les messages électroniques en transit ne passaient jamais que par un seul et unique ordinateur: celui autour duquel l'installation en temps partagé était architecturée. L'expédition et la réception de courriers sur un réseau informatique étendu, c'est-à-dire sur une structure communicante permettant aux utilisateurs de *plusieurs ordinateurs distants* d'échanger des données les uns avec les autres, fut quant à elle réalisée en 1972.

Raymond S. Tomlinson, ingénieur en informatique chez Bolt, Beranek & Newman, est souvent crédité de l'invention de l'*E-mail*, ou plutôt du *Network Mail*³⁶⁰, ainsi qu'on désignait alors cette fonctionnalité. En 1971, comme bien d'autres, R. S. Tomlinson travaillait à la mise au point du réseau ARPANET. A l'instar d'autres compagnies oeuvrant dans le secteur des technologies de pointe, B.B.N. possédait elle aussi son propre système en temps partagé, bâti autour d'un mini-ordinateur D.E.C. P.D.P.-10. En fait, la société d'ingénierie de Cambridge

³⁶⁰ *E-mail* : pour *Electronic mail* », courrier électronique. *Network Mail* : courrier de réseau (informatique).

possédait plusieurs mini-ordinateurs produits par D.E.C. Parmi ces machines il y avait (au moins) deux P.D.P.-10. A cette époque, le système d'exploitation TENEX était l'un des projets majeurs sur lesquels travaillaient les ingénieurs de la B.B.N. Doté d'un interpréteur à ligne de commandes, l'O.S. TENEX était principalement destiné au marché des P.D.P.-10. C'est pour ce mini-ordinateur que ses possesseurs destinaient fréquemment à un usage en temps partagé que R S. Tomlinson développa sous TENEX une petite application de transport local de courrier informatique : SNDMSG³⁶¹. Parallèlement, il programma aussi un logiciel de transfert de fichiers (fonctionnellement identique à FTP quoique moins élaboré), qu'il nomma CPYNET³⁶².

Au début de l'année 1972, Tomlinson eut l'idée d'articuler ses deux programmes – SNDMSG et CPYNET – en les amendant de manière à ce que l'application résultant de cette association/transformation soit capable de gérer le formatage du courrier électronique, son acheminement et sa réception d'un ordinateur à un autre. Nommé SNDMSG/READMAIL³⁶³, la nouvelle application donna rapidement satisfaction à son auteur puisque Tomlinson réussit bientôt à envoyer et à recevoir des courriers en utilisant les deux P.D.P. 10 connectés *localement* que B.B.N. possédait sur son site de Cambridge. Pour la première fois de l'histoire donc, un message électronique avait été envoyé à partir d'un ordinateur et reçu depuis un autre. Restait désormais à déterminer comment la même opération pourrait être réalisée sur ARPANET. L'exploit technique de Tomlinson ne passa pas inaperçu auprès de la communauté de chercheurs et d'ingénieurs qui étaient impliqués dans le développement du grand réseau informatique. Au mois de juillet 1972, alors qu'Abhay K. Bhushan et les chercheurs affiliés au N.W.G. mettaient la touche finale à la RFC #354 - celle qui spécifiait le *File Transfert Protocol* complètement – l'idée d'implémenter la fonctionnalité de courrier électronique nouvellement créée par Tomlinson dans la première version aboutie du logiciel fut suggérée par un des participants. SNDMSG reçut donc les modifications nécessaires pour pouvoir fonctionner sur ARPANET (avec le protocole N.C.P.), tandis que la fonction de délivrance des messages assurée par CPYNET fut transférée à F.T.P. Le protocole de transfert de fichiers de Bhushan reçut à ce point deux nouvelles commandes, MAIL et MLFL, lui permettant d'assurer la transmission des emails. Assez vite, de nombreux programmes de courrier électroniques furent développés pour un usage sur ARPANET. A la demande du physicien Stephen J. Lukasik qui occupait la fonction de Directeur de l'*Advanced Research*

³⁶¹ SNDMSG : pour *SeND MeSsaGe*, littéralement envoi de courrier.

³⁶² CPYNET : pour *CoPY NETwork*, c'est-à-dire « copier sur le réseau ».

³⁶³ READMAIL : lire le courrier.

Projects Agency et se montrait fervent utilisateur et défenseur de la messagerie électronique, Lawrence G. Roberts écrivit par exemple RD, une version améliorée de READMAIL. RD n'était qu'un exemple parmi bien d'autres et s'il se distinguait réellement des applications qui grosso modo accomplissaient les mêmes tâches que lui - comme NRD (une amélioration de RD), WRD/BANANARD, MSG (une évolution de BANANARD) ou MS/MH - c'était d'abord et avant tout parce que c'était le directeur de l'*Information Processing Techniques Office* qui l'avait programmé. En définitive l'apport de Raymond S. Tomlinson peut être considéré comme double. Ainsi s'il n'inventa pas à proprement parler le courrier électronique - les utilisateurs de systèmes en temps partagé échangeaient des messages entre eux depuis plusieurs années déjà - il fut bel et bien le premier à envoyer un courrier informatique d'un ordinateur à un autre grâce à un logiciel qu'il avait spécialement conçu, ou plutôt adapté, à cette fin. La deuxième chose - et celle-là c'est à R. S. Tomlinson et à lui seul que nous la devons - est le format retenu pour l'expression des adresses informatiques. Tout courrier, qu'il soit ou non électronique, nécessitant une adresse pour pouvoir être délivré correctement, l'ingénieur avait besoin de séparer dans cette adresse le champ usité pour indiquer le nom de celui ou de celle à laquelle elle appartenait du locus employé pour spécifier l'intitulé de la machine hôte qui était utilisée par son détenteur. A cette fin il choisit sur un clavier *Teletype Model 33* le caractère de ponctuation arobase («@»), lequel est devenu depuis lors l'un des symboles les plus forts et les plus reconnaissables d'Internet et de tout ce qui s'y rapporte³⁶⁴. Aujourd'hui des centaines de millions de mails circulent quotidiennement sur le réseau des réseaux et la structure de chaque adresse électronique qui est mentionnée dans chacun d'entre eux est rigoureusement identique à celle que Raymond S. Tomlinson avait définie en 1972.

Au jour d'aujourd'hui le courrier électronique représente assurément l'une des fonctionnalités réseau les plus utilisées dans le monde. Mais on aurait cependant tort de croire que le caractère extraordinairement répandu de cet usage date de la décennie 90, c'est-à-dire des années qui virent l'avènement du *World Wide Web* et de l'*Hypertext Transfer Protocol* (HTTP). Ainsi au cours de l'année 1973 Stephen J. Lukasik (le Directeur de la D.A.R.P.A.) commanda une étude détaillée sur l'usage d'ARPANET. Alors que le trafic sur le réseau atteignait presque trois millions de datagrammes par jour, cet audit général permit de démontrer que presque 75% des échanges réalisés sur ARPANET étaient représentés par des envois de courriers électroniques. Le succès formidable du mail - lequel comme on le sait perdure encore et toujours - ne date donc pas d'hier et à supposer bien sûr que la très grande

³⁶⁴ La première adresse de courrier électronique sur ARPANET fut celle de Ray Tomlinson. Sa structure était la suivante : tomlinson@bbn-tenexa.

majorité des messages informatiques expédiés durant les premières années de service d'ARPANET aient comporté un contenu strictement professionnel, on mesure à quel point cette application favorisa grandement la circulation de l'information scientifique et administrative entre les chercheurs (de plus en plus nombreux) connectés au réseau. En cela, l'introduction, la diffusion puis la multiplication des applications dérivées de READMAIL (ou bien calquées sur lui) permit à ARPANET de remplir sa mission encore mieux qu'il ne l'avait fait jusqu'ici.

La seconde moitié des années 70 fut riche en évènements notables pour la communauté mondiale des réseaux informatiques. Aux Etats-Unis bien sûr, la gestion d'ARPANET passa des mains de la D.A.R.P.A. à celles de la *Defense Communications Agency*. Au moment même où ce transfert de compétences et de responsabilités était en cours de réalisation, la D.A.R.P.A. signa également trois contrats avec trois structures différentes afin que celles-ci conduisent corrélativement les travaux d'implémentation du protocole de communication TCP, dont les caractéristiques techniques étaient disponibles depuis le mois de mai 1974. Ces contrats de développement furent signés avec l'Université de Stanford (équipe de Vinton G. Cerf), la *Bolt, Beranek & Newman* (équipe de William W. Plummer et Raymond S. Tomlinson, le « créateur » de l'*e-mail* sous sa forme moderne) et l'*University College of London* (laboratoire de Peter T. Kirstein). Chacun de ces groupes oeuvra à la mise au point d'une version opérationnelle du *Transmission Control Protocol*³⁶⁵, en veillant à ce que ce dernier soit capable de prendre en charge les différents réseaux existants (*Packet Radio Network*, *Packet Switched Satellite Network*, ARPANET), avec toutes leurs particularités logicielles et matérielles respectives. Dès le départ par conséquent, l'effort concernant la mise au point du protocole de communication central de l'*Internetting Projet* fut de nature internationale. Il va de soi qu'étant donné leur situation géographique, les britanniques représentaient ici l'extrémité du réseau, celle nécessitant plus que toute autre (à par Hawaï et ALOHANET s'entend), le recours à la technologie de la transmission de données par satellite. Un peu moins d'une année plus tard, il existait trois versions concurrentes de T.C.P., chacune d'entre elles étant entièrement compatible avec les deux autres. Cette disponibilité du protocole coïncida avec le début d'une intense période d'expérimentations et de perfectionnements de T.C.P. Ainsi, à la fin de l'année 1975, une première connexion par

³⁶⁵ Il est à noter que les américains et les britanniques travaillèrent tous sur des mini-ordinateurs de la *Digital Equipment Corporation*. A l'Université de Stanford, on utilisa un P.D.P.-11 sous B.C.P.L. (*Basic Combined Programming Language*), chez B.B.N., un P.D.P.-10 sous TENEX, et enfin, un P.D.P.-9 à l'*University College of London*.

SATNET et *sous T.C.P.*³⁶⁶ fut réalisée entre le système informatique de l'Université de Stanford et celui de l'*University College of London*. Au mois de novembre 1977 eut lieu le deuxième test grandeur nature du protocole T.C.P.³⁶⁷. A cette occasion des moyens matériels nombreux et divers furent mobilisés et intégrés. Le dispositif expérimental avait été conçu afin de raccorder plusieurs réseaux informatiques – ARPANET, *Packet Radio Network*, et le réseau de l'U.C.L., via le *Packet Switched Satellite Network* – afin de simuler à grande échelle des échanges de communications militaires (dont une partie au moins était très vraisemblablement cryptée). Le dispositif de test était structuré autour des composantes et des phases opérationnelles (successives) suivantes :

- Un D.E.C. L.S.I.-11, variante du P.D.P.-1 à circuits intégrés à haut niveau d'intégration³⁶⁸ installé à bord d'une camionnette civile. Circulant sur une autoroute - en l'occurrence le *San Francisco Bayshore Freeway* – ce petit système mobile était chargé de transmettre les paquets de données originaux au nœud suivant, par l'entremise d'une liaison radio établie sur le *Packet Radio Network*.
- La machine à laquelle parvenaient les données radiodiffusées depuis le L.S.I.-11 via PRNET était un ordinateur de la *Bolt, Beranek & Newman* servant pour l'occasion de *Gateway*. Ce système passerelle permettait à son tour d'envoyer les informations reçues depuis la baie de San Francisco vers un site informatique norvégien passerelle. La liaison entre la B.B.N. et l'ordinateur norvégien fut établie en recourant à des moyens satellitaires (SATNET).
- Le système norvégien réexpédiait les datagrammes – toujours les mêmes depuis le début de l'expérience – en direction du Royaume-Uni, grâce à une ligne ARPANET sous-marine.
- Les données émises depuis le site norvégien étaient reçues par le D.E.C. de l'*University College of London* (passerelle) et renvoyées vers les Etats-Unis grâce à

³⁶⁶ Et non plus sous *Network Control Protocol*.

³⁶⁷ Entre le moment où fut effectué le premier grand test de T.C.P. et celui où l'on réalisa le deuxième, Vinton G. Cerf avait accepté de quitter ses fonctions à l'Université de Stanford pour venir travailler à la D.A.R.P.A. en qualité de directeur des programmes de recherche sur les technologies des réseaux à commutation par paquets.

³⁶⁸ D'où la désignation de cet équipement – L.S.I. – qui signifie *Large Scale Integration*. Rappelons qu'un circuit électronique appartenant à la classe des composants L.S.I. comprend typiquement plusieurs centaines de transistors par centimètre carré de surface.

une liaison satellitaire transatlantique (*Packet Switched Satellite Network* sur *Intelsat IV*).

- Les informations en provenance d'Angleterre étaient réceptionnées par l'ordinateur de la *Bolt, Beranek & Newman*, le même qui les avait précédemment reçues de Californie et réexpédiées ensuite en direction de l'installation norvégienne.
- Enfin les datagrammes étaient une dernière fois routés par le système de la B.B.N. en direction du D.E.C. P.D.P.-10 de l'*Information Sciences Institute* de l'*University of Southern California*. Cette ultime transmission transcontinentale fut réalisée au moyen d'une ligne ARPANET dédiée.

Cette première expérience à grande échelle faisant tour à tour intervenir différents équipements informatiques implantés dans des sites considérablement éloignés les uns des autres était destinée à évaluer la fiabilité du *Transmission Control Protocol*. Couronnée de succès, elle permit de démontrer définitivement que les implémentations de la suite d'applications communicantes définie par Kahn et Cerf en 1974 répondaient parfaitement aux attentes de ceux qui les avaient imaginées, modélisées puis programmées. Circulant de passerelles en passerelles, les datagrammes acheminés grâce au T.C.P. sur les réseaux que les *Gateways* et lui-même permettaient d'interfacer (respectivement aux niveaux physique et logiciel) parvenaient ainsi toujours à destination³⁶⁹, dans les délais imposés par la somme des capacités moyennes respectives de chacun des réseaux empruntés. Une fois cette phase de test cruciale menée à terme, on continua à travailler à l'amélioration de T.C.P. L'essentiel de l'effort devait concerner ici la portabilité du protocole et sa capacité à intégrer différents systèmes et réseaux informatiques. En 1977, on le fit fonctionner pour la première fois sur des ordinateurs opérant sous les systèmes d'exploitation MULTICS (au M.I.T.) et UNIX (chez B.B.N). Une autre évolution tout à fait remarquable de T.C.P. eut lieu l'année suivante.

Ainsi, au début de l'année 1978, lors d'une assemblée de l'*International Network Working Group* à l'*University of Southern California's Information Sciences Institute*, Vinton G. Cerf, Danny Cohen et Jon Postel proposèrent de scinder le protocole T.C.P. en deux parties. La composante T.C.P. – *Transmission Control Protocol* – devait récupérer les données

³⁶⁹ Les possibles erreurs de transmission sur les réseaux (perte de paquet, dégradation de l'intégrité du contenu binaire des datagrammes), étaient récupérées par les fonctions spéciales intégrées à T.C.P.

informatiques en attente d'expédition, les configurer sous forme de datagrammes et accomplir l'opération de conversion inverse lorsque lesdits datagrammes étaient réceptionnés par le système hôte destinataire. Elle devait aussi être chargée de la détection des erreurs (dégradation et égarement des paquets sur le réseau), de l'exécution des procédures de réexpédition en cas de perte ou de détérioration des datagrammes émis, et de l'ordonnancement de ces derniers au fur et à mesure qu'ils parvenaient à destination. Quant à la seconde partie – elle reçut le nom d'*Internet Protocol* - Cerf, Cohen et Postel prévoyaient de lui confier toutes les opérations de routage sur le réseau. Cette modification fut globalement acceptée par les concepteurs du T.C.P. si bien qu'à la fin de l'année 1978, on ne parlait plus de *Transmission Control Protocol* mais de *Transmission Control Protocol / Internet Protocol*.

Bientôt les premiers prototypes de T.C.P./I.P. furent programmés et régulièrement améliorés – à partir d'une base qui donnait déjà satisfaction - si bien qu'à l'orée des années 80, Cerf et ses pairs purent mettre la substitution du *Network Control Protocol* (N.C.P.) par le *Transmission Control Protocol / Internet Protocol* à l'ordre du jour. Les choses ne se firent d'ailleurs pas sans peine car en droit, il n'existait absolument aucune disposition administrative ni aucun argument technique qui put contraindre une institution raccordée à ARPANET à changer les programmes standards qui permettaient à son ordinateur de se raccorder au réseau. Afin de convaincre les récalcitrants et non sans les avoir mis en garde au préalable, le groupe en charge de T.C.P./ I.P. coupa le canal d'identification numérique des I.M.P. opérant sous le protocole N.C.P. pendant toute une journée de l'année 1982. Ainsi, seuls les sites qui avaient déjà opéré leur basculement sous T.C.P./ I.P. purent continuer à fonctionner pendant cette journée. Ce premier coup de semonce destiné à démontrer le genre d'isolement informatique qui attendait les utilisateurs des installations dont les administrateurs refusaient ou reculaient le moment du passage à T.C.P./I.P. fut suivi par une nouvelle démonstration de force³⁷⁰, à peine deux jours plus tard. Validé à la fois par la *Defense Advanced Research Projects Agency*, la *Defense Communications Agency* et le *Department of Defense*, le passage de tous les systèmes informatiques raccordés à ARPANET à la suite de programmes T.C.P./ I.P. devint effectif à la date du 1^{er} janvier 1983. Ce changement de logiciels alla évidemment de pair avec l'abandon définitif du *Network Control Protocol*, lequel était employé comme protocole de communication standard sur ARPANET depuis le mois de décembre 1970.

³⁷⁰ Dans la façon, ce deuxième avertissement fut parfaitement identique au premier.

La fin de la décennie 70 et le début des années 80 correspondit également à la période qui vit se multiplier les réseaux informatiques dans le monde entier. Sur le vieux continent, le réseau EUnet (*European UNIX Network*) fut établi à l'initiative de l'*European Unix Users Group*. En 1982, EUnet raccordait 4 pays : le Danemark, la Suède, les Pays-Bas et la Grande-Bretagne. Deux ans plus tard, toujours en Europe, c'est le réseau EARN (pour *European Academic and Research Network*) qui vit le jour. Basé à Paris et mettant en liaison divers centres de calculs répartis sur le territoire européen, EARN était en outre connecté à ARPANET. On pourrait encore donner d'autres exemples de création de réseaux informatiques. Ainsi, toujours en 1984 et pour ne citer que ceux-là, ce sont les réseaux japonais JUNET (*Japan University NETwork*) et britannique JANET (*Joint Academic NETwork*) qui entrèrent en service. Il est important de remarquer ici que c'est également à ce moment que l'on commença à introduire les premiers systèmes *Domain Name Server* (D.N.S.). Le principe de serveur de nom de domaine existait déjà sur ARPANET depuis le début des années 70. Il était en l'occurrence implémenté sous la forme d'un fichier alphanumérique présent sur tous les nœuds du réseau. Baptisé «HOSTS.txt », régulièrement actualisé, cette base de données élémentaire permettait d'établir une correspondance entre la désignation alphabétique d'un nœud donné et son identifiant numérique sur le réseau (par exemple son adresse I.P. si l'on était sous T.C.P./I.P.). Pour les utilisateurs d'ARPANET, la chose était extrêmement pratique puisque l'adressage d'un hôte était beaucoup plus aisé à réaliser en recourant à son nom – soit une chaîne alphanumérique unique faisant immédiatement sens pour l'homme – qu'il ne l'était en utilisant son adresse numérique, anonyme et compliquée. La multiplication des nœuds sur ARPANET poussa cependant bien vite le principe de la table d'adressage fixe dans ses limites. La mise à jour des copies du fichier « HOSTS.txt », désormais proliférantes, représentait une tâche difficile et incessante, très souvent génératrice d'erreurs. En 1983, Paul V. Mockapetris (de l'*Information Sciences Institute of the University of Southern California*) proposa une nouvelle approche pour le service de D.N.S. Dynamique, distribuée intégrant les notions de zones d'autorité et de hiérarchie de domaines – sous la forme des fameux suffixes .com, .net, .gov, .mil, .edu, qui nous sont à présents très familiers – l'architecture D.N.S. imaginée par P. V. Mockapetris ne possédait aucun des défauts de sa devancière. Preuve de son aboutissement et de sa fiabilité, le système de *Domain Name Server* que nous utilisons actuellement est encore très proche de ce qu'il était en 1983.

Bien sûr, après les pays d'Europe, ce sont les Etats-Unis qui connurent la plus forte croissance en matière de réseaux informatiques. Trois facteurs au moins permettent de rendre

compte de ce phénomène. Si comme nous allons le voir à présent les deux premiers relevaient de la raison technique, le troisième, en revanche, était plutôt d'ordre politique et administratif. Le premier des éléments déterminants ayant favorisé notablement le développement des réseaux informatiques à la charnière des années 70/80 était comme nous le disions de nature technique. Si jusqu'à la fin des années 50 les systèmes informatiques s'étaient distingués de multiples façons – à commencer par leur coût prohibitif, leurs dimensions colossales, leur particularisme technologique, leur incompatibilité, les difficultés posées par leur mise en œuvre et leur maintenance, sans parler encore de l'absence de logiciels standards... – cette tendance s'était peu à peu atténuée au cours de la première moitié de la décennie 60, avec l'introduction sur le marché d'une nouvelle catégorie de machines, les mini-ordinateurs. Nettement moins encombrants que leurs devanciers, moins onéreux et difficiles à entretenir qu'eux, ces équipements ouverts³⁷¹ offraient cependant un niveau de performances parfaitement suffisant pour l'accomplissement d'un grand nombre de tâches. Toutes ces caractéristiques firent que très rapidement, des structures qui jusqu'ici n'avaient pas eu les moyens de louer (et encore moins d'acquérir) un ordinateur purent enfin posséder une telle machine. Tout au long des années 60, les compétences techniques et programmatiques de ces groupes se développèrent, ce phénomène se trouvant encore renforcé et accéléré grâce à l'apparition des langages de programmation de haut niveau.

Au début des années 70, nombreuses étaient les équipes de recherche et les entités académiques qui avaient adopté les mini-ordinateurs produits par la *Digital Equipment Corporation*. Les P.D.P. modèles 10 et 11, ainsi que peuvent par exemple en témoigner les diagrammes logiques d'ARPANET datant de cette époque, étaient particulièrement prisés pour leurs qualités nombreuses. La remarquable diffusion de ces « petits » ordinateurs et de leurs systèmes d'exploitation (dans une écrasante majorité de cas il s'agissait des O.S. TOPS-10, TENEX et TOPS-20), parallèlement à la multiplication des installations opérant en time-sharing et au phénomène grandissant de la mise en réseau des machines (que celle-ci soit au demeurant réalisée à l'échelon local ou par l'entremise d'un raccordement à ARPANET), eut ici un effet standardisant. L'établissement progressif de ce fond technologique commun, la constitution graduelle de cet ensemble d'outils logiques et physiques partagés, permit aux utilisateurs d'ordinateurs de partager de plus en plus largement et efficacement leurs ressources informatiques.

³⁷¹La société D.E.C. par exemple n'interdisait pas à ses clients d'apporter les modifications qu'ils désiraient à leurs P.D.P. alors qu'une telle chose aurait été tout bonnement inimaginable avec des matériels fournis - c'est-à-dire loués - par I.B.M.

A la fin de la décennie 70, les V.A.X.³⁷², mini-ordinateurs à architecture 32 bits également commercialisés par la firme D.E.C., commencèrent à remplacer massivement les P.D.P. tandis que dans le même temps, on substituait UNIX aux systèmes d'exploitation jusque-là typiquement associés à ces machines très répandues. Il n'est pas inutile ici de rappeler qu'UNIX, système d'exploitation développé à la toute fin des années 60 aux *AT&T Bell Laboratories*, remporta un énorme succès en raison de ses qualités multiples. Sa totalité gratuite et l'entière disponibilité de son code source³⁷³ contribuèrent ainsi à asseoir sa popularité dans la communauté informatique, ceci étant tout spécialement vrai de la frange constituée par les possesseurs de systèmes informatiques D.E.C. Les premières évolutions d'UNIX cédèrent bientôt la place à 3BSD³⁷⁴, une évolution de l'UNIX *Berkeley Software Distribution*³⁷⁵, gratuite et optimisée afin d'exploiter certaines des propriétés des V.A.X. Enfin en août 1983, on distribua une variante de B.S.D. (la 4.2.) qui, en plus des fonctionnalités réseaux déjà disponibles dans les variantes précédentes de l'O.S. de Berkeley, intégrait aussi le nouveau protocole d'ARPANET T.C.P. / I. P. Tout ceci faisait qu'au commencement de la décennie 80, une immense majorité de plateformes informatiques étaient correctement équipées pour la mise en réseau. Or si ces dernières étaient très fréquemment rattachées à des structures d'ampleur locale, régionale voire même nationale, toutes ne bénéficiaient pas d'une connexion au grand réseau de la *Defense Advanced Research Projects Agency*. En effet, la totalité des installations informatiques raccordées à ARPANET, quant elles n'étaient pas implantées en terre étrangère, appartenaient à des universités, des compagnies, des agences ou des administrations étroitement liées à la D.A.R.P.A. et/ou au DoD (à un niveau ou à un autre, toutes ces institutions se trouvaient donc sous contrat avec l'agence de financement des projets de recherche avancée de l'U.S. *Department of Defense*). Sans même évoquer les coûts qu'engendraient systématiquement l'établissement d'une connexion à ARPANET puis sa maintenance – on peut les évaluer à environ 100000 dollars par an - cette situation particulière eut un effet réellement déterminant sur le processus de multiplication des réseaux informatiques auquel on assista aux U.S.A. à la fin des années 70.

³⁷² V.A.X.: pour *Virtual Address eXtension*.

³⁷³ Cela cessa en 1982 lorsqu'AT&T commercialisa la version *System III* d'UNIX. La disponibilité du code source signifiait que les utilisateurs d'UNIX et de ses déclinaisons B.S.D. avaient tout le loisir de modifier le logiciel, afin de le corriger, de le perfectionner et ou de l'adapter à leurs besoins spécifiques

³⁷⁴ 3BSD. était aussi désignée sous les appellations suivantes : *Virtual VAX/UNIX* et *VMUNIX* (pour *Virtual Memory Unix*).

³⁷⁵ Rappelons que le développement de l'UNIX B.S.D. à Berkeley avait été fait sous contrat avec la D.A.R.P.A. Les distributions B.S.D. étaient gratuites et leur code source disponible.

Les communautés scientifiques et académiques qui, si on ose le formuler ainsi, représentaient en quelque sorte les groupes institutionnels laissés-pour-compte d'ARPANET, n'étaient pas plus dépourvues de moyens d'action qu'elles n'étaient inconscientes des avantages offerts par les réseaux informatiques pour ce qui touchait à l'optimisation du travail de recherche dans son ensemble. Grâce aux financements accordés par les instances tutélaires dont elles dépendaient administrativement et financièrement, ces communautés souvent déjà pourvues en équipements informatiques de pointe eurent tôt fait de disposer des capacités nécessaires à la mise en place et à la gestion de leurs propres réseaux. C'est ainsi que la *National Aeronautics and Space Administration* donna naissance au réseau SPANet (pour *Space Physics Analysis Network*), que l'*U.S. Department of Energy* établit le *Magnetic Fusion Energy Network* (MFENet) afin que les chercheurs des différents laboratoires du DoE puissent avoir accès aux supercalculateurs en service sur certains de ses sites et que la *National Science Foundation* (N.S.F.) – une puissante organisation gouvernementale civile chargée de promouvoir l'essor de la science et de l'éducation dans le pays - accorda en janvier 1980 une subvention de 5 millions de dollars à Larry Landweber, de l'Université de Wisconsin-Madison, pour le développement du *Computer Science Network* (CSNET). Ce nouveau réseau se voulait ouvert, autrement dit il devait « recevoir » en priorité les ordinateurs des chercheurs en informatique dont les laboratoires – qu'il s'agisse au demeurant de structures universitaires, industrielles ou gouvernementales - ne disposaient pas d'une connexion à ARPANET. Cette particularité ne devait cependant pas empêcher la D.A.R.P.A. de soutenir la conception de CSNET tout en y prenant une part active. Ainsi Robert E. Kahn et Vinton G. Cerf jouèrent ici le rôle de conseillers techniques. Composée de Peter Denning (Université de Purdue), de Dave Farber (Université du Delaware) et de Tony Hearn (RAND Corporation), l'équipe de Larry Landweber soumit une première proposition de projet à la N.S.F. au mois de novembre 1979. Après un examen poussé, le comité en charge de son examen à la *National Science Foundation* la rejeta. Cependant l'idée du CSNET ne fut jamais remise en question, et le groupe de Landweber put immédiatement se remettre au travail. Dans le courant de l'été 1980 il soumit une deuxième proposition à la *National Science Foundation*. Ce projet impliquait une structure réticulaire basée sur ARPANET, TELENET et *PhoneNet* (un service de messagerie électronique permettant aux structures les plus modestement équipées de se connecter malgré tout à CSNET). Des passerelles devaient permettre aux trois réseaux de communiquer les uns avec les autres. A l'issue de sa phase initiale de développement (fin 1981), CSNET comportait de trois nœuds : les Universités de Purdue, de Princeton et du Wisconsin. En 1982, il y en avait 24. Deux ans plus tard, après

l'adoption du protocole T.C.P. / I.P., 84 départements d'informatiques étaient connectés à CSNET. Parallèlement à ces développements, d'autres réseaux, comme BITNET ou UUCPNET virent aussi le jour.

L'expérience que la *National Science Foundation* fut en mesure d'acquérir en finançant et en participant à la création de CSNET acheva de convaincre ses responsables de l'importance stratégique des réseaux, à la fois en tant qu'outils de diffusion du savoir scientifique et comme vecteurs de partages des ressources informatiques. Cela détermina la *National Science Foundation* à poursuivre plus avant son engagement dans ce domaine. En 1984, la N.S.F. démarra un programme d'implantation régionale de super centres de calcul³⁷⁶ (*Supercomputing Centers*). Entre 1985 et 1987, cinq de ces centres virent le jour :

- Le *Cornell Theory Center* (C.T.C.) à l'Université de Cornell.
- Le *National Center for Supercomputing Applications* (N.C.S.A.) à l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign.
- Le *Pittsburgh Supercomputing Center* (P.S.C.) à l'Université de Carnegie Mellon et à l'University of Pittsburgh.
- Le *San Diego Supercomputer Center* (S.D.S.C.) à l'Université de Californie à San Diego.
- Le *John von Neumann Center* à l'Université de Princeton.

En 1985, alors que quatre de ces centres de calcul étaient déjà en cours de construction, la *National Science Foundation* définit un plan pour la mise en œuvre d'un réseau informatique destiné à connecter ensemble les superordinateurs du C.T.C., du N.C.S.A., du P.S.C., du S.D.S.C. et du *John von Neumann Center*. La N.S.F. plaça la conduite de ce nouveau projet sous la responsabilité de l'irlandais Dennis Jennings³⁷⁷. Directeur des services informatiques

³⁷⁶ Cette décision fut prise après qu'un certain nombre de rapports officiels et d'enquêtes menées auprès de chercheurs américains eurent démontré que les Etats-Unis souffraient d'un manque préoccupant en matière de ressources de calcul avancées (autrement dit de superordinateurs). Le rapport du mathématicien Peter D. Lax (*New York University*) exerça ici une influence particulièrement déterminante dans le lancement du programme de création des super centres de calcul par la N.S.F. Daté du 26 décembre 1982 et intitulé « Report of the Panel on Large Scale Computing in Science and Engineering », il fut rédigé à la demande conjointe du *Department of Defense*, de la *National Science Foundation*, du *Department of Energy* et de la *National Aeronautics and Space Administration*. Le rapport Lax est consultable et téléchargeable sur le site du *Pacific Northwest National Laboratory* : http://www.pnl.gov/scales/docs/lax_report_1982.pdf.

³⁷⁷ Détail important car jamais le gouvernement américain n'aurait confié la supervision de la réalisation d'un réseau tel que le NSFNET à un ressortissant d'une nation qui ne comptait pas parmi ses alliés politiques et militaires – ce qui était le cas de l'Irlande – le Docteur Dennis Jennings, quoique irlandais de souche, avait vu le jour en Grande-Bretagne. Puisqu'il possédait un passeport britannique, le chercheur pouvait donc travailler à la conception du réseau de la N.S.F.

de l'University College Dublin, ce dernier avait été à l'origine de la création de l'*Irish Universities Network* (IUNET) et du *Higher Education Authority Network* (HEAnet). Dès le départ, la *National Science Foundation* décida que NSFNET serait un réseau de réseaux (un « *inter network* » donc). Pensé comme un « *backbone* » à hautes performances (à la fois en termes de débit de données et de ressources de calcul connectées), NSFNET devait jouer ici le rôle d'une sorte de grosse colonne vertébrale informatique à laquelle les réseaux régionaux scientifiques et académiques américains non raccordés à ARPANET pourraient être connectés. Peu de temps après son entrée en fonction, Dennis Jennings prit trois décisions stratégiques qui toutes se virent validées par les représentants de la *National Science Foundation* :

- 1) NSFNET devait être un réseau scientifique généraliste. Il ne devait pas seulement servir à raccorder les super centres de calcul récemment mis en place par la N.S.F. mais, en s'appuyant sur ces centres justement, offrir aussi la possibilité à tous les réseaux du monde de la recherche et de l'enseignement de se connecter pour partager données scientifiques et ressources informatiques.
- 2) Comme il a été indiqué, NSFNET devait être un *backbone* – autrement dit un puissant réseau informatique servant de socle et de voie de communication partagés à de nombreux autres réseaux – auquel les communautés scientifiques disposant d'un réseau régional auraient la possibilité de se connecter. Qui plus est il était aussi prévu que chacun de ces réseaux puisse se connecter à n'importe quel autre, par l'entremise de la plateforme commune NSFNET. Cette offre de la N.S.F. d'ouvrir NSFNET à d'autres structures amena ces communautés à réagir, c'est-à-dire à préparer leur réseau à ce raccordement lorsqu'elles en possédaient déjà un et à le créer lorsque ce n'était pas encore le cas. Dans cette perspective une douzaine de réseaux académiques régionaux furent mis en place (ou mis à jour) en quelques années à peine³⁷⁸.
- 3) Enfin T.C.P./I.P., qui était la suite standard de protocoles de communication déjà employée sur ARPANET depuis 1983, serait également le programme de communication que l'on utiliserait de façon systématique sur le réseau NSFNET. Ce dernier choix technologique garantissait la compatibilité de NSFNET et d'ARPANET.

³⁷⁸ On pourra par exemple citer CERFnet (*California Educational and Research Federation Network*), NYSERnet (*New York State Education and Research Network*), NEARnet (*New England Academic and Research Network*), NevadaNet (*Nevada Network*), MOREnet (*Missouri Research and Education Network*), et THEnet (*Texas Higher Education Network*).

Immédiatement connecté à ARPANET, NSFNET entra officiellement en service au cours de l'année 1986. Au départ, un *backbone* doté d'une capacité de transport de 56 kbits/s permettaient aux cinq grands centres de calcul nouvellement établis dans le pays de communiquer ensemble.

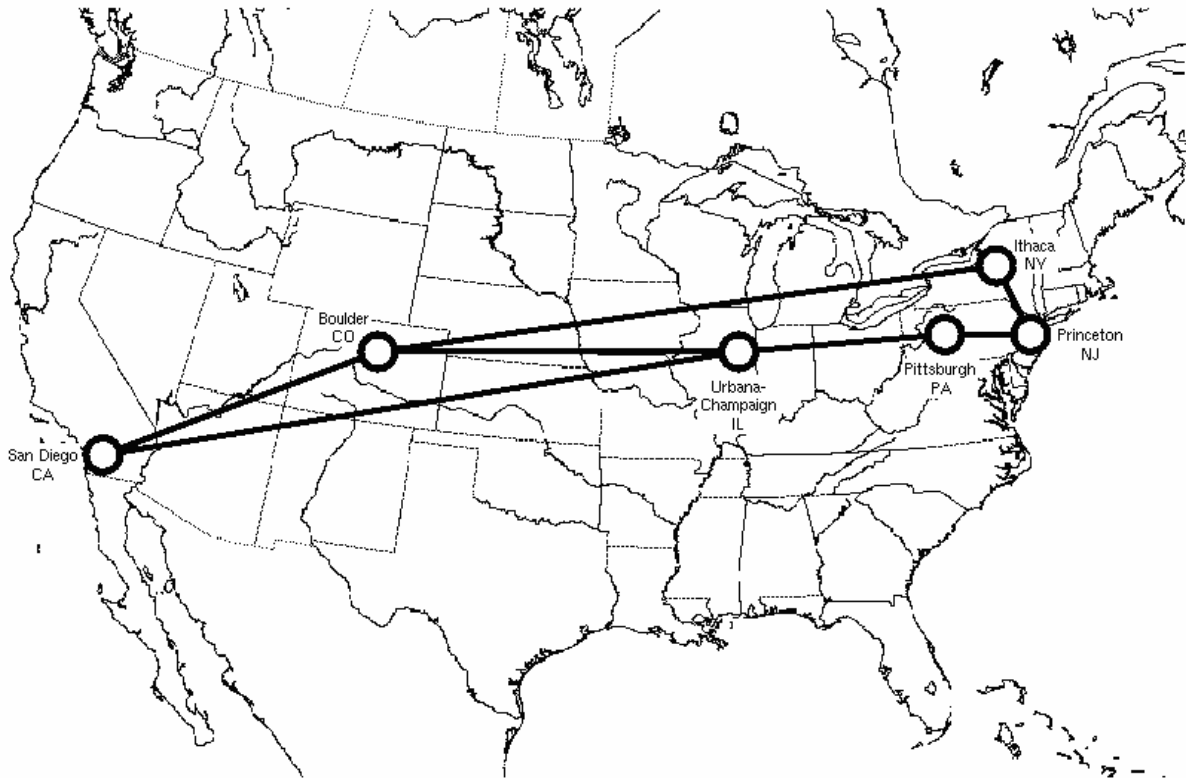


Fig. 19: épine dorsale (backbone) du réseau informatique américain NSFNET pour la période juillet 1986 - juillet 1988. Le débit offert par ces lignes porteuses était de 56Kbits.

Progressivement, et ainsi qu'il avait été décidé, de plus en plus de réseaux académiques régionaux vinrent se raccorder à NSFNET si bien qu'assez vite, le volume des données échangées quotidiennement devint trop important pour la capacité des lignes initialement mises en place. En 1987, cette surcharge était devenue telle que les responsables du réseau se trouvèrent dans l'obligation de procéder à l'augmentation de la capacité de ces lignes (ce qui revenait à les changer). Pour mener à bien ce chantier informatique, la *National Science Foundation* lança officiellement un appel d'offres³⁷⁹, le 15 juin 1987. Par le fait même elle faisait le choix de solliciter aussi bien des instances publiques que des intérêts privés. Elle offrait donc à des entités commerciales la possibilité de participer à la construction de NSFNET. Or prendre part au perfectionnement de ce réseau représentait pour les entreprises intéressées une opportunité formidable. D'abord parce que c'était là l'occasion pour ces

³⁷⁹ *Project Solicitation for Management and Operation of the NSFNET Backbone Network*, NSF 87-37, 15 juin 1987.

sociétés d'acquiescer et/ou de raffiner des compétences dans un secteur technologique de pointe, de toute évidence promis à un formidable essor. Ensuite parce que cette immixtion voulue par la N.S.F. du secteur privé, c'est-à-dire en raison dernière de la logique commerciale, dans l'économie générale du réseau NSFNET devait à terme servir les intérêts des deux parties. Steve Wolff, le successeur de Dennis Jennings à la tête du programme NSFNET, a expliqué ce qui avait motivé les personnes en charge de la gestion du réseau à intégrer de la sorte des acteurs du monde industriel dans leur projet:

« Cela devait arriver parce qu'il était évident que si cela ne se faisait pas de manière coordonnée, cela se produirait de façon aléatoire et que [dans ce cas] la communauté académique demeurerait à distance, [comme cantonnée] à la marge. C'était le mauvais modèle – [celui qui impliquait] à nouveau une multitude de réseaux plutôt qu'un seul Internet. Il devait exister une activité commerciale pour supporter le réseau, pour lui permettre de grossir. Cela permettrait d'abaisser les coûts pour tout le monde, y compris pour la communauté académique, ce qui était bien la mission que la NSF était supposée remplir ³⁸⁰ ».

Pour les responsables de NSFNET en effet, il ne faisait aucun doute que de tôt ou tard, des compagnies privées parviendraient à prendre pied dans le réseau. Dès lors s'offrait une unique alternative : soit résister et prendre le risque énorme de voir finalement cet événement se réaliser de façon anarchique, au détriment de la communauté scientifique américaine, soit alors le provoquer et, ce faisant, en contrôler parfaitement les orientations et le déroulement. C'est évidemment cette dernière solution que l'on décida de privilégier. Le choix de la N.S.F. se porta sur la proposition commune émanant d'un groupe composé de deux compagnies industrielles, la *M.C.I Communications Corporation* et *I.B.M.*, et une organisation à but non lucratif, la *Merit Computer Network Inc.* Celle-ci regroupait plusieurs universités de l'état du Michigan. La société *I.B.M.* était chargée ici de la production des logiciels et des équipements spéciaux pour la gestion du réseau et la réalisation des opérations de commutation par paquets, *M.C.I.* devait fournir les nouvelles lignes de transmission à haute capacité pour le *backbone*, tandis que les volets ingénierie, gestion, management et soutien aux utilisateurs du projet étaient du ressort de la *Merit Computer Network Inc.* Le travail fut mené avec promptitude et le 1^{er} juillet 1988, des lignes de type *Digital Signal 1* (plus communément désignée sous le nom de lignes T1) d'une capacité nominale de 1,5 Mbits/s entrèrent en service.

³⁸⁰ In K. D. Frazer. *NSFNET: A Partnership for High-Speed Networking, Final Report 1987-1995. Merit Network Inc.*, 1996, p.32.

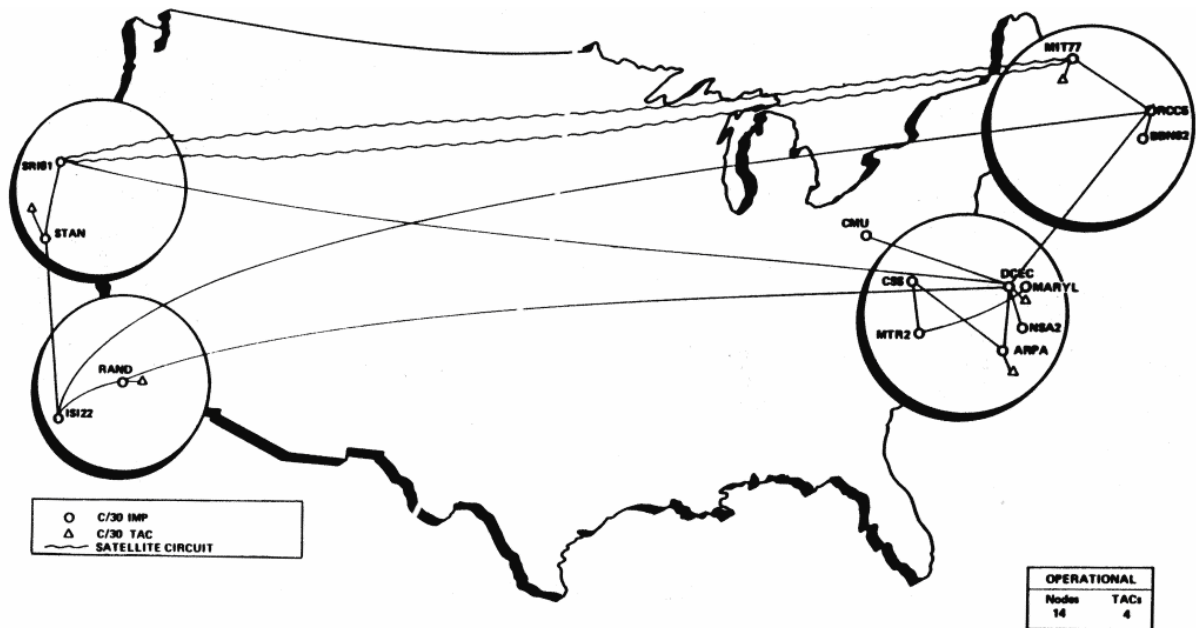


Fig. 21: topologie logique du réseau ARPANET, au 31 octobre 1989.

Au début des années 1990, la capacité de la bande passante du *backbone* de NSFNET fut portée à 45 Mbits/s. Au cours de la même période sa vitesse d'expansion ne décreut pas. Tout au contraire. En novembre 1992, NSFNET raccordait ainsi quelques 7500 réseaux, dont un tiers environ étaient implantés à l'étranger.

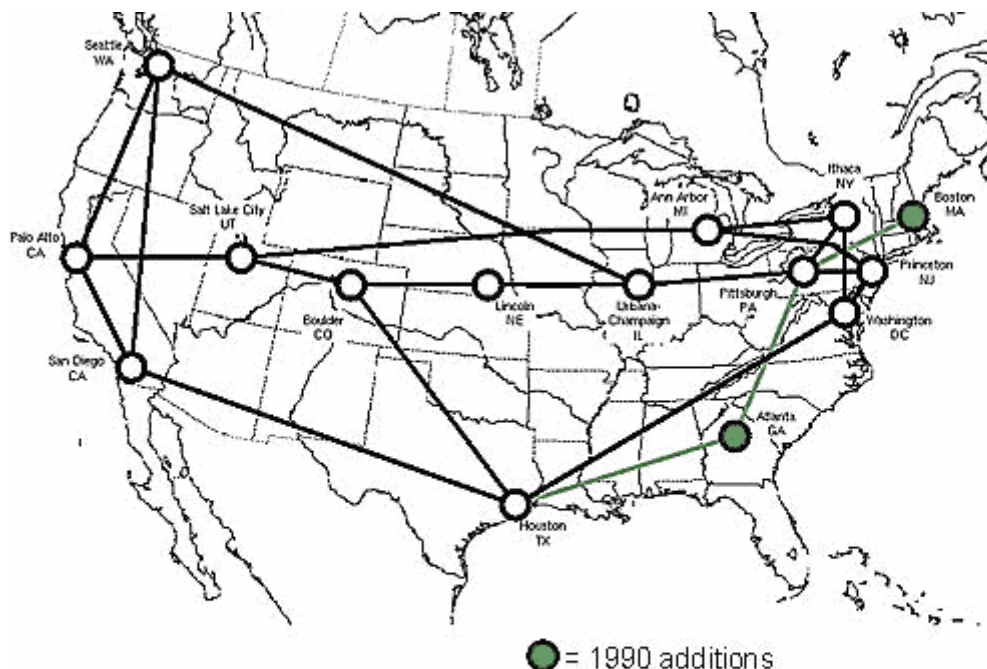


Fig 22: épine dorsale du réseau NSFNET pour la période de juillet 1989 à novembre 1992. Les lignes T1 de NSFNET offraient une bande passante de 1,5 Mo. Les cercles pleins indiquent les nouveaux noeuds ajoutés à NSFNET au cours de l'année 1990.

Le nombre de datagrammes transportés quotidiennement se chiffrait à présent en dizaines de milliards. Tandis que ce phénomène de croissance se poursuivait sans relâche, le monde économique qui pas ailleurs avait déjà commencé à se doter de réseaux séparés afin de pouvoir offrir des services commerciaux aux entreprises et aux industries intéressées, commença à accentuer sa pression sur la N.S.F. afin que cette dernière procède à la levée des clauses restrictives qui, dans l'*Acceptible Usenet Policy* (A.U.P.) régissant les pratiques autorisées sur NSFNET, prohibaient l'accès au réseau à tous ceux qui ambitionnaient de s'y connecter pour des motifs marchands. En 1991, PSINet, UUNET, CERFnet, trois des premiers fournisseurs d'accès et de services sur internet (*Internet Service Providers* ou I.S.P.), se regroupèrent afin de constituer un pôle réseau dédié aux opérations marchandes. Ce consortium reçut le nom de *Commercial Internet eXchange* (C.I.X.). Deux ans plus tard, soit en 1993, l'influence du C.I.X. et la demande en fourniture de services commerciaux informatiques étaient devenues à ce point importantes (et pesantes) que la *National Science Foundation* se résolut à effectuer des études pour planifier le passage de NSFNET au secteur privé. Ce qui était en train de s'opérer à ce point n'était ni plus ni moins qu'un changement de modèle social, administratif et, dans une moindre mesure, technique.

Depuis le lancement d'ARPANET, à la toute fin des années 60, la création puis la gestion et la régulation de l'ensemble des réseaux informatiques aux Etats-Unis s'étaient faites exclusivement sous la responsabilité financière et administrative des grandes agences gouvernementales militaires (A.R.P.A./D.A.R.P.A., D.C.A.) ou civiles (N.S.F., N.A.S.A.). A l'orée des années 90 NSFNET était devenu le plus important réseau informatique des Etats-Unis. Grâce à son *backbone* à très haut débit, NSFNET connectait ensemble des centres de calcul équipés de superordinateurs, mais aussi et surtout des dizaines de réseaux régionaux, eux-mêmes constitués de réseaux et de sous réseaux plus petits. Ceux-là comportaient souvent des dizaines, voire des centaines d'ordinateurs. NSFNET était donc une entité informatique gouvernementale, financée avec des fonds publics, dont l'accès et l'usage, en vertu de cette réalité, étaient strictement réservés à des organisations issues des mondes de la recherche et de l'éducation. Or tandis que NSFNET s'apprêtait à absorber ARPANET – vingt années après ce dernier ait été créé – il devenait de plus en plus patent que son modèle de financement et d'administration hérité des années 60 n'était plus adapté aux réalités de l'époque. Comme l'ont clairement fait ressortir les commentaires de Dennis Jennings, NSFNET avait besoin de l'arrivée des entrepreneurs, des industriels et des marchands pour être en mesure de poursuivre sa croissance et se maintenir. Ces derniers avaient tout autant besoin du grand réseau informatique pour développer et moderniser leurs activités. La philosophie qui depuis,

les origines, avait présidé à la conception et au développement des réseaux informatiques gouvernementaux ne s'accordait certes pas avec ces nouveaux impératifs. A terme pourtant la convergence de ces faisceaux d'intérêts tout à la fois opposés et concourants apparaissait comme une chose inéluctable. Un compromis devait donc être déterminé, une nouvelle philosophie axée sur la privatisation et la commercialisation définie. Ce fut chose faite en 1995, lorsque la N.S.F. signa des contrats avec plusieurs entreprises pour la réalisation, la mise en œuvre et l'exploitation de quatre *Network Access Points*³⁸¹ (N.A.P.). Dotés d'une capacité de transmission individuelle extrêmement élevée – 155 Mbits/s – ces points d'accès (ou d'échange) furent spécialement conçus pour permettre à l'ensemble des réseaux commerciaux existants (et à venir) de se connecter NSFNET. Les *Network Access Points* étaient aussi ouverts aux fournisseurs d'accès à internet. Les premiers dispositifs de ce genre furent déployés à Pensauken (SprintNAP de New York), à Washington D.C. (*Metropolitan Fiber System Datanet*), à Chicago (ChicagoNAP), et à San Francisco (SFNAP). Leur exploitation, respectivement, revint aux sociétés suivantes : *Sprint*, M.F.S., *Bellcore* et *Ameritech*, *Bellcore* et *Pacific Bell*.

L'année qui suivit la mise en œuvre des N.A.P. vit la totalité des réseaux régionaux jusqu'ici raccordés au *backbone* T3 de NSFNET transférer leurs connexions vers les plateformes N.A.P. des fournisseurs d'accès et de services commerciaux. Le 30 avril 1995, on prononça la dissolution officielle de NSFNET. Au plus fort de son activité, le réseau de la N.S.F. avait permis de mettre en relation près de 4000 organisations en connectant quelques 50000 réseaux informatiques. L'avènement d'Internet ne signifia pas pour autant la disparition de NSFNET. Un petit réseau à très haute performance baptisé *Very High Speed Backbone Network Service* (vBNS), et entièrement dédié à la recherche scientifique fut conservé ici par la *National Science Foundation*. C'est vBNS qui sert aujourd'hui de noyau au développement du réseau expérimental Internet2.

Ce que nous appelons Internet a considérablement évolué depuis l'époque où les restrictions commerciales qui pesaient sur NSFNET ont été levées. Depuis le milieu des années 90 le réseau des réseaux n'a en effet cessé de croître et de s'internationaliser, voyant son nombre d'hôtes et d'utilisateurs s'accroître de façon toujours plus vertigineuse. Dans un premier temps, ce sont essentiellement des organisations commerciales (entreprises, industries, prestataires de services informatiques, etc.), et des structures académiques (universités, lycées, collèges) qui s'y sont connectés. Puis les offres de plus en plus intéressantes des fournisseurs

³⁸¹ Les *Network Access Points* étaient aussi appelés *Internet eXchange Points* (I.X.P.). En Europe on parlait plutôt de *Global Internet eXchange* (G.I.X.) ou de *Metropolitan eXchange Points* (M.X.P.).

d'accès, la multiplication des points de connexion³⁸², la mise au point des premiers moteurs de recherche (tels *Gopher*) et surtout l'introduction du *World Wide Web*, du langage HTML³⁸³, du protocole http³⁸⁴, et des *Web Browsers* supportant des contenus multimédia (comme *Mosaic* et *Netscape Navigator*), dans les années 1989-94, ont grandement favorisé la *popularisation* de l'usage d'Internet. Exploitant les techniques de l'hypertexte et des hyperliens déjà décrites par Joseph C.R. Licklider et Douglas Engelbart dans les années 50 et 60, basé sur un puissant système hiérarchique d'identification des ressources³⁸⁵, le *World Wide Web* – qui est une application fonctionnant *sur* Internet et *non pas* Internet lui-même - a vu le jour à la fin des années 80 au C.E.R.N. (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, ex Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire). Au même titre que le courrier électronique ou *telnet* avant elle, cette application conçue par le britannique Timothy J. Berners-Lee³⁸⁶ et le belge Robert Cailliau mérite d'être qualifiée de « tueuse ». Le *World Wide Web* (WWW) dont le code source a été rendu public par ses auteurs dès le mois d'avril 1993, a entraîné des répercussions économiques et sociologiques si considérables – ces dernières concernent en effet la quasi-totalité des activités humaines à l'échelon planétaire même si cinq hommes sur six ne disposent pas encore d'un accès à Internet au jour où nous écrivons - que nous manquons encore à l'ors actuel du recul nécessaire pour prétendre pouvoir en prendre réellement la pleine mesure. Le caractère intuitif et ergonomique du WWW, le faible coût et la relative facilité d'emploi des outils logiciels permettant de mettre, de consulter et/ou d'échanger du contenu en ligne – que ce soit à titre privé ou commercial – ont amené des centaines de milliers d'individus, puis bientôt des dizaines de millions de personnes à se doter d'équipements informatiques (ou à adapter ceux qu'ils possédaient déjà) afin de pouvoir se connecter à la « toile d'araignée mondiale ». Ainsi au mois de décembre 1995 le nombre d'utilisateurs d'Internet était de 16 millions³⁸⁷. Dix ans plus tard, mois pour mois, il avait largement dépassé un milliard³⁸⁸. Relayé par des mass média enthousiastes (et forcément intéressés), évidemment « victime » (avec un degré de réussite quelquefois très

³⁸² D'abord à bas débit via le réseau téléphonique commuté (R.T.C.) puis à haut débit avec le déploiement massif de la fibre optique.

³⁸³ Pour *Hypertext Markup Language*, c'est-à-dire littéralement « langage de balisage d'hypertexte ».

³⁸⁴ Pour *Hypertext Transfer Protocol*. Il s'agit d'un protocole de communication mis au point pour permettre le transfert de pages web entre serveurs et navigateurs web.

³⁸⁵ Cela grâce aux *Uniform Resource Locator* (U.R.L.) qui permettent de les identifier et de les adresser individuellement.

³⁸⁶ T. J. Berners-Lee a été anobli par la Reine d'Angleterre. On notera également que ses parents, tous deux mathématiciens, firent partie des programmeurs qui travaillèrent à la conception des logiciels du *Ferranti Manchester Mark I*, dans les années 50.

³⁸⁷ Source *International Data Corporation*.

³⁸⁸ Source *Internet World Stats*.

médiocre) de tentatives de captation par les mondes politiques et marchands, le phénomène n'a eu de cesse de monter en puissance en mobilisant ses propres ressources (toujours plus colossales et perfectionnées) pour alimenter sa formidable et irréprouvable entreprise de maillage de la planète et constituer ainsi le village global dont l'avènement avait été prédit par H. Marshall McLuhan au début des années 60. Si le « médium est le message » et si l'omniprésente télévision est un média froid, comme l'avait affirmé le même McLuhan, alors Internet et le Web, à l'inverse de cette dernière (qu'ils ont au passage intégrée), sont par nature des média « chauds ». Les processus technologiques qui sous-tendent l'économie générale du Web *impliquent* en effet une participation active et constante de ceux que l'on nomme désormais internautes³⁸⁹. Que ce soit dans l'acte de simple consultation de pages web ou dans celui du partage de ressources (création d'un site, mise en ligne d'un contenu, échange de fichiers, etc.), l'attention et la contribution de l'internaute sont en effet sans cesse sollicitées par le caractère interactif des mécanismes fondamentaux mis en œuvre sur le médium électronique. Par nature la logique des composantes hypertextuelle et multimédia du Web incite l'utilisateur à arpenter les espaces virtuels offerts bien au-delà des objectifs qu'il s'était originellement fixé. Presque toujours motivée par une finalité précise, l'entreprise de recherche devient alors errance rebondissante, plongée semi vagabonde au sein des arborescences foisonnantes et démultipliées qui forment la structure dense et invisible de la toile mondiale. Ce faisant, la masse informatique formidable que représente la somme des requêtes individuelles formulées à chaque instant par les internautes du monde entier participe au premier chef des processus de détermination de l'état courant du WWW et de l'élaboration de sa dynamique. Qui plus est puisque chacun – qu'il oeuvre en son nom ou qu'il agisse pour le compte d'une quelconque communauté - est désormais susceptible d'apporter ou de retirer de manière presque instantanée sa pierre à l'édifice, cette Babel synthétique aux frontières toujours fluctuantes et à l'architecture colossale mais infixée, possède à l'instar des plus grandes mégapoles planétaires ses espaces publics et privés, ses flèches et ses tréfonds, ses merveilles et ses cloaques. Car il convient ici de ne pas s'y tromper. S'il ne fait strictement aucun doute qu'Internet est devenu au fil des années un puissant vecteur pour la conduite des affaires commerciales, il subsiste au sein du réseau des réseaux de nombreuses zones incontrôlées (et très certainement incontrôlables), où le meilleur côtoie fréquemment et malheureusement le pire. Nous sommes peu désireux ici d'évoquer ce que l'on ne saurait supporter. Cependant il est nécessaire de ne jamais perdre de vue le fait qu'Internet n'est pas

³⁸⁹ Cette désignation même sous-entend à un certain niveau que l'on voyage un peu dans le « cyberspace » comme les astronautes, les cosmonautes ou les spatonautes explorent la banlieue spatiale terrestre.

seulement cette Agora moderne et transparente que ses catéchumènes les plus enflammés se sont empressés de louer peut-être un peu vite. Echappant à la fréquentation des masses et au contrôle des instances officielles, exigeant la possession et la maîtrise de codes – aux sens informatique et social du terme - le village global virtuel possède aussi ses profondeurs labyrinthiques où des zones de contestation, de conspiration et de lutte – de tous types, légitimes ou non - jouxtent les secteurs interdits où règnent trafics divers, turpitude et horreur.

De la même façon qu'il existe un Internet « officiel » – en l'espèce celui que tout un chacun se trouve à même de fréquenter quotidiennement – il existe aussi un *deep web*³⁹⁰ que l'on peut assimiler à la somme de toutes les pages non répertoriées par les moteurs de recherche et les robots d'indexation courants, et un *darknet* – un internet obscur – formé par l'ensemble des réseaux et des sites plus ou moins privés³⁹¹ qui subsistent sous la surface de l'Internet que nous connaissons tous. De fait, et à supposer que l'on accepte de mettre ici en suspens les questions de morale, d'éthique et de légalité que soulève à l'évidence le contenu de certains sites du net souterrain, force est faite de constater que la toile a depuis toujours représenté un lieu privilégié de revendication sociale et politique. Transfrontaliers, potentiellement insaisissables et incontrôlables puisque déplaçables, modifiables, supprimables et reproductibles à souhait, les sites web sont devenus en l'espace de quelques années le lieu et le mode d'expression de tous les militantismes et de toutes les propagandes. En dépit des nombreux abus constatés – les extrémistes en tous genres ont rapidement et parfaitement compris tout l'intérêt qu'ils pouvaient tirer de l'exploitation de cette nouvelle technologie - on peut certainement affirmer qu'Internet, outil de libre diffusion de l'information par excellence, a prolongé en l'incarnant littéralement la pensée et l'action des hackers des années 60 et 70. Ainsi ce n'est certes pas un hasard si le terme hacktivism³⁹² figure aujourd'hui en bonne place dans le lexique spécifique d'Internet. Une chose ne doit évidemment pas être omise ici. Entre 1970 et le début des années 80, une révolution technologique se produisit qui favorisa non seulement l'apparition d'une nouvelle informatique – avec ses machines, ses logiciels, ses pratiques et ses codes - mais aussi celle d'une nouvelle façon de se rapporter à elle et à ses artefacts. Cette nouvelle informatique³⁹³ dont les hackers, à bien des égards, furent tout à la fois les hérauts et les acteurs s'élabora sur

³⁹⁰ Littéralement « web profond ».

³⁹¹ L'accès des sites qui forment le *darknet* est fréquemment réservé et selon le cas, leur contenu est parfois crypté.

³⁹² Ce néologisme a été formé en contractant les termes hacker et activisme. Il renvoie à une forme de militantisme mêlant virtuosité technologique – il est par exemple nécessaire de savoir briser les protections des sites adverses pour pouvoir modifier le contenu de leur page d'accueil – et engagement politique ou religieux.

³⁹³ La troisième si l'on suit la classification proposée par Philippe Breton dans *Une Histoire de l'Informatique*.

fond de bouleversements politiques et sociétaux formidables. Elle se construit aussi et surtout en totale opposition avec les valeurs et les habitudes fondamentales du modèle opaque, impénétrable et centralisateur qui, depuis la fin des années cinquante, avait prévalu au cœur des logiques informatiques industrielle et étatique. Le micro-ordinateur qui a joué et joue encore un rôle plus qu'essentiel dans le processus de croissance d'Internet est certainement le produit le plus remarquable de cette troisième informatique en même temps qu'il représente l'aboutissement logique des multiples développements conceptuels et technologiques réalisés depuis la fin des années 40 dans le domaine de l'informatique et de l'électronique. Nous allons à présent étudier les conditions technologiques, industrielles et sociétales qui ont rendu possible l'apparition d'un tel instrument, d'abord en France, puis aux Etats-Unis. Nous chercherons ensuite à comprendre quel a été l'impact véritable du micro-ordinateur sur la société et comment son apparition a transformé l'informatique et son industrie.

3. La micro-informatique et le micro-ordinateur.

3.1. Les conditions technologiques, sociétales et industrielles qui ont déterminé et autorisé la mise au point du micro-ordinateur.

Dans un article intitulé « S P A C E W A R, Fanatic Life and Symbolic Death Among the Computer Bums », paru le 7 décembre 1972 dans le numéro 123 de *Rolling Stone* (le principal organe de presse de la contre-culture hippie), Stewart Brand, le rédacteur, se laissait aller à la prédiction suivante :

« *Ready or not, computers are coming to the people. That's good news, maybe the best since psychedelics* ³⁹⁴ ».

Le sujet de l'article de S. Brand, les *Intergalactic Spacewar Olympics*, concernait le jeu vidéo de combat spatial *SPACEWAR* - assurément le premier du genre – et les personnes – les hackers – qui nuitamment s'y adonnaient sans retenue, en utilisant les mini-ordinateurs des laboratoires universitaires où la plupart du temps, ils travaillaient ou bien faisaient leurs études. A l'instar du système informatique du *Stanford Artificial Intelligence Laboratory* (S.A.I.L.), le laboratoire d'I.A. fondé en 1963 par John McCarthy où S. Brand avait réalisé

³⁹⁴ Stewart Brand, « S P A C E W A R, Fanatic Life and Symbolic Death Among the Computer Bums », in *Rolling Stone*, n°123, 7 décembre 1972.

son reportage, les systèmes sur lesquels ces gens aux mœurs singulières jouaient sans relâche sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis étaient dans leur très grande majorité des cas des mini-ordinateurs P.D.P., construits par la société D.E.C. Auteur et éditeur du célèbre *Whole Earth Catalog* Stewart Brand était une icône de la *Beat Generation* et un acteur engagé de la scène psychédélique californienne. En 1962, alors qu'il était étudiant au *San Francisco Art Institute and Photography*, Brand avait ainsi pris part aux expériences (légal) que l'*International Foundation for Advanced Study* de *Menlo Park* conduisait alors sur les effets hallucinogènes induits par l'absorption de L.S.D. On pourrait encore ajouter qu'en 1966, soit quatre années après ses premières expériences avec le fameux psychodysléptique de synthèse, il avait reçu son *Acid Test Diploma* des mains de Neal Cassady, une autre figure légendaire du psychédéisme hippie avec Aldous Huxley et Timothy Leary. Dès lors que l'on sait cela, on se trouve en position de beaucoup mieux comprendre le sens de la seconde partie de la citation produite ci-dessus. De façon quelque peu implicite S. Brand ne fait en effet rien d'autre que de placer ici sur le même plan les bénéfices politiques et sociétaux attendus de l'arrivée prochaine des ordinateurs dans les foyers – selon son pronostic et la tournure de temps employée pour le formuler cette arrivée est justement imminente et inéluctable – et ceux, largement relayés et transmués par le mouvement contestataire qui naquit sur les campus américains au cours de la décennie 60, provoqués par la consommation de produits psychotropes naturels ou synthétiques. Ce parallèle réalisé par Stewart Brand entre les effets psychostimulants des substances « révélatrices de l'âme », et ceux qui, selon lui, devaient inévitablement découler du surgissement de l'ordinateur au sein de la sphère privée est intéressant à plus d'un titre. D'abord parce qu'en plus d'être un leader reconnu de la mouvance psychédélique et un adepte averti des transes chimiquement induites, l'auteur du *Whole Earth Catalog* possédait aussi une excellente connaissance des ordinateurs. Compte tenu du caractère radical de son engagement politique, de ses prises de position sociales et éthiques, il est évident que les systèmes informatiques n'intéressaient pas S. Brand pour leurs qualités de « broyeurs de nombres ». C'était plutôt la perspective d'employer ces machines dans le cadre d'une entreprise de libre diffusion de l'information au sein de la population – un projet qui dans le fond consistait à tenter de retourner l'ordinateur contre les organisations gouvernementales et commerciales qui l'utilisaient de façon plus ou moins anti-démocratique – qui le séduisait ici. Ensuite, et surtout, ce sont les potentialités que ces instruments semblaient receler pour l'accroissement et le renforcement du développement de l'individu qui le fascinaient.

En 1968, fort de ces centres d'intérêts, Brand prit une part active à la conception de la démonstration technologique que le Dr. Douglas C. Engelbart (S.R.I. *Augmentation Research Center*) était en train de mettre sur pied afin de présenter son *OnLine System* (N.L.S.) lors de la *Fall Joint Computer Conference* qui devait se tenir au *Convention Center* de San Francisco le 8 décembre de cette même année. Stewart Brand participa également à cette démonstration historique³⁹⁵, au cours de laquelle on présenta pour la première fois au public la souris, ainsi que les principes de l'hypertexte, de la vidéoconférence, de l'environnement graphique à fenêtres (*Graphical User Interface*), et du courrier électronique. Ces innovations avaient été mises au point et/ou perfectionnées dans le cadre des travaux effectués par Engelbart et son équipe au *Stanford Research Institute Augmentation Research Center*. Conçues pour agir comme autant d'interfaces entre l'homme et la machine, ces composantes logicielles et matérielles inédites se caractérisaient d'abord et avant tout par leur ergonomie poussée et l'intuitivité avec laquelle s'effectuait leur prise en main. Toutes entières orientées vers l'utilisateur, elles étaient destinées à soulager ce dernier de la pénibilité habituellement associée à l'usage de l'ordinateur. Ainsi libéré des contraintes techniques imposées par la relative lourdeur de la machine et de ses logiciels, l'homme devait désormais pouvoir pleinement profiter des pouvoirs offerts par les systèmes informatiques. Rendue simple et plaisante grâce à la présence de ces nouveaux dispositifs, l'utilisation de l'ordinateur allait donc enfin permettre à l'homme d'*augmenter son intelligence*. Pour Stewart Brand, il semble que l'ordinateur ait été une sorte de pendant ou d'analogie technologique aux substances psychotropes régulièrement consommées dans les milieux qu'il fréquentait. Ainsi, si la drogue – le L.S.D. en particulier – ouvrait les portes de la conscience en démultipliant les activités cérébrale et perceptive de l'homme, l'ordinateur, une fois débarrassé de ses inconvénients pratiques, devait permettre à ce dernier d'accroître ses capacités intellectuelles. La machine était donc vue ici à la manière d'un *suramplificateur d'intelligence*. Parce qu'il appartenait simultanément à deux groupes qui jouèrent un rôle décisif à la fois dans le processus d'apparition du micro-ordinateur et dans celui de la constitution de la culture informatique – nous voulons parler ici de la communauté des hippies/contestataires et de celle des visionnaires/hackers – Stewart Brand fut un des premiers à comprendre et à proclamer que l'ordinateur, « qu'on le veuille ou non », était sur le point de « venir aux gens ». Le fait d'être membre d'un mouvement libéral – voire libertaire – où la contestation politique s'accompagnait quasi systématiquement d'un militantisme éclairé en faveur d'une totale

³⁹⁵ On ne tarda pas à se référer à la démonstration d'Engelbart comme à la « *Mother of All Demos* », c'est-à-dire la mère de toutes les démonstrations.

circulation de l'information dans le champ social, et celui de posséder des contacts au sein de quelques-uns des plus prestigieux laboratoires informatiques du pays – ici le *Stanford Artificial Intelligence Laboratory* et l'*Augmentation Research Center* - permirent sans doute à S. Brand d'acquérir les connaissances techniques et le recul indispensables pour comprendre ce qui était sur le point d'advenir. Qu'une frange politiquement et technologiquement avant-gardiste de la population se montrât effectivement prête pour l'arrivée des systèmes informatiques individuels et que, par ailleurs, des techniques expérimentales censées faciliter grandement l'usage de l'ordinateur aient été mises au point dans telle ou telle structure universitaire représentaient assurément autant de conditions nécessaires pour que le micro-ordinateur puisse être conçu à l'orée des années 70. Toutefois, pour essentielles qu'elles aient pu être, ces conditions n'étaient pas suffisantes.

D'autres déterminants participant des ordres technologique, politique ou social doivent impérativement être pris en compte ici afin que l'on se trouve en mesure de rendre compte adéquatement de l'apparition du micro-ordinateur. Sans prétendre à aucune exhaustivité et avant de les examiner dans le détail, nous allons procéder ci-dessous à leur énumération.

- Pour la première moitié des années 70 :

- 1) La mise au point des mémoires en matériau semi-conducteur (notamment celle du modèle *i1103* à la fin de l'année 1970), du microprocesseur (*Intel 4004* et *8008*, respectivement en 1971 et 1972), ainsi que la baisse rapide et spectaculaire du coût de ces composants à très fort coefficient d'intégration.
- 2) La production de systèmes informatiques qui, s'ils n'étaient pas reconnus comme étant des micro-ordinateurs par leurs concepteurs et leurs utilisateurs, en étaient néanmoins d'un point de vue purement technique. L'existence et la disponibilité de telles machines, dès les années 1972-73, démontrent clairement leur faisabilité et leur viabilité technologiques.
- 3) Suite aux graves problèmes sociaux et politiques que l'engagement américain au Vietnam suscite aux U.S.A., le *Department of Defense* commence à réduire notablement le montant des financements qu'il

accordait depuis près de trois décennies aux universités et aux centres de recherche du pays. Cette mesure historique amène un certain nombre de chercheurs de premier ordre à rejoindre des entreprises ou des laboratoires privés.

- 4) Le *Xerox Palo Alto Research Center* est créé et profite de la réduction de budget annoncé par le *DoD*. C'est au sein de ce centre de recherche légendaire que des technologies informatiques révolutionnaires seront imaginées et/ou perfectionnées.
- Pour la seconde moitié des années 70 :
 - 1) Le rôle essentiel joué par les électroniciens amateurs et leurs magazines spécialisés. De même, l'importance souvent négligée des nombreux possesseurs de calculatrices électroniques programmables (il s'agissait là aussi d'une nouveauté).
 - 2) La commercialisation (le plus souvent par correspondance, en kit ou pré assemblé) des premiers micro-ordinateurs (comme le *Schelbi-8H* ou le légendaire *Altair 8800*). Dotés de microprocesseurs et de mémoires en semi-conducteurs, ces systèmes seront le plus souvent vendus pour une somme inférieure à 500 dollars.
 - 3) L'importance croissante revêtue ici par le logiciel. L'apparition des premières applications informatiques domestiques, le portage de langages de programmation et/ou de systèmes d'exploitation intégrés à interpréteurs de commande (tels BASIC, CP/M, ou MS-DOS) vers cette nouvelle classe de machines favoriseront la diffusion du micro-ordinateur dans la société en le rendant utile et facile d'usage – donc attractif - pour des catégories de population qui, peu attirées par les aspects technologiques de l'instrument, ne s'y seraient peut-être pas intéressées autrement. Tandis que des groupes d'utilisateurs particuliers mettront sur pied des clubs d'entraide et de partage de ressources – ils donneront du même coup naissance au phénomène du piratage

informatique - un nouveau marché naîtra qui fera bientôt l'immense fortune d'entreprises de programmation comme *Microsoft* ou *Lotus*.

- 4) Les nouveaux micro-ordinateurs, moins intimidants et plus performants que leurs prédécesseurs, qui font leur apparition en 1976-77. Ce sont notamment les *Apple I* et *II*, le *Commodore PET* et le *Tandy Radio Shack TRS-80* qui vont réellement propulser la micro-informatique en en faisant une activité grand public.
- 5) La récupération par certaines sociétés informatiques – *Apple* sera la première d'entre elles avec les micros *Lisa* et *Macintosh* – de certaines des avancées technologiques réalisées au cours de la première moitié des années 70 au *Xerox Palo Alto Research Center*.
- 6) La surprenante entrée en lice d'I.B.M. qui, renonçant pour le coup à ses « ancestrales » techniques de production intégrées et à ses méthodes managérielles rigides et verticales, va introduire et commercialiser en 1981 le *Personal Computer*.
- 7) Le modèle de production de l'I.B.M. P.C. étant « ouvert » - pour la première fois le géant de l'informatique fait ici massivement appel à des fournisseurs et ne produit pas lui-même les pièces de son micro-ordinateur – des sociétés, telles *Compaq*, copient la machine et en commercialisent des clones à des prix attractifs.
- 8) Avec la puissance du C.P.U. et la capacité de stockage des mémoires de masse, le logiciel (c'est-à-dire le système d'exploitation et les applications informatiques) représente désormais un des éléments essentiels sur les micro-ordinateurs. Les enjeux financiers sont désormais tels qu'une véritable guerre industrielle fait rage entre les sociétés d'équipements informatiques et de programmation qui ont survécu à l'apparition du P.C., du *Macintosh* et de l'O.S. *Windows*. Au rythme des alliances et des trahisons, des chutes et des retours sur le

devant de la scène, *Apple*, *I.B.M.*, *Microsoft*, *Intel*, *A.M.D.* et les grand cloneurs de P.C. sont les acteurs majeurs de cette bataille économique.

3.2. L'invention du microprocesseur.

Le premier microprocesseur de l'histoire, une puce uniquement capable de travailler sur des séquences de 4 bits qui était connue sous la sobre désignation numérique « 4004 », a été introduit sur le marché mondial en 1971, par la société *Intel*. On se souvient que cette jeune entreprise à l'origine spécialisée dans la production de mémoires en matériau semi-conducteur avait été fondée en 1968 par Robert N. Noyce et Gordon Moore. Les deux hommes étaient des anciens de la *Shockley Semiconductor* et de la *Fairchild Semiconductor*. Les conditions dans lesquelles le microprocesseur 4004 a été créé sont fort bien connues de tous. Aussi nous contenterons-nous ici de les rappeler de manière abrégée. En 1969, la société *Busicom*, un fabricant japonais de calculateurs électroniques manuels, prit contact avec *Intel* pour lui confier la fabrication d'un jeu de puces spécialisées dont les plus sophistiquées devaient être capables d'effectuer des fonctions mathématiques avancées. A l'époque la principale activité d'*Intel* était la conception de mémoires informatiques intégrées, pas celle de puces arithmétiques et logiques. En effet les dirigeants de l'entreprise américaine ne croyaient que très modérément au potentiel de ce marché en raison du peu de débouchés qu'il offrait alors. Ceci est le principal motif pour lequel ils n'avaient pas cherché à s'aventurer plus avant dans ce domaine. Si en définitive ils répondirent de manière favorable à la requête émise par la firme japonaise, c'est parce qu'il s'agissait d'une commande spéciale, intéressante aussi bien d'un point de vue financier que technologique. *Busicom* se trouvant sur le point d'introduire sur le marché une nouvelle gamme de machines électroniques, il était prévu que chacune des puces commandées au faiseur américain vienne équiper une calculatrice en particulier – en fonction du type de clientèle visé toutes ne devaient évidemment pas posséder la même puissance ni être capables d'accomplir les mêmes fonctions arithmétiques - au sein de ladite gamme. La direction d'*Intel* confia le design de cette famille de chips à l'un de ses employés, l'ingénieur Marcian E. Hoff. Le tour de force réalisé ici par Marian E. Hoff fut d'abandonner la solution technologique envisagée au départ, laquelle consistait à mettre au point une puce arithmétique spécialisée³⁹⁶ pour chaque modèle de calculatrice et, en lieu et place de cela, de privilégier celle qui consistait à concevoir une

³⁹⁶ C'est-à-dire une puce avec un certain nombre de fonctions mathématiques câblées électroniquement (donc câblées de façon permanente).

puce générique *programmable* pour équiper tous les modèles de la future gamme *Busicom*. Inspirée de l'expérience qu'Hoff avait eue avec des mini-ordinateurs à jeu réduit d'instructions – notamment le D.E.C. P.D.P.-8 - cette approche était toute à la fois économique et élégante. Économique car avec elle, il n'était plus nécessaire de designer plusieurs puces spécifiques, mais une seule, au pouvoir « universel ». En termes de temps et d'argent, les gains qu'une pareille opération devait permettre de réaliser promettaient bien entendu d'être extrêmement intéressants. Élégante ensuite parce qu'en programmant adéquatement cette puce générique concentrant au cœur de ses circuits électroniques l'essentiel des fonctions logico-mathématiques et informatiques élémentaires habituellement prises en charge par des ordinateurs de petite puissance, on s'assurait que la totalité des besoins que pourraient rencontrer les différentes catégories d'utilisateurs de la future famille de calculatrices *Busicom* serait intégralement couverte. Ainsi parce qu'on pouvait la programmer précisément en fonction de ce que l'on désirait accomplir, le même puce *Intel* pouvait aussi bien servir à réaliser des calculs simples ou complexes. Il suffisait seulement qu'elle dispose d'une capacité mémoire suffisante. Or c'était là une chose à laquelle la société *Intel* pouvait aisément pourvoir. En somme, il s'agissait ici une nouvelle fois de transférer la complexité des opérations que l'on souhaitait voir effectuées par la machine du hardware au software, de la circuiterie figée dans l'épaisseur matérielle du système au logiciel impalpable enregistré dans les micro espaces binaires de sa mémoire. La logique câblée dans la puce *Intel* serait minimale, à l'image des répertoires réduits d'instructions rencontrés sur certains ordinateurs, et c'est par le jeu de la programmation, donc en dernier lieu de la combinatoire d'ordres informatiques élémentaires, que les acquéreurs de calculatrices *Busicom* se trouveraient effectivement en mesure d'engendrer avec elles toutes sortes de fonctions et de résultats mathématiques.

C'est un autre ingénieur d'*Intel*, Federico Faggin³⁹⁷, qui, assisté, par Stan Mazor, concrétisa les vues de Marcian E. Hoff. Le résultat de ces travaux de développement fut une famille de circuits intégrés T.T.L. (*Transistor-Transistor Logic*) composée de 4 unités. Il y avait bien sûr un microprocesseur 4 bits pourvu de plusieurs registres – on le baptisa du nom d'*Intel* 4004 - ainsi que trois chips auxiliaires. Ces « composants d'appui » étaient une mémoire vive à accès aléatoire (la R.A.M. *i4002* de 320 bits de capacité), une mémoire morte (la R.O.M. *i4001* de 2Kbits de capacité), et la puce *i4003* (traitement des données sur 10 bits), spécifiquement câblée pour assurer la gestion des processus d'entrée/sortie des informations.

³⁹⁷ En 1974, Federico Faggin démissionna d'*Intel* pour aller créer sa propre société de microélectronique - *ZiLOG* - spécialisée dans la conception et la production de microprocesseurs.

L'Intel 4004 et ses puces complémentaires ne formant en définitive rien de plus qu'un ordinateur très fortement intégré – du point de vue technologique on était donc très loin de la commande initiale de *Busicom* - il est évident que l'on pouvait envisager de traiter avec elles toutes les procédures pouvant recevoir une définition algorithmique (pourvu bien entendu que l'on dispose d'une mémoire suffisante). Les deux éléments déterminants que constituaient la haute généralité de la puce 4004 et le caractère assez incertain du secteur économique où *Busicom* concentrait l'essentiel de son activité commerciale poussèrent bientôt Robert Noyce à proposer un accord marchand à la compagnie japonaise. *Intel* se proposait ainsi de réduire le coût auquel elle vendait les unités 4004 à *Busicom* en échange de l'obtention du droit à commercialiser cette puce pour son propre compte. Une des clauses de cette entente prévoyait évidemment qu'*Intel* ne serait pas autorisée à céder le microprocesseur à des entreprises spécialisées dans la vente de machines à calculer électroniques. La compagnie *Busicom* ne se trouvant pas réellement en position de refuser l'offre que lui faisait *Intel*³⁹⁸, elle l'accepta.

Dans le courant du mois de novembre 1971 *Intel* débuta une campagne publicitaire basée sur le slogan « *L'annonce d'une ère nouvelle pour l'électronique intégrée* », afin de promouvoir son microprocesseur *i4004*. Présenté comme « *un ordinateur microprogrammable [logé] sur une puce*³⁹⁹ », le *i4004* ou *Micro Computer System 4*⁴⁰⁰ fit sa première apparition officielle dans *Electronic News*, une revue spécialisée qui s'adressait en priorité aux électroniciens professionnels et amateurs. Le premier microprocesseur de l'histoire possédait les caractéristiques techniques suivantes :

- Fréquence de cadencement maximale: 740 Kilohertz.
- Possibilité d'exécuter jusqu'à 60000 instructions par seconde.
- 46 instructions (codées sur 8 bits).
- Traitement des données binaires par séquences de 4 bits.
- 16 registres offrant une capacité individuelle de stockage de 4 bits.
- Capacité d'adressage de l'espace mémoire réservé aux programmes : 1 KB.
- Capacité d'adressage de l'espace mémoire réservé aux données : 4 KB.

³⁹⁸ En effet la guerre des calculatrices commençait à faire rage parmi les fabricants du monde entier. Dans ces conditions difficiles, l'obtention d'une baisse sur le coût d'achat des microprocesseurs 4004 était synonyme de précieuses économies pour le fabricant japonais.

³⁹⁹ In *Electronic News*, 15 novembre 1971.

⁴⁰⁰ L'appellation *Micro Computer System 4-bit* (MCS-4 en abrégé) était employée pour désigner la famille des chips 4000.

- 2300 transistors à effet de champ P.M.O.S. en silicium répartis sur une surface de 10,62 millimètres carrés.
- Conditionnement dans un boîtier en céramique D.I.P. (*Dual In-line Package*) à 16 broches.
- Prix de vente initial lors de l'introduction sur le marché: environ 200 dollars.

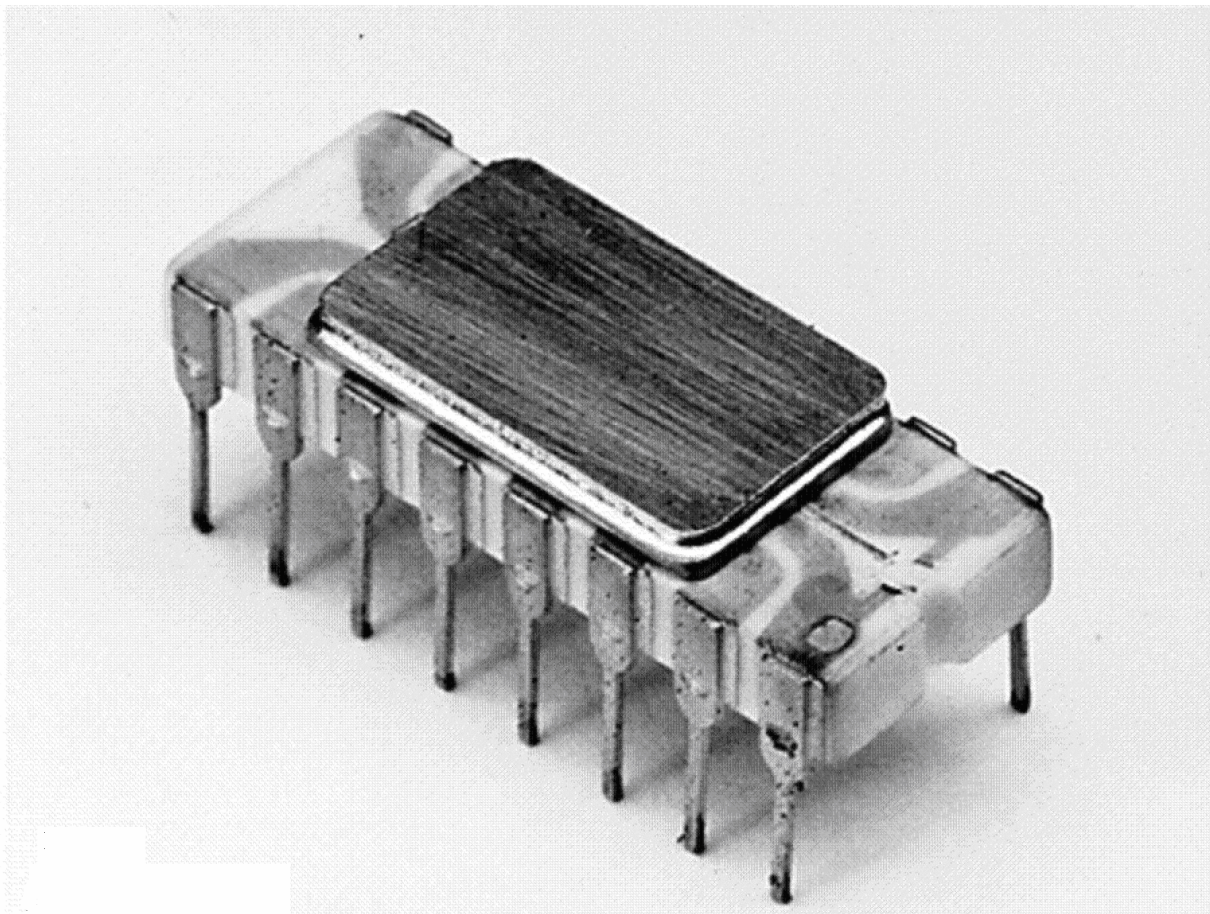


Photo 7 : le premier microprocesseur de l'histoire, l'Intel i4004, introduit par le fabricant américain au cours du mois de novembre 1971. Image Courtesy of the Intel Corporation.

On se remémorera à ce point les caractéristiques générales de l'*Electronic Numerical Integrator And Computer* (E.N.I.A.C.). Le premier grand ordinateur électronique de l'histoire pesait 27 tonnes, ses dimensions étaient de 2,4 m en hauteur, de 0,8 m en profondeur et de 30 m en longueur, il occupait 167 m² de surface au sol et consommait 150 KW de puissance. Sa fréquence d'opération, elle, était de 100 KHz. Quant à la somme que les autorités américaines se trouvèrent dans l'obligation de déboursier pour assurer son développement et sa fabrication, elle devait s'élever à près de 500000 dollars. Lorsque l'on compare ces données techniques,

qui concernent un Léviathan imaginé et réalisé en pleine deuxième guerre mondiale, avec celles du microprocesseur *i4004*, un « *ordinateur sur une puce* » fabriqué à l'orée de la décennie 70, on se trouve en mesure de saisir de manière véritablement concrète tout le chemin parcouru et l'ampleur des progrès conjointement réalisés par les industries informatique et microélectronique, depuis la fin des années quarante. Seulement 25 ans après l'entrée en service du monstrueux calculateur à lampes de la *Moore School of Electrical Engineering*, la circuiterie d'un C.P.U. 7 fois plus puissant que le cœur logique de l'E.N.I.A.C. avait été concentrée sur une dizaine de millimètres carrés. L'ordinateur proprement dit, c'est-à-dire la chip *i4004* et ses puces auxiliaires, n'occupait quant à lui que quelques centimètres carrés. Accessible à n'importe qui, le coût de ce matériel n'était que de quelques centaines de dollars. Alors même que ses équipes travaillaient encore à la conception du microprocesseur *i4004*, la société *Intel* conclut un accord de développement avec la compagnie américaine *Computer Terminal Corporation*, dont la spécialité était la fabrication de terminaux informatiques. Il était question ici de la mise au point d'un microprocesseur TTL destiné à équiper un terminal informatique programmable, le *Datapoint 2200*. La conception de cette puce fut confiée à l'équipe qui avait dessiné et était en train de réaliser le circuit *i4004*, c'est-à-dire Marcian E. Hoff, Stanley Mazor et Federico Faggin. Puisque le nouveau microprocesseur commandé par la *Computer Terminal Corporation* avait pour vocation d'être interfacé avec des équipements informatiques – ce qui supposait une rapidité d'opération que n'exigeaient évidemment pas de simples calculatrices électroniques – les ingénieurs d'*Intel* imaginèrent une puce capable de traiter des séquences de données de 8 bits. Finalement, et non sans avoir été contrainte auparavant de surmonter de nombreuses difficultés d'ordre technique, la société *Intel* se trouva en mesure d'annoncer la disponibilité prochaine de son microprocesseur *i8008* au mois d'avril 1972. A l'instar de l'*i4004*, la puce *i8008* était présentée dans un boîtier D.I.P. en céramique⁴⁰¹. Sur le plan architectural, et compte tenu de la spécificité de son assignation originale, l'*i8008* différait toutefois assez largement de l'*i4004*. Pour commencer c'était un microprocesseur (le premier de l'histoire à faire cela) qui possédait la faculté de pouvoir manipuler des blocs d'information sur 8 bits. L'*i8008* contenait 3500 transistors P.M.O.S. en silicium. Son répertoire d'instructions comportait 48 ordres et il était cadencé à 500 KHz⁴⁰². En termes de capacité de traitement d'instructions à la seconde, le deuxième microprocesseur conçu par *Intel* était un peu moins performant que le

⁴⁰¹ Son brochage comportait cependant 18 connecteurs, soit deux de plus que celui de l'*i4004*.

⁴⁰² *Intel* proposa par la suite une deuxième version de l'*i8008*. Celle-ci était plus rapide que la première puisqu'elle était cadencée à la fréquence de 800 KHz.

premier. Cependant, étant donné que l'i8008 traitait les données sur 8 bits (contre 4 bits pour l'i4004), sa capacité d'adressage de la mémoire (en R.O.M. et en R.A.M.), était largement supérieure à celle du microprocesseur i4004. Dans l'absolu, les performances de l'i8008 étaient donc meilleures que celles offertes par son prédécesseur immédiat. Si elle ne représenta pas à proprement parler un tournant technologique dans l'histoire commençante du microprocesseur, la mise au point de l'i8008 permit à *Intel* de tester et d'asseoir des principes conceptuels et techniques qui s'avèrent déterminants pour le développement des futures puces informatiques.

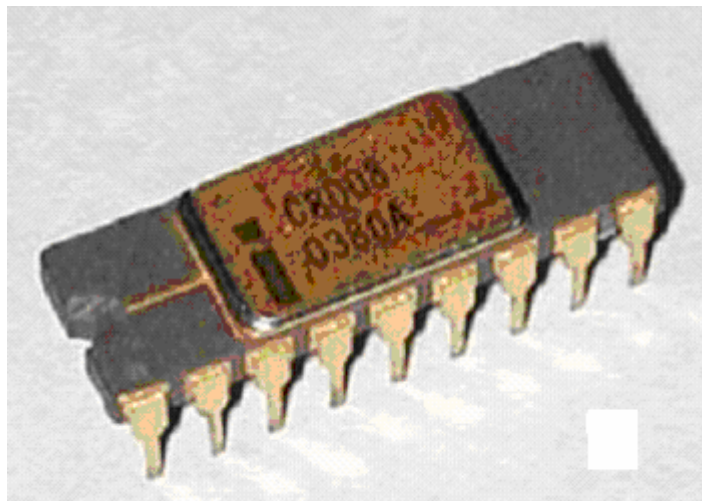


Photo 8 : le microprocesseur 8 bits i8008, apparu sur le marché en avril 1972. Image Courtesy of the Intel Corporation.

Par le jeu d'une répétition somme toute curieuse, il se produisit peu ou prou avec le commanditaire de l'i8008 ce qui s'était déjà passé avec celui de l'i4004. Arguant du fait que le microprocesseur 8 bits avait été livré trop tard et que ses performances ne correspondaient pas à celles qu'elle avait initialement réclamées, la société *Computer Terminal Corporation* refusa le produit. Elle fut néanmoins d'accord pour conclure un compromis commercial avec *Intel*, dans lequel il était indiqué qu'elle autorisait le concepteur de puces à vendre librement le microprocesseur i8008. De fait celui-ci reçut un accueil plutôt favorable de la part des acheteurs d'unités de calcul intégrées. La firme japonaise *Seiko* l'employa pour construire un calculateur sophistiqué tandis que d'autres compagnies – avant d'y revenir plus loin et de manière plus détaillée on pourra par exemple citer la *Necton Bilinium Incorporated*, la *Scelbi Computer Consulting Company*, la *MCM Computers* et la *Réalisation d'Études Électroniques (R.2.E.)* – y recoururent afin d'équiper les tout premiers micro-ordinateurs de l'histoire. Le succès international rencontré par l'i8008 incita son constructeur à initier une synergie entre

son activité de production de microprocesseurs et celle de mémoires en semi-conducteur (notamment la puce mémoire *i1103*). *Intel* reçut également un certain nombre de suggestions de la part des utilisateurs de l'*i8008*. Si de manière générale le microprocesseur tendait à les satisfaire, ceux-ci souhaitaient néanmoins pouvoir disposer d'un jeu d'instructions étendu et d'un mode d'interfaçage amélioré. Ils désiraient également voir la vitesse de fonctionnement et les capacités de gestion d'entrée/sortie de l'*i8008* augmentées.

L'accueil favorable que les industriels réservèrent au microprocesseur *i8008* et les diverses doléances ou critiques que ceux-ci ne se privèrent pas de formuler à l'adresse de son fabricant conduisirent Federico Faggin à proposer à Leslie Vadasz, le superviseur des équipes de développement de la société *Intel*⁴⁰³, de concevoir une version améliorée de la puce 8 bits. Faggin ambitionnait de réaliser cette nouvelle évolution de l'*i8008* en faisant appel à la technologie N.M.O.S. Facile à mettre en œuvre tout en restant peu coûteuse, cette dernière permettait de graver un nombre beaucoup important de transistors au mm² que la technologie P.M.O.S. Dans l'hypothèse où le processus de conversion du microprocesseur *i8008* à la technologie N.M.O.S. aurait été validé, les ingénieurs estimaient que la vitesse de fonctionnement de la puce pourrait être doublée sans qu'il soit a priori nécessaire de réviser son design logique. Assez vite cependant, il apparut que le portage de l'*i8008* vers la technologie N.M.O.S. exigerait que le dessin des masques utilisés pour la gravure de ses circuits transistorisés soit entièrement révisé. Partant, Federico Faggin décida de mettre à profit cette situation pour corriger les imperfections déclarées du microprocesseur *i8008*. Ainsi un des défauts les plus communément dénoncés par les acheteurs de l'*i8008*, et que les modifications structurelles que Faggin envisageait désormais d'apporter devaient permettre de corriger, était son incapacité à adresser directement les cellules des puces mémoire auquel il était connecté⁴⁰⁴. Cette révision (profonde) de l'architecture de l'*i8008* – la compatibilité du code source des deux microprocesseurs reflétait d'ailleurs leur lien de parenté étroit – est ce qui permit de donner naissance au microprocesseur 8 bits *i8080*. A plusieurs reprises son concepteur⁴⁰⁵ a eu l'occasion de souligner l'importance historique de la puce *i8080*, ainsi que l'impact formidable qu'elle avait eue sur l'évolution de l'informatique et celle de la microélectronique. Federico Faggin a ainsi affirmé que « *le 8080 avait réellement créé le marché des microprocesseurs. Le 4004 et le 8008 l'avaient suggéré mais le 8080 l'a fait*

⁴⁰³ Avec Gordon Moore et Andy Grove, Leslie Vadasz avait également co-fondé *Intel*.

⁴⁰⁴ Pour pouvoir accéder à des informations enregistrées en mémoire, le microprocesseur *i8008* devait auparavant stocker l'adresse mémoire de ces données dans deux de ses registres (H et L). Ce n'est qu'après avoir systématiquement effectué cette opération – laquelle contribuait évidemment à ralentir le système – que la puce pouvait traiter ces informations.

⁴⁰⁵ Federico Faggin fut assisté ici par deux ingénieurs d'*Intel*, Stanley Mazor et Masatoshi Shima.

devenir réalité ». Le contenu de cette déclaration est parfaitement exact et nullement exagéré. Techniquement, les puces *i4004* et *i8008* étaient effectivement des microprocesseurs, mais le succès commercial qui fut le leur ne doit pas occulter le fait qu'elles n'étaient pas exemptes de défauts et que leurs performances – et en conséquence leurs possibilités d'applications - étaient relativement limitées. Avec ses 6000 transistors N.M.O.S. le microprocesseur *i8080* ne devait quant à lui pas souffrir des limitations et des imperfections qui avaient affecté ses prédécesseurs.

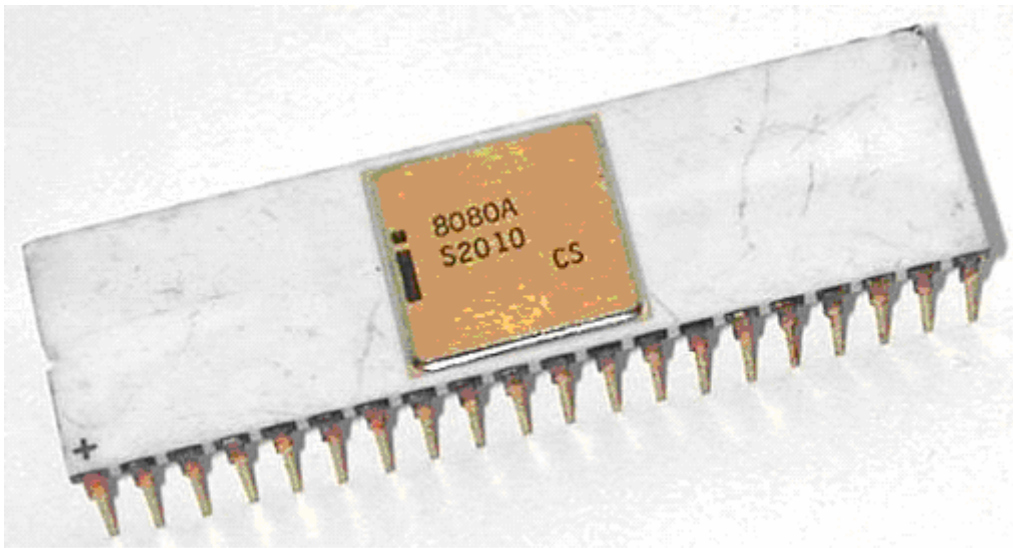


Photo 9 : le microprocesseur 8 bits *i8080*, dont l'apparition, en avril 1974, bouleversa littéralement l'industrie et la culture informatique. A partir de l'année 1975, de plus en plus de micro-ordinateurs équipés de chips *i8080* seront proposés à la vente. *Image Courtesy of the Intel Corporation.*

Le nombre d'instructions câblées dans l'*i8080* était supérieur à celui de l'*i8008*. Sa fréquence de cadencement dépassait largement celle du premier microprocesseur 8 bits d'*Intel*. La vitesse d'opération de l'*i8080* atteignait en effet deux mégahertz (contre 500 ou 800 KHz pour le *i8008*). Il possédait en outre sept registres internes dotés chacun d'une capacité de 8 bits, qui pouvaient être combinés par paire afin de travailler sur 16 bits. Le nombre de ports d'entrée/sortie gérés par la nouvelle chip d'*Intel* fut porté ici à 256 tandis que la capacité mémoire qu'elle était capable d'adresser *directement* était de 64 KB. Enchâssée dans un boîtier D.I.P. en céramique ou en plastique à quarante broches, la nouvelle puce d'*Intel* fut introduite sur le marché américain durant le mois d'avril 1974. Son coût unitaire fut fixé à 360 dollars. L'apparition du microprocesseur *i8080* bouleversa quasi immédiatement l'informatique et les différents secteurs industriels avec lesquels elle interagissait. Elle favorisa également l'apparition des premiers micro-ordinateurs destinés au public. Comme l'a encore indiqué Federico Faggin :

« *Le 8080 fut le microprocesseur qui lança l'industrie [des microprocesseurs] et cela n'échappa pas à l'attention d'Intel. En fait, ils modifièrent leur numéro de téléphone: [en 1974] les quatre derniers chiffres devinrent "8080". Et ce fut réellement le premier microprocesseur à briser la barrière des performances. Et beaucoup de cela était dû au fait qu'il possédait 40 connecteurs et il utilisait la technologie des canaux n [N.M.O.S.] au lieu de celle des canaux p [P.M.O.S.]. C'était un meilleur microprocesseur que le 8008 bien sûr, mais il était compatible avec le 8008. [...] Et il possédait plus de registres.... [Le 8080] était un 8008 nettoyé⁴⁰⁶ ».*

3.3. Les premiers micro-ordinateurs (1972-1974).

Lorsque l'on évoque les débuts de la micro-informatique et que, ce faisant, on en vient à aborder la question (inévitabile) de l'identité du premier micro-ordinateur, les réponses obtenues concernent quasi invariablement le M.I.T.S. *Altair 8800* et l'IMSAI 8080. Beaucoup plus rarement, il arrive qu'on évoque le MICRAL-N de la société française R2E (*Réalisation d'Études Électroniques*), le *Scelbi-8H* de la *Scelbi Computer Consulting Company* ou encore les *Microcomputer Set 4-bit* et *Intellec 8 Development System* d'*Intel*. Dans les faits, et même s'il ne s'agit ici que de culture populaire – mais le fait d'être populaire ne constitue-t-il pas justement l'un des traits les plus spécifiquement représentatifs de la micro-informatique ? – les commencements de la micro-informatique sont très fréquemment associés au début de l'année 1975. Le mois de janvier 1975 fut en effet marqué par la parution, dans le magazine spécialisé *Popular Electronics*, d'un article et d'une publicité présentant et vantant les mérites de l'*Altair 8800*, un micro-ordinateur que commercialisait une petite société d'électronique basée au Nouveau Mexique, la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems* (M.I.T.S.). A l'instar de l'IMSAI 8080 qui sortit sur le marché seulement un semestre après lui, l'*Altair 8800* était architecturé autour du microprocesseur *i8080A* d'*Intel*. En fonction du choix de l'acheteur – leurs concepteurs les proposaient en deux versions, la première sous la forme d'un kit à construire soi-même, la seconde déjà montée – le prix de ces deux machines oscillait entre 450 et 650 dollars. Leur coût incroyablement attractif et le fait qu'ils aient été proposés dans des revues à forte diffusion achetées essentiellement par des personnes passionnées par l'électronique – la plupart du temps celles-là se les procurèrent donc aussi

⁴⁰⁶ In *Interview with Federico Faggin*, Los Altos Hills, Californie, 3 mars 1995. Transcription de l'entretien disponible sur le site suivant: <http://silicongenesis.stanford.edu/transcripts/faggin.htm>

pour le défi technique que représentait en soi leur assemblage - assurèrent à ces deux petites machines pourtant dépourvues de toute sortie vidéo un beau succès commercial ainsi qu'une place de choix dans ce que l'on conviendra de nommer la « légende » des débuts de la micro-informatique.

Pourtant, et c'est là un fait couramment ignoré, ni l'*Altair* 8800 ni l'IMSAI 8080 ne méritent véritablement leur « titre » de premiers micro-ordinateurs de l'histoire. La question ici dépasse évidemment les problématiques élémentaires de la chronologie et de la classification. En d'autres termes, il ne s'agit pas seulement de tenter de dire si c'est tel ou tel système qui fut réellement le premier micro-ordinateur en lieu et place de tel ou tel autre, cette année-ci ou cette année-là. Si cette démarche présente sans doute un certain intérêt, elle nous paraît assez loin de se suffire à elle-même. En effet, et même si la chose demeure fréquemment passée sous silence, on sait pertinemment que des micro-ordinateurs furent mis au point et vendus dès 1972-73, soit deux à trois ans avant l'année (1975) que l'on se plaît habituellement à présenter comme l'*annus mirabilis* de la micro-informatique. La question qui se pose à partir de ce point est alors la suivante : comment pouvons-nous rendre compte de l'important décalage temporel⁴⁰⁷ constaté entre le moment où les premiers micro-ordinateurs furent effectivement introduits sur le marché, et celui, bien évidemment distinct du premier, que l'on *considère* de manière quasi coutumière comme ayant été caractérisé par leur apparition ?

Si l'on part du principe que les petits systèmes informatiques conçus à partir de 1972 étaient des micro-ordinateurs – d'un point de vue technologique, architectural, ils l'étaient assurément – alors comment comprendre que leur diffusion ait si excessivement limitée alors que 24 mois plus tard, des machines certes un peu plus élaborées mais toujours très rudimentaires et dans leur forme et dans leurs capacités, firent à l'inverse l'objet d'un accueil très favorable de la part d'un public de plus en plus important ? Leur prix relativement élevé permet de comprendre ce phénomène dans une certaine mesure. Une dizaine de machines architecturées autour des microprocesseurs *i4004* et *i8008* furent produites au cours de la période 1972-73. Bien que le coût de quelques unes d'entre elles nous demeure toujours inconnu à ce jour – c'est par exemple le cas du *Microcomputer System 4* d'*Intel* - il dépassait en général très largement le millier de dollars. Ceci peut constituer un facteur explicatif pour rendre compte de la faible diffusion que connurent ces dispositifs. Toutefois, il convient aussi de ne pas perdre de vue qu'au début des années 70, on considérait la nouvelle série de mini-

⁴⁰⁷ Sachant que dans le domaine de l'informatique, une période de 2 à 3 années représente une séquence de temps relativement importante.

ordinateurs D.E.C. P.D.P.-11 comme dotée d'un rapport qualité/prix exceptionnel. Or ces machines répandues et populaires coûtaient tout de même près de 20000 dollars l'unité. En principe les P.D.P-11 demeuraient donc hors de portée des bourses individuelles.

On se souviendra alors que le MICRAL-N⁴⁰⁸ micro-ordinateur à processeur i8008 apparu dans l'hexagone en 1973, était vendu (assemblé) pour la somme de 8450 francs, ce qui représentait environ 1750 dollars. Imaginé par une équipe composée de François Gernelle, Mr. Benchetrit, Alain Lacombe et Jean-Claude Beckmann, construit et diffusé par la société *Réalisations et Etudes Electroniques* de Paul Magneron et André Truong-Tong-Ti, le MICRAL-N fut élaboré après qu'un accord de développement ait été passé au mois de juin de l'année 1972 entre la R2E et l'*Institut National de Recherche Agronomique*. A cette époque l'I.N.R.A. avait besoin de réaliser des calculs agronomiques (en l'occurrence il s'agissait de mesurer le taux d'évapotranspiration des sols par la méthode du bilan d'énergie), mais il ne disposait pas du budget suffisant pour se porter acquéreur du mini-ordinateur (il était question d'un P.D.P.-8 à 7000 euros environ), qui lui aurait permis de les effectuer. Lors d'un entretien avec M. Alain Perrier, bioclimatologue et responsable à l'I.N.R.A., François Gernelle fit la réponse suivante au scientifique après avoir écouté ce dernier exposer ce qu'il avait l'intention de faire au moyen du mini-ordinateur américain : « *Si j'ai bien compris dans votre application de contrôle de process, le prix d'un PDP8 4K (45.000 FF) est trop élevé pour votre budget. Aussi, je vous propose de vous faire un calculateur (sic) pour la moitié de ce prix*⁴⁰⁹ ». La date butoir à laquelle la société R2E devait livrer le MICRAL-N à l'I.N.R.A. était le 30 décembre 1972. Finalement cette livraison fut effectuée avec un léger retard et l'institut d'agronomie réceptionna le premier exemplaire (en fait le prototype) de cette machine le 15 janvier 1973. Très élaborée - François Gernelle a lui-même décrit sa création de la manière qui suit - le micro-ordinateur français coûtait cinq fois moins cher que le mini-ordinateur P.D.P. 8 :

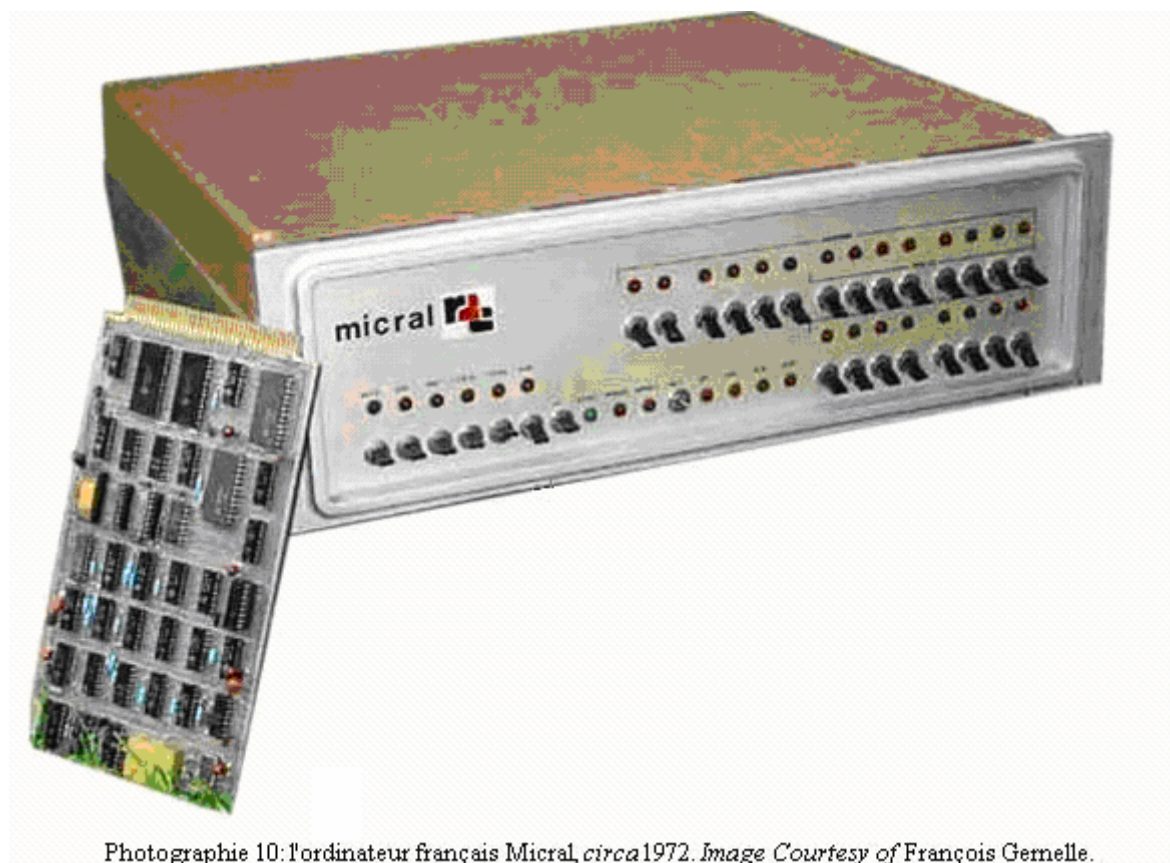
« La machine que je baptisai "micro-ordinateur", c'est logique puisque c'était un ordinateur construit avec un "micro-processeur", possédait presque toutes les caractéristiques de ses grands frères sur lesquels j'avais travaillé à Intertechnique: VARIAN 6201, MULTI 8 (licence Microdata) et ELBIT, bien que ces deux dernières machines fussent à architecture microprogrammée. Il y avait une carte UC [Unité Centrale avec processeur

⁴⁰⁸ Le mot « micral » signifie « petit » en argot français.

⁴⁰⁹ In François Gernelle, « La naissance du premier micro-ordinateur, le MICRAL-N », *2ème Colloque de l'Histoire de l'Informatique*, C.N.A.M., p. 1, Paris, 24 avril 1990. Ce document peut être consulté au format PDF sur le site web de l'Association pour l'Histoire des Télécommunications et de l'Informatique : <http://mapage.noos.fr/ahti/CNAM%2090.pdf>

i8008], avec un système temps réel, un bus banalisé (le Pluribus), des cartes mémoires M O S [Metal Oxyde Semiconductor], RAM et REEPROM (à cette époque, les autres ordinateurs étaient généralement équipés de mémoire à tores), des cartes d'entrées/sorties parallèles et séries, des cartes d'entrées/sorties à relais et optoélectronique et une carte canal bufférisée originale supportant 1 Mo/seconde (pas longtemps !). Comme un grand ! Le temps d'exécution d'une instruction était d'environ 20 microsecondes. L'horloge CPU était à 0,5 MHz seulement, mais nous avons 8 niveaux d'interruption et un STACK !⁴¹⁰ ».

Petite machine 8 bits à la façade littéralement constellée de diodes d'états et d'interrupteurs servant à la programmation, le MICRAL-N pouvait se voir raccorder un lecteur de bandes perforées. Initialement il devait être programmé directement en binaire mais bientôt un assembleur relativement facile à apprendre fut écrit⁴¹¹ afin de faciliter son usage.



Pour une somme incroyablement modique – concernant ce point précis il est encore une fois impératif de replacer les choses en perspective et de se rappeler que le coût des

⁴¹⁰ *Ibid*, p.2.

⁴¹¹ C'est Philippe Kahn, qui devait plus tard fonder la firme *Borland*, qui développa les logiciels du MICRAL-N.

systèmes considérés à l'époque comme étant bon marché atteignait toujours plusieurs dizaines de milliers de francs – il était donc possible, en France et en 1972, de posséder un micro-ordinateur prêt à être utilisé et construit avec certaines des technologies microélectroniques les plus abouties du moment. La première année (1973), la production de MICRAL-N n'excéda pas les 500 unités. L'année d'après, la R2E avait déjà écoulé deux milliers de ces machines. En dépit de ce succès commercial, les ventes de ce que d'aucuns s'accordent à considérer comme le premier micro-ordinateur de l'histoire de l'informatique ne concernèrent jamais autre chose que le secteur des applications industrielles et scientifiques. On pourrait alors penser que le MICRAL-N échoua à sortir de la sphère des applications professionnelles en raison du caractère limité du marché français. De fait et malgré un certain nombre de réalisations tout à fait remarquables – le réseau CYCLADES n'étant pas la moindre – la France n'était pas le pays de l'ordinateur. Il se peut que cet élément d'ordre historique et culturel puisse expliquer en partie l'indifférence que les particuliers manifestèrent dans son pays d'origine à l'égard du MICRAL-N. La société R2E s'efforça de commercialiser sa petite machine à l'étranger et si elle n'y parvint malheureusement pas, cette tentative d'exportation eut néanmoins une conséquence notable qui est demeurée depuis dans les annales de l'histoire de l'informatique. Ainsi, en 1973, François Gernelle déposa deux brevets à l'*Institut National de la Propriété Industriel*. Le premier de ces brevets (I.N.P.I. n°7303553) concernait le MICRAL-N et le second (I.N.P.I n° 7303552), le principe de la pile canal. L'unité centrale de traitement du MICRAL-N étant un microprocesseur et ce dernier étant un ordinateur, F. Gernelle estima comme parfaitement logique le fait de vouloir donner au système informatique qu'il avait réalisé le nom de «micro-ordinateur ». Or comme il l'indique à la fin de son article « La naissance du premier micro-ordinateur, le MICRAL-N », le droit d'utiliser l'appellation « micro-ordinateur » dans son corpus de revendications lui fut refusé par l'agent des brevets sous prétexte que « *les choses novatrices doivent être écrites avec des termes connus*⁴¹²... ». Par un hasard tout à la fois étrange et bienheureux, c'est au travers d'un article paru dans le numéro du mois de juin 1973 du magazine américain *Byte* que F. Gernelle obtint finalement gain de cause. Le journaliste américain qui rédigea le papier consacré au MICRAL-N utilisa en effet à propos de ce dernier l'expression « *micro computer* », c'est-à-dire micro-ordinateur en français. C'est là le premier emploi écrit connu du terme micro-ordinateur et c'est sans nul doute cet article qui contribua à le lancer et à en populariser l'usage.

⁴¹² Ibid., p. 4, anecdote 1.

La mise au point du MICRAL-N démarra au cours du second semestre 1972. Sa commercialisation, au mois d'avril 1973. A cette époque, d'autres micro-ordinateurs avaient vu ou étaient en train de voir le jour de l'autre côté de l'atlantique. Fait assez peu connu la société *Intel* utilisa ses propres microprocesseurs *i4004* et *i8008* (et plus tard les chips *i4040* et *i8080*), pour fabriquer une série de micro-ordinateurs de développement (*Microcomputer Development Systems*). Architecturée autour du microprocesseur *i4004* et des puces auxiliaires *i4001* (R.O.M), *i4002* (R.A.M.) et *i4003* (*Shift Register*), la première de ces machines était le *Microcomputer Set 4-bit*. Introduit par *Intel* à la fin de l'année 1971⁴¹³, celui-ci était plus largement connu sous le nom d'*Intellec-4 Model 4*⁴¹⁴.

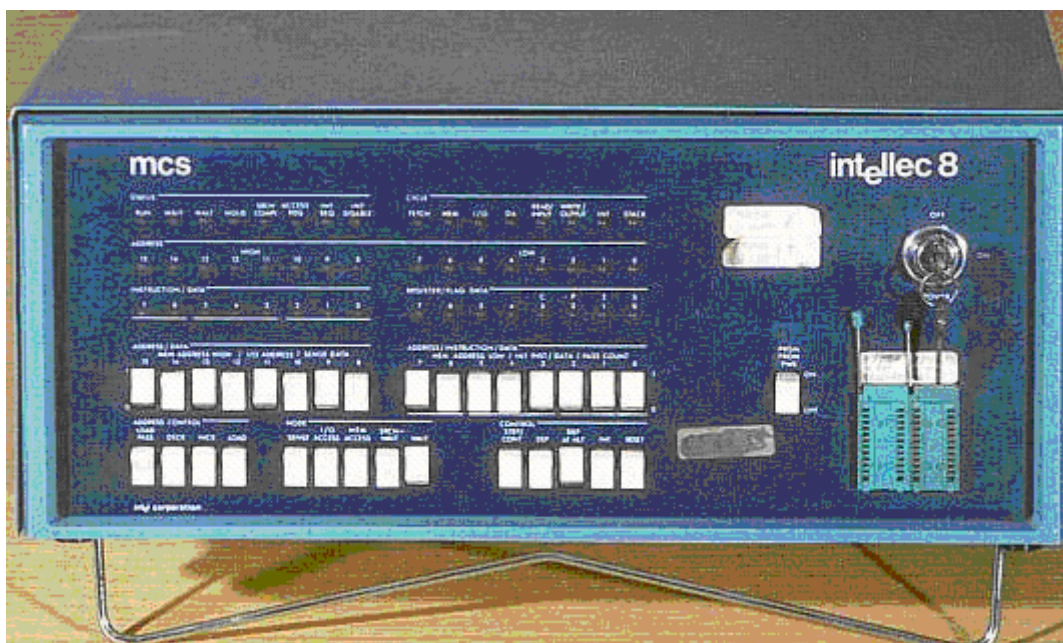


Photo 11: l'*Intellec-8 Model 8*, un ordinateur de développement introduit en 1972 par l'*Intel Corporation*. Image Courtesy of the *Computermuseum der Stuttgart Fakultät Informatik*.

Un deuxième petit système, l'*Intellec-8 Model 8* basé cette fois sur la puce *i8008*, fit son apparition sur le marché en 1972. Il était vendu 2398 dollars (soit une quinzaine de milliers de francs). Concernant ces équipements d'origine américaine, il advint une fois encore ce qui s'était déjà passé avec le MICRAL-N en France et aux Etats-Unis. Si les micro-ordinateurs d'*Intel* se vendirent plutôt bien, leur diffusion et leur usage demeurèrent strictement cantonnés aux domaines industriel et scientifique. Le prix de ces petites machines

⁴¹³ Sur le site du *National Museum of American History / Smithsonian's Chip Collection*, figure une brochure de présentation du *Micro Computer Set 4*, éditée par l'*Intel Corporation*. Ce document officiel porte la date du mois de novembre 1971.

⁴¹⁴ L'*Intellec-4 Model 4* ne doit pas être confondu avec l'*Intellec 4 Model 40*. Architecturé autour du microprocesseur *i4040*, une version améliorée de l'*i4004* introduite en 1974, ce système informatique de développement fut proposé par Intel au cours des derniers mois de cette même année.

était certes relativement élevé – dans tous les cas il était supérieur à celui du micro-ordinateur français – mais certainement pas au point d’empêcher des particuliers passionnés de procéder à leur achat. Reste alors à savoir pourquoi il en fut ainsi, aussi bien pour les micro-ordinateurs de la série *Inteltec*, que pour le MICRAL-N. On pourrait d’ailleurs soulever la même question à propos du *Scelbi-8H*, un micro-ordinateur équipé d’un processeur *i8008* et d’un Ko de mémoire interne que la société *Scelby Computer Consulting Incorporated* commença à produire vers la fin de l’année 1973.

SCELBI - 8H MINI - COMPUTER



SCELBI COMPUTER CONSULTING, INC.

1322 REAR - BOSTON POST ROAD - MILFORD, CONN. 06460

TELEPHONE (203) 874-1573

Photo 12 : publicité éditée en 1974 par la société *Scelby Computer Consulting Inc.*, pour promouvoir le « mini-ordinateur » *Scelbi-8H*.

Implantée à Milford, dans le Connecticut, la *Scelby Computer Consulting Inc.* avait été fondée au mois d’août 1973 par Nat Wadsworth, ancien ingénieur à la *General Data Commercial Industries*, après qu’il eut assisté à une présentation du microprocesseur *i8008*

chez *Intel*. Après avoir pris connaissance des possibilités offertes par le premier microprocesseur 8 bits du fondateur californien, N. Wadsworth avait conçu le projet de l'utiliser pour fabriquer un ordinateur de petite taille. Afin de mettre toutes les chances de son côté, il avait démissionné de son poste à la *General Data Commercial Industries*, recruté une petite équipe de techniciens et créé sa propre société. Vendu en pièces détachées ou entièrement monté, le *Scelbi-8H* offrait un niveau de performances acceptables, il disposait d'interfaces permettant le raccordement à un oscilloscope (pour la sortie vidéo), à un lecteur/enregistreur de cassettes (pour le stockage de masse), à un terminal télétype (pour la saisie des informations), et il n'était de surcroît pas très coûteux (on devait déboursier 565 dollars pour acquérir la machine en kit). Malgré une petite campagne publicitaire faite dans la presse spécialisée américaine – notamment dans *QST Magazine* qui était destinée au public des radioamateurs – la *Scelby Computer Consulting Inc.* ne put écouler que 200 exemplaires de ce micro-ordinateur (à perte d'ailleurs).

On voit donc que les cas du MICRAL-N et de la série des *Intellec* n'étaient pas véritablement isolés. Moins cher et affichant des performances souffrant tout à fait la comparaison avec celles offertes par les micro-ordinateurs commercialisés par les sociétés *Réalisations et Etudes Electroniques* et *Intel*, le *Scelbi-8H* se vendit peu et ne toucha lui aussi que des secteurs extrêmement spécialisés. A l'exception de l'*Intellec-4*, toutes ces machines intégrées étaient pourtant équipées du même microprocesseur, l'*i8008* et de puces mémoires en semi-conducteur (leur nombre pouvait en général être étendu). Comme il a été dit plus haut, l'*i8008* comportait certains défauts (ils furent corrigés plus tard sur le célèbre *i8080*). Cependant cela ne saurait expliquer que les premiers micro-ordinateurs mis au point et vendus au cours des années 1972-1974, soient en quelque sorte passé « à côté de leur public » alors que des systèmes sortis deux ou trois ans plus tard et qui, hormis leur microprocesseur *i8080*, ne présentaient que peu de différences fondamentales par rapport à leurs immédiats prédécesseurs l'on eux parfaitement « rencontré ». On pourra alors encore se replier sur l'argument financier et prétendre que c'est leur coût trop élevé qui prévint la diffusion de ces premières petites machines auprès des particuliers. A quoi on répondra aussitôt qu'à bien y regarder le *Scelby-8H* n'était pas plus cher qu'un *Altair 8800* ou qu'un *IMSAI 8080* et que des trois micro-ordinateurs pionniers que nous avons évoqués, c'est de loin celui qui se vendit le moins bien. On ne saurait donc honnêtement arriver à la conclusion que c'est leur cherté qui empêcha ces machines de créer un proto marché informatique domestique. En réalité, la véritable solution de ce problème n'est ni technologique, ni économique. Elle tient pour l'essentiel à la façon dont les entreprises qui commercialisaient les MICRAL-N, les systèmes

Intellec-8 et autres *Scelby-8H* se représentaient ces machines et, par conséquent, décidaient de la nature des usages auxquels elles devaient être destinées⁴¹⁵. Ainsi lorsqu'elle accepta de produire le micro-ordinateur MICRAL-N pour le compte de l'*Institut National de Recherche Agronomique*, la société R2E ne fit rien d'autre que de s'engager à développer un instrument informatique intégré et relativement peu coûteux pour accomplir des tâches scientifiques qui, si l'I.N.R.A. en avait eu les moyens, auraient autrement été réalisés par un D.E.C. P.D.P.-8. Même si de facto le MICRAL-N était bel et bien un micro-ordinateur, il avait été dès le départ pensé et produit dans la perspective d'offrir une alternative informatique intégrée, économique et performante aux mini-ordinateurs. Aussi la R2E ne chercha-t-elle jamais à commercialiser son système en dehors des sphères de l'industrie et de la recherche. Par nécessaire voie de conséquence, l'essentiel des utilisations que l'on fit de ce dernier ne dut jamais concerner autre chose que des applications de contrôle industrielles ou scientifiques. Il en va exactement de même avec les systèmes de développement *Intellec* produits au début des années 70. Paul E. Ceruzzi a rappelé de quelle façon *Intel* se représentait ses microprocesseurs, ou, pour être plus exact, quel model mental générique prévalait quant à l'usage typique que pouvaient en faire leurs acquéreurs :

« *Un acheteur industriel achetait un [microprocesseur⁴¹⁶], écrivait un logiciel spécialisé pour celui-ci, lequel était ensuite gravé sur une mémoire morte [R.O.M.] pour fournir à un système les fonctions désirées. Le produit économique résultant (qui n'était désormais plus programmable) était alors introduit sur le marché comme un contrôleur intégré dans un système industriel⁴¹⁷ »*

Et l'historien de l'informatique de poursuivre en rappelant qu'*Intel* « *comprendait à quel point il était difficile de programmer un microprocesseur⁴¹⁸* », y compris pour des consommateurs aguerris, parfaitement versés dans les arts compliqués de l'électronique et de l'informatique. C'est précisément la raison pour laquelle la société américaine conçut les systèmes de développement de la série *Intellec*. Si eux aussi étaient indubitablement des micro-ordinateurs, ces instruments furent d'abord et avant tout imaginés dans le but de

⁴¹⁵ L'orientation de leur politique de communication, de même que l'identification de leurs clients potentiels, étaient bien évidemment déterminées par le genre d'utilisations auxquelles ces entreprises destinaient leurs micro-ordinateurs.

⁴¹⁶ P.E. Ceruzzi parle ici du microprocesseur *i8080*, mais en raison de sa portée générale le raisonnement exposé vaut évidemment pour n'importe quelle puce de l'époque. C'est pourquoi nous avons pris ici la liberté de remplacer l'identifiant numérique « 8080 » par le terme « microprocesseur ».

⁴¹⁷ In [Ceruzzi, 1998], p.222.

⁴¹⁸ Ibid.

faciliter les travaux de programmation d'une clientèle issue des mondes de l'industrie et de la science. Dans le cas présent, ces micro-ordinateurs étaient spécifiquement employés pour développer et tester des softwares appelés à être définitivement inscrits dans des puces électroniques (ces puces étant ensuite elles-mêmes intégrées à des systèmes de contrôle figés). Compte tenu de l'extrême difficulté que sa clientèle de spécialistes rencontrait pour programmer ses *chips*, *Intel* commença à diffuser auprès d'eux des systèmes de développement mais, ne percevant nullement l'intérêt commercial potentiel qu'il pourrait y avoir à les proposer à un public non averti tant le type de travaux pour lesquels elle les avait construits à l'origine paraissait ardu et rebutant, l'entreprise échoua complètement à *voir ou à comprendre* la nature profonde de ces équipements. Le même raisonnement est susceptible d'être tenu à propos du *Scelbi-8H*. Quant il fonda la *Scelby Computer Consulting Inc.*, Nat Wadsworth avait en tête la conception d'un petit ordinateur, architecturé autour du nouveau microprocesseur 8 bits d'*Intel*. Mais comme l'indique le nom qu'il donna à sa société – le terme *Scelby* résulte en fait de la contraction des mots « *Scientific* », « *Electronic* » et « *Biological* » - avec cette machine économique, ce sont fondamentalement les marchés de la recherche scientifique, à commencer évidemment par ceux de l'électronique et de la biologie, qu'il visait. Malgré le coût peu élevé auquel il le vendait, Wadsworth ne chercha pas réellement à élargir le cercle des acheteurs potentiels de son micro-ordinateur. Fidèle à l'objectif qu'il s'était fixé en montant son entreprise, il se contenta de l'offrir à une catégorie de clients traditionnellement habituée à utiliser des mini-ordinateurs.

Les années 1971 et 1972 furent marquées par la mise au point et la commercialisation des tout premiers microprocesseurs de l'histoire, les puces *Intel i4004* et *i8008*. Très rapidement des sociétés existantes et de petits entrepreneurs comprirent que ces nouveaux dispositifs électroniques à très fort niveau d'intégration pourraient être utilisés pour fabriquer des ordinateurs de petite taille – des « *computers on a chip* » ainsi que le proclamaient les premières publicités qu'*Intel* fit paraître pour le microprocesseur *i4004* - offrant un rapport coût/performances encore jamais atteint dans le secteur de l'industrie informatique. De manière tout à fait incontestable et si l'on s'en tient à un niveau de considération purement technique, les machines produites par les sociétés *Intel*, *Réalisations et Etudes Electroniques* et *Scelby* étaient comme nous l'avons déjà précisé des micro-ordinateurs. Pourtant leurs constructeurs respectifs concentrèrent exclusivement leurs efforts de commercialisation en direction des secteurs de l'industrie et de la recherche. Ils *percevaient* en effet les systèmes qu'ils avaient mis au point – et c'est d'ailleurs là le motif premier qui les avait conduits à les réaliser - comme des dispositifs capables de remplacer à moindres coûts les mini-ordinateurs

habituellement employés par les catégories de clients qu'ils courtoisaient. Jamais ces entreprises ne cherchèrent à vendre leurs systèmes à de simples particuliers. D'ailleurs à supposer qu'une personne ait été prête à l'époque à déboursier entre 500 et 2000 dollars pour faire l'acquisition d'une telle machine à titre individuel, on se demande bien ce qu'elle en aurait bien pu en faire une fois cette dernière totalement assemblée ? Comme devait le prouver de façon éclatante la seconde moitié des années 70, les premiers possesseurs de micro-ordinateurs ne se montrèrent en fait jamais à court d'imagination pour inventer et faire des choses avec leurs formidables « jouets » informatiques. Mais cela ni *Intel*, ni la R2E, ni la *Scelby Corporation*, ne se trouvèrent en mesure de le deviner puisque leur objectif marchand consistait à conquérir des clientèles spécifiquement professionnelles. S'il en avait été autrement toutefois, on peut gager qu'une démarche de commercialisation un peu élargie aurait certainement favorisé l'apparition d'un embryon de marché informatique domestique - laquelle devait évidemment constituer la condition sine qua non pour voir se former ensuite une informatique populaire - deux ans avant l'introduction des deux micro-ordinateurs qui la provoquèrent effectivement, à savoir l'*Altair 8080* et l'*IMSAI 8800*. Ce sont ces deux petites machines coûtant à peine 600 dollars l'unité qui inaugurèrent véritablement l'ère de la micro-informatique. Avant d'étudier cette période, de tenter d'identifier et de comprendre quels vecteurs technologiques, sociétaux et industriels autorisèrent la constitution (et bientôt l'explosion) d'un marché informatique domestique ou familial, nous allons considérer deux événements eux aussi survenus au début des années 70, qui, à distance, jouèrent un rôle déterminant dans le façonnement de la micro-informatique.

3.4. Le désengagement financier partiel du *Department of Defense* américain dans le domaine de la recherche avancée et la création du *Xerox Palo Alto Research Center*.

A la fin des années 60, l'administration Nixon dû faire face à une situation politico-militaire extrêmement délicate. D'abord parce que l'engagement des troupes américaines au Viêtnam avait littéralement tourné à la débâcle militaire, financière et humaine (quoique objectivement ce dernier paramètre ait été assez peu pris en compte par les décideurs oeuvrant dans le cadre de cette affaire). Sur le terrain, le moral des combattants était au plus bas et les raisons pour lesquelles on avait déclenché cette guerre lointaine et meurtrière, en plus d'être mal perçues par les civils et certains militaires, étaient de plus en plus fréquemment remises en cause par ceux-là même qui étaient chargés de la faire. Alors que les

affrontements qui se déroulaient dans des conditions environnementales et climatiques mal supportées par les Gi's gagnaient en férocité et tendaient désormais à s'étendre aux zones frontalières laotiennes et cambodgiennes, le front de contestation pacifique qui, sur fond de gauchisme, d'anarchisme et d'utopisme hippie, s'était initialement constitué au sein des franges les plus progressistes de la société américaine n'avait cessé de gagner en puissance. Sans qu'il ne se soit jamais désolidarisé des pôles qui l'avaient vu émerger, les idées et les revendications autour desquelles ce mouvement contestataire s'était graduellement constitué touchaient à présent une part non négligeable de l'opinion publique américaine. Au fil du temps et comme chacun sait, les campus universitaires étaient devenus les foyers privilégiés de l'expression de l'opposition populaire à la guerre au Viêt Nam. Les centres d'excellence intellectuelle du pays étaient particulièrement concernés par ce phénomène si bien que dans certains cas il commença à se creuser un fossé – pour ne pas dire s'installer une sorte de « schizophrénie » – entre la nature des recherches poursuivies par les chercheurs et leurs étudiants et les idées politiques auxquelles bien souvent, ils adhéraient en tant qu'individus. Rappelons en effet que dans de nombreux cas, les centres de recherche les plus performants des meilleures universités et instituts de technologie du pays recevaient des fonds importants en provenance du *Department of Defense* (par le biais de l'*Advanced Research Project Agency* et de l'*Information Processing Techniques Office*). Ces fortes sommes d'argent versées par le Ministère de la Défense aux laboratoires de recherches universitaires n'étaient pas toujours employées afin de réaliser des travaux ayant directement quelque chose à voir avec les secteurs de la défense et de l'armement (ainsi d'ARPANET par exemple). Cependant la hauteur des investissements réalisés ici par le *DoD* était devenue telle qu'à un moment donné, et malgré les restrictions successivement appliquées, les universités américaines qui les percevaient se retrouvèrent placées en situation de dépendance financière vis-à-vis de lui.

Peu à peu et compte tenu du caractère singulièrement paradoxal de cette situation – il arrivait que le Pentagone finance à hauteur de dizaines de millions de dollars des recherches qui ne le concernaient pas nécessairement et qui étaient en outre souvent effectuées par des personnes ouvertement opposées à l'action que le gouvernement conduisait au Viêt Nam - la question de l'autonomie de la recherche scientifique vis-à-vis du complexe militaro-industriel américain commença à se faire jour dans les plus hautes sphères politiques du pays. Au début du mois de mai 1970, l'annonce de frappes aériennes massives conduites par l'*U.S. Air Force* dans la région nord du Viêt Nam amena plusieurs sénateurs – des démocrates aussi bien que des républicains – à poser publiquement la question des risques d'inflation et d'enlisement d'une guerre qui n'avait déjà été que trop coûteuse, et cela sur tous les plans possiblement

envisageables. Parfaitement représentatives de l'attitude ultra belligérante adoptée par Richard Nixon et une partie des républicains siégeant au Congrès, ces nouvelles offensives aériennes furent interprétées par cette poignée de sénateurs « protestataires » comme autant d'indicateurs sinistres de la stratégie jusqu'au-boutiste que le Président et ses suivants s'apprêtaient à mener dans le sud-est asiatique afin d'écraser brutalement et définitivement le Viêt Minh. Au paroxysme de la crise quatre sénateurs – deux démocrates, George S. McGovern et Harold E. Hughes, et deux républicains, Mark O. Hatfield et Charles E. Goodell – annoncèrent publiquement qu'ils entendaient soumettre plusieurs amendements au *Military Procurement Authorization Bill* afin de « réduire les dépenses consacrées aux actions militaires au Viêt Nam⁴¹⁹ ». A terme cette réduction drastique des crédits accordés aux armées devait contribuer à saborder la politique militaire agressive mise en œuvre par l'administration Nixon en Asie et déboucher sur un retrait progressif des troupes engagées. Les sénateurs démocrates James W. Fulbright et Michael J. Mansfield se sentaient particulièrement concernés par le problème que posait l'indépendance de la recherche scientifique dans leur pays. En 1970 le second proposa ainsi d'apporter un rectificatif au *Military Procurement Authorization Bill*, qui visait à faire en sorte que les fonds octroyés par les différents organismes de financement du *Department of Defense* soient désormais versés de manière exclusive à des organisations engagées sur des projets ou des études entretenant un rapport direct avec la chose militaire. Il s'agissait ici pour Mansfield et ceux qui partageaient ses vues d'instaurer une séparation nette entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée, particulièrement lorsque celle-ci concernait la mise au point de systèmes d'armes ou de renseignement. En outre pour une opinion publique déjà horrifiée par ce qui se passait dans les zones de combat vietnamiennes, le fait que des armes dévastatrices utilisées parfois contre des populations innocentes aient pu voir le jour, directement ou indirectement, grâce à l'action de scientifiques civils travaillant au sein d'établissements également civils, apparaissait de plus en plus insoutenable sur le plan politique. En reconduisant ainsi l'A.R.P.A. dans ses fonctions premières – à savoir le financement de projets scientifiques avancés susceptibles de déboucher sur la mise au point d'applications militaires – on revenait à une séparation précise du civil et du militaire, à une identification non brouillée de leurs fonctions et secteurs d'actions respectifs. Cette redéfinition des frontières, des champs de compétences, devait permettre de redonner aux populations des repères fiables et de contribuer un peu à atténuer les scandales et la révolte sociale qui secouaient les Etats-Unis.

⁴¹⁹ Voir notamment l'article de John W. Finney, « Senators Shocked by Resumption of Raids in North Vietnam », in *New York Times*, 3 mai 1970.

Puissant levier politique – l’argent étant comme chacun le sait le nerf de la guerre - cet amendement fut en définitive adopté. Qu’ils aient appartenu au camp des démocrates ou bien à celui des républicains, ceux qui votèrent en sa faveur espéraient que, rapidement, la *National Science Foundation* se verrait dotée par les autorités des moyens qui lui permettraient de reprendre le rôle que l’A.R.P.A. avait jusqu’alors assumé au regard du financement de la recherche fondamentale « civile ». Pour paradoxale qu’elle puisse paraître, la position adoptée ici par les votants républicains peut parfaitement s’expliquer. Entre 1965 et 1970, les crédits accordés à l’A.R.P.A. par le Pentagone avaient en effet subi des coupes franches. La guerre au Viêt Nam coûtait excessivement cher et pour les républicains il était patent qu’une disposition telle que le *Mansfield Amendment* devait être ratifiée car elle entendait réserver des fonds gouvernementaux déjà passablement rognés à des recherches de nature exclusivement militaire. Ce désengagement qu’on leur imposa par la force institutionnelle signifia bien évidemment la fin de l’omniprésence et de l’omnipotence qui avaient jusqu’à présent caractérisées le DoD et l’*Advanced Research Project Agency* dans le monde de la recherche américaine. Evidemment la décision d’empêcher l’A.R.P.A. (et les agences gouvernementales remplissant la même fonction qu’elle) de subventionner autre chose que des projets de recherche susceptibles d’applications directes dans le secteur de la défense n’alla pas sans entraîner quelques conséquences pour le milieu universitaire américain. La diminution de crédits qui suivit le vote du *Mansfield Amendment*, et l’incertitude grandissante dans laquelle se trouvaient nombre de chercheurs de premier ordre quant à ce que serait effectivement l’action future de la N.S.F. incita peu à peu ces derniers à abandonner leurs laboratoires pour aller poursuivre leurs travaux dans le secteur privé. En raison du support que leur avaient systématiquement accordé les agences de financement du Ministère de la Défense, l’argent n’avait jamais vraiment représenté une question importante pour ces scientifiques habitués à effectuer des recherches nécessitant l’effectuation de dépenses souvent très importantes. A présent la situation avait changé et pour eux, l’argent était devenu un paramètre essentiel du problème.

Au premier jour du mois de juillet 1970, la *Xerox Corporation* inaugura officiellement son centre de recherches avancées, le *Xerox Palo Alto Research Center* (ou *Xerox PARC*), à Palo Alto (Californie), non loin du campus de l’Université de Stanford. Le projet de mettre en place une telle structure avait vu le jour dans le courant de l’année 1969, après que la firme américaine leader mondial dans le secteur de la reprographie mécanisée ait acquis le fabricant d’ordinateurs *Scientific Data Systems* (S.D.S.) pour la somme de 920 millions de dollars. Sans faire partie des *Seven Dwarfs*, la société d’équipements informatique créée en 1961 par Max

Palevsky était économiquement viable et ses machines bénéficiaient qui plus est d'une excellente réputation. Dans un marché en plein essor où la compétition pour les « restes abandonnés » par I.B.M. – *Snow White* - faisait rage, les dirigeants de la S.D.S. avaient fait le pari de se démarquer de la concurrence en produisant des mainframes scientifiques comportant des éléments de technologie avancée. Les gros ordinateurs de la S.D.S. avaient ainsi été les premiers à utiliser des transistors en silicium. De la même manière l'entreprise avait figuré au rang des précurseurs pour ce qui était de l'usage des circuits intégrés.

En mai 1969⁴²⁰, le Dr Jacob E. Goldman, un physicien spécialisé dans le domaine de la résonance magnétique nucléaire qui avait jadis enseigné au *Carnegie Institute of Technology* et au M.I.T. et qui occupait maintenant la fonction de Directeur de la Recherche à la *Xerox Corporation*, soumit une proposition originale à sa direction. Dans un rapport intitulé *Advanced Scientific & Systems Laboratory*, il présenta ainsi un projet visant à l'établissement d'un centre de recherches avancées. Il faut savoir que *Xerox* possédait déjà un grand centre de recherches aux Etats-Unis, le *Wilson Center for Research and Technology*, qui était implanté à Webster, dans l'état de New York. Les objectifs de travail primordiaux que Jacob E. Goldman désirait voir assignés au nouveau site qu'il avait en tête devaient cependant différer de ceux qui étaient déjà poursuivis au *Wilson Center*. Il est évident que *Xerox* n'avait nul intérêt à posséder deux organismes de ce genre si leurs efforts respectifs étaient voués à faire doublon. C'est pourquoi, selon J. E. Goldman, l'*Advanced Scientific & Systems Laboratory* devrait se consacrer au développement de technologies d'avenir dans les secteurs de la physique des semi-conducteurs et de l'informatique (tandis qu'au *Wilson Center*, on travaillait essentiellement au perfectionnement des technologies ayant à voir avec la reprographie). Le recours croissant à l'informatique dans les entreprises, les administrations et les organismes étatiques, assorti à la sophistication et aux performances grandissantes des machines et des moyens de stockage, paraissaient annoncer l'ère du « *paperless office* », c'est-à-dire du « bureau sans papier ». Un puissant groupe industriel comme *Xerox*, qui avait construit sa renommée internationale et sa fortune dans le secteur de la reprographie, ne pouvait pas plus réussir à endiguer ce phénomène qu'il ne pouvait s'autoriser le luxe de l'ignorer. La logique de la survie industrielle et celle de la rentabilisation des investissements de pointe – *Xerox* possédait *Scientific Data Systems* à présent – exigeaient donc que soit mise en place au plus vite une politique d'anticipation et de développement technologiques extrêmement efficace. Les objectifs généraux poursuivis ici devraient consister à créer la

⁴²⁰ C'est-à-dire peu de temps après l'acquisition de la *Scientific Data Systems* par la *Xerox Corporation*.

future « *architecture de l'information*⁴²¹ » et à « *humaniser l'ordinateur* ». Plutôt que de subir passivement les effets de la révolution à venir, laquelle était de toute façon irrépessible, on décida chez *Xerox* de l'anticiper et, avec force moyens financiers, humains et technologiques, de participer activement à la création des technologies qui en feraient partie. Lors d'une réunion au PARC, en 1971, Alan C. Kay, le créateur du langage de programmation *Smalltalk* résuma d'ailleurs fort bien l'esprit de cet effort en ayant cette phrase : « *The best way to predict the future is to invent it* », la meilleure façon de prédire le futur, c'est de l'inventer... Au travers de l'acte de sa création en 1970 et des formidables accomplissements qui y furent réalisés ensuite pendant un peu plus d'une décennie, le *Palo Alto Research Center* cristallisa littéralement cette volonté qu'avait *Xerox* de jouer un rôle absolument déterminant dans le processus de conception des futures technologies de l'information.

La direction de la *Xerox Corporation* donna très rapidement son aval à la proposition formulée par J. E. Goldman et au mois de janvier 1970, celui-ci commença à recruter les cadres du *Palo Alto Research Center*. Pour assurer la direction de la nouvelle entité de recherches, J. E. Goldman engagea George E. Pake, un physicien, comme lui. Pour diriger le *Computer Science Laboratory*⁴²², Goldman embaucha Jerome I. Elkind – un ancien responsable de la recherche informatique chez *Bolt, Beranek & Newman* - et Robert W. Taylor, qui avait occupé la fonction de Directeur de l'*Information Processing Techniques Office* (1966-69.) puis travaillé près d'une année (1969-70) sur le graphisme informatique aux côtés d'Ivan Sutherland à l'Université de l'Utah. Le moment où le *Xerox Palo Alto Research Center* ouvrit ses portes coïncida avec la crise que le *Mansfield Amendment* et le désengagement financier de l'A.R.P.A. étaient en train de provoquer parmi les membres de l'élite universitaire américaine. Aussi le *Xerox PARC* qui devait être bientôt appelé à devenir l'un des incubateurs technologiques les plus inventifs et les plus prolifiques des Etats-Unis se trouva-t-il dès le départ en position de recruter quelques-uns des individus comptant parmi les scientifiques et ingénieurs les plus brillants de la nation. Ceci était si vrai d'ailleurs que Michael Hiltzik a pu dire du *Xerox PARC* qu'il avait été alors pour les meilleurs scientifiques du pays « *ce que Disneyland était pour les [enfants] de 7 ans*⁴²³ »... Sans surprise la plupart des chercheurs recrutés au moment de la création du *Xerox Palo Alto Research Center* étaient issus des A.R.P.A. *Contractors*, ces grandes universités américaines (Université de Stanford,

⁴²¹ Cette expression, « *architecture of information* », figure sur la page histoire du site du *Xerox PARC* : <http://www.parc.xerox.com/about/history/default.html>

⁴²² Le *Xerox PARC* abritait en son sein plusieurs laboratoires (le *Computer Science Laboratory*, le *Systems Science Laboratory* et le *General Science Laboratory*).

⁴²³ In [M. Hiltzik, 1999], p. 153.

Stanford Research Institute (S.R.I.), Université de l'Utah, Université de Californie à Berkeley et Los Angeles), qui tout au long des années 60 avaient bénéficié du confortable soutien financier de l'*Advanced Research Projects Agency* et de son *Information Processing Techniques Office*. Selon l'auteur de *Dealers of Lightning, Xerox PARC and the Dawn of the Computer Age*⁴²⁴, quatre facteurs permettent de rendre compte de l'extraordinaire créativité dont firent preuve les chercheurs des laboratoires de recherche du *Palo Alto Research Center* tout au long des années 70 :

- Le premier de ces facteurs était l'argent. A l'instar d'I.B.M. en informatique, la *Xerox Corporation* occupait une position de quasi monopole dans le secteur de la reprographie professionnelle. Ses revenus annuels colossaux et les sommes extrêmement importantes qu'elle investissait dans la recherche constituaient autant d'éléments attractifs et de garanties de sécurité pour des scientifiques et des ingénieurs qui ne savaient plus guère à quoi s'attendre compte tenu de la défection annoncée de l'*Advanced Research Projects Agency*. et de l'incertitude de la position de la *National Scientific Foundation*.
- Le deuxième facteur a déjà été largement évoqué. La guerre du Vietnam amena le gouvernement américain à mettre en place une politique de récession qui n'épargna pas le secteur de la recherche. Le recentrement de l'A.R.P.A. sur des objectifs militaires et les réductions de budget dont ce processus devait s'accompagner conduisirent les scientifiques dont les recherches se trouvaient désormais placées peu ou prou sur la sellette à envisager d'aller travailler pour le compte d'intérêts privés. Peu nombreuses étaient les entreprises qui pouvaient prétendre à embaucher ces personnes – puisque les engager signifiait nécessairement pouvoir assurer ensuite le financement de leurs recherches – mais à supposer qu'elles soient en mesure de le faire, ce sont les compétences technologiques et la totalité des accomplissements que ces individus avaient réalisés auparavant que ces firmes auraient récupéré. La puissance financière de la *Xerox Corporation* et sa volonté d'investir massivement dans des domaines technologiques de pointe la positionnaient idéalement pour procéder à de pareils recrutements.

⁴²⁴ Ibid, *Introduction*, p. XXV.

- L'informatique elle-même se trouvait à un tournant de son histoire. Succédant aux inaccessibles *mainframes* des années 50, les machines opérant en *time-sharing* – il pouvait s'agir ici de mini-ordinateurs ou bien encore toujours de gros ordinateurs – avaient rapproché la machine de l'utilisateur en lui offrant l'illusion de disposer de l'intégralité de sa précieuse puissance de traitement. Avaient également contribué à ce rapprochement la mise au point de langages de programmation de haut niveau, d'applications informatiques générales et spécialisées, de systèmes d'exploitation « aisés » à prendre en main (tels *Multics* ou UNIX), et de terminaux informatiques individuels. Alors que les anciennes technologies commençaient à approcher de leurs limites, les nouveaux composants en semi-conducteur – mémoires et microprocesseurs – avaient fait ou étaient en train de faire leur apparition. Si la technique du temps partagé avait dans une certaine mesure amorcé le processus d'individualisation du rapport de l'homme à l'ordinateur, la disponibilité des nouveaux microcomposants électroniques allaient bientôt permettre de placer littéralement l'ordinateur sur son bureau (et non plus un simple terminal raccordé à un ordinateur central). Ces technologies de pointe représentaient les bases matérielles sur lesquelles une informatique nouvelle, c'est-à-dire une informatique ergonomique, intuitive, toute entière orientée vers l'utilisateur et ses besoins particuliers, allait se construire au *Xerox PARC* pendant la décennie 70.
- Le quatrième et dernier point - selon M. Hiltzik – tenait à l'expérience exceptionnelle que possédaient la plupart des membres du management du *Xerox Palo Alto Research Parc*. Tous les individus occupant des postes décisionnaires au sein de son administration et de ses différents laboratoires, en plus d'avoir été souvent des chercheurs de grande renommée, avaient aussi exercé de hautes responsabilités dans des organisations publiques et/ou privées. Il en allait ainsi de G. Pake qui avait dirigé le département de physique de l'Université d'Harvard, de Jacob E. Goldman qui avait été Professeur à Harvard et au M.I.T. avant de devenir Directeur du Laboratoire de Recherches Scientifiques de la compagnie automobile Ford, et de Robert W. Taylor qui, de 1965 à 1969, avait successivement exercé les fonctions de Directeur Adjoint et de Directeur de l'A.R.PA./I.P.T.O.
- Il conviendra ici d'ajouter un cinquième point à cette énumération. Ne s'étant jamais vu assigner d'objectifs commerciaux ni d'obligations de résultats par leur employeur, les chercheurs du *Xerox Palo Alto Research Center* qui pouvaient compter par ailleurs

sur la disponibilité de lignes de crédits substantielles, disposaient d'une liberté quasiment totale dans l'exercice de leur travail.

Les concepts et les instruments qui furent imaginés au *Xerox PARC* tout au long de la décennie 70 brillent à la fois par leur nombre et leur caractère absolument remarquable. Concernant le domaine de l'informatique et sans qu'il soit question de prétendre à atteindre ici une quelconque forme d'exhaustivité, il est possible de mentionner les éléments suivants :

- La *PARC User Interface* (P.U.I.), premier environnement informatique graphique à implémenter le modèle W.I.M.P. (pour *Windows, Icons, Menus et Pointers*). Le P.U.I. s'inspirait des travaux que Douglas C. Engelbart et ses collaborateurs avaient accomplis au S.R.I. *Augmentation Research Center*. Il fut développé par Merzouga Wilberts et ses collaborateurs, dont certains avaient travaillé au S.R.I./A.R.C. avant de rejoindre le *Xerox PARC*.
- L'éditeur de documents *Bravo*. Supportant l'affichage d'images matricielles⁴²⁵ (bitmap en anglais) ainsi que l'affichage de fontes multiples, il s'agissait de la premier programme d'édition de texte dotée de la fonctionnalité WYSIWYG (pour *What You See Is What You Get*, c'est-à-dire mot pour mot « ce que vous voyez à l'écran est ce que vous obtenez en sortie de machine⁴²⁶»). *Bravo* fut développé au *Computer Science Laboratory* par le groupe de Butler W. Lampson (un ancien du projet GENIE à l'Université de Berkeley), et Charles Simonyi (Berkeley, Stanford).
- La technologie *Ethernet*, permettant la mise en réseau local d'ordinateurs grâce à l'emploi de câbles coaxiaux ou droits. Robert E. Metcalfe s'inspira ici directement du travail de recherche et développement que Norman Abramson avait réalisé sur le réseau par ondes radio ALOHANET à l'Université d'Hawaï, pour concevoir *Ethernet*. A l'origine cette technologie fut mise au point afin de raccorder localement les stations de travail *Xerox Alto*.

⁴²⁵ Soit une image *bitmap* en anglais.

⁴²⁶ Par exemple sur la sortie papier de l'imprimante.

- Le langage de programmation orienté objet *Smalltalk* – un des premiers du genre - créé en 1972 par Alan C. Kay et son équipe (A.C. Kay avait été l'assistant de Ivan E. Sutherland à l'Université de l'Utah). Notons que *Smalltalk* était doté d'une interface utilisateur intégrée de type W.I.M.P. et qu'il était inspiré du *Lisp* (J. McCarthy, M.I.T., 1958) et de *Simula* (*Norwegian Computing Center*, K. Nygaard et O.-J. Dahl, 1960).
- Le *Dynabook*. Ce concept fut proposé par Alan C. Kay au début des années 70. Le chercheur envisageait de concevoir un ordinateur portatif – dont le *Tablet PC* serait un descendant – doté d'une interface graphique utilisateur. Avec le *Dynabook*, le père du *Smalltalk* désirait implémenter certaines des idées que Seymour Papert (collaborateur de M. Minsky au M.I.T. et concepteur du langage LOGO), et Jerome S. Brunner avaient développées dans leurs théories de l'apprentissage. L'*Alto* fut dans une large mesure pensé comme une étape intermédiaire sur la voie menant au *Dynabook*.
- L'imprimante laser. Les travaux effectués de 1969 à 1972 par Gary Starkweather déboucheront sur la mise au point du *Scanned Laser Output Terminal* (S.L.O.T.). Butler Lampson et Ronald Rider concevront par la suite un système de contrôle et de génération de caractères pour le S.L.O.T. Rebaptisé E.A.R.S. (pour *Ethernet, Alto, Research character generator, Scanned laser output terminal*), ce système d'impression sera utilisé sur le réseau de stations Alto du P.A.R.C. et servira de plateforme de départ pour la réalisation de l'imprimante laser commerciale *Xerox 9700 Electronic Printing System*.
- Ancêtre direct du langage *Postscript*, le langage de description de pages pour imprimantes *InterPress* est imaginé par les Dr. John Warnock et Chuck Geschke. Devant le manque d'intérêt manifesté par *Xerox* pour *Interpress* les deux hommes démissionneront et en décembre 1982 ils créeront leur propre entreprise: *Adobe Systems*.
- Adoption et usage généralisés de la « souris », le dispositif de pointage/saisie manuel inventé en 1963 S.R.I./*Augmentation Research Center* par Douglas C. Engelbart. Bill English, ingénieur en informatique et ancien collaborateur

d'Engelbart à l'A.R.C. qui intégra le *Palo Alto Research Center* en 1971, perfectionna la souris en remplaçant les roues qui équipaient les premiers prototypes par une boule.

- Conception par Dick Shoup (ancien de Berkeley et de Carnegie Mellon) du *SuperPaint System*, un système informatique équipé de la première carte graphique couleur, capable d'afficher des images avec une résolution en 640x486 et 256 couleurs et d'effectuer aussi la numérisation d'un signal vidéo. Dans le même temps, D. Shoup programme un logiciel de dessin et d'effets graphiques (*SuperPaint*).
- Mise au point de l'algorithme *BITBlT* (pour *Bit Block Transfer*), permettant de manipuler (déplacer, superposer), et de fusionner des images matricielles rapidement.

En parcourant cette liste d'innovations, il est aisé de remarquer deux choses : 1°) les nouveautés élaborées au *Xerox PARC* durant les années 70 représentent des éléments déterminants et typiques de la micro-informatique telle que nous la connaissons *aujourd'hui* ; et 2°) pour leur majorité ces innovations ne concernaient pas le *hardware* des machines mais des logiciels et des matériels destinés à rendre plus intuitive et plus commode l'utilisation de l'ordinateur. Depuis que les premiers micro-ordinateurs commerciaux produits à grande échelle sont apparus à la fin des années 70 (*Commodore Personal Electronic Transactor* en 1977), et au début des années 80 (*I.B.M. Personal Computer Model* en 1981 et *Apple Lisa* et *Macintosh* en 1983 et 1984), nous sommes habitués à la présence de programmes et de petits dispositifs périphériques – comme la souris par exemple – qui ont été mis au point dans le but de faciliter l'emploi des systèmes informatiques. Si on le considère dans sa globalité on peut dire qu'un ordinateur – un *Personal Computer* – est un objet formidablement composite qui résulte de l'intégration de nombreuses technologies, elles-mêmes éminemment complexes. Les premières à nous venir en tête sont en général les technologies de la microélectronique et du stockage magnétique et optique lesquelles, quant on les prend toutes ensemble, représentent en quelque sorte le versant tangible de l'ordinateur. Ensuite viennent les technologies logicielles – langages de programmation et applications – qui nous permettent d'employer l'ordinateur (ou nous incitent à le faire par leur existence même). On peut encore identifier ici un troisième grand groupe de technologies informatiques. Sans être

organiquement séparé des deux premiers puisqu'il participe tour à tour de l'un et/ou de l'autre, ce dernier trouve en réalité son lieu propre *entre* l'humain et la machine. Lorsqu'ils évoquent la démarche qui ambitionne de comprendre les interactions se déroulant entre l'humain et l'ordinateur⁴²⁷, et qui, partant de cette base, s'efforce de concevoir des systèmes informatiques (instruments ou applications), offrant un haut niveau d'ergonomie, les spécialistes parlent d'*Interaction Homme/Machine* ou d'*Interface Homme/Machine* (I.H.M.). Pour être en mesure de construire leur objet, les chercheurs qui travaillent sur les I.H.M. font appel à des méthodes et des concepts issus de différentes disciplines ayant à voir avec l'ordinateur (conception de logiciels, développement de systèmes d'exploitation et d'environnements de travail, graphisme informatique), et avec son utilisateur (psychologie cognitive, linguistique, théories de la communication et de l'apprentissage). En prenant en compte les particularités technologiques des machines et les spécificités cognitives, biologiques et biomécaniques des humains, puis en étudiant la façon dont les unes et les autres s'articulent et entrent en interaction lorsque les hommes se servent des ordinateurs, les spécialistes des I.H.M. cherchent à élaborer des dispositifs informatiques périphériques et des logiciels qui, parce qu'ils ont été spécifiquement conçus et réalisés pour et autour de l'humain, rendent aisé (ou plus aisé qu'il ne l'était déjà), l'emploi de l'ordinateur. On voit que la quasi-totalité des accomplissements (encore une fois exceptionnels) qui ont été réalisés au *Xerox PARC* jusqu'au début des années 80 ont concerné le domaine de l'*Interaction Homme/Machine*.

Afin de comprendre pourquoi il en a été ainsi, il est nécessaire d'évoquer l'influence déterminante que Robert W. Taylor exerça sur les différents développements que nous avons mentionnés ci-dessus. Comme il a déjà été dit, R. W. Taylor avait été Directeur de l'*Information Processing Techniques Offices* de 1966 à 1969. Alors qu'il travaillait au N.A.S.A. *Office of Advanced Research and Technology*, au début des années soixante, Robert W. Taylor s'était vu sollicité par J.C.R. Licklider afin d'intégrer le fameux « Comité Licklider ». Quant Ivan E. Sutherland prit la succession de Licklider à la tête de l'I.P.T.O., ce dernier lui conseilla vivement de nommer Robert W. Taylor au poste de *Research Director of Computer Science*. Lorsqu'à son tour I. E. Sutherland quitta la direction de l'I.P.T.O. pour rejoindre l'Université d'Harvard, en juin 1966, lui et Licklider proposèrent aux responsables de l'A.R.P.A. que Robert W. Taylor prenne sa succession.

Affirmer de Robert W. Taylor qu'il partageait les vues de Joseph C. Licklider quant à la manière dont il convenait de faire évoluer l'informatique relève purement et simplement de

⁴²⁷ Mais aussi entre des hommes communiquant les uns avec les autres au moyen d'ordinateurs.

l'euphémisme. Dès le début des années 60, le jeune psycho acousticien s'était littéralement passionné pour les thèses fondamentales que défendait J. C. Licklider, à savoir celle d'une informatique non plus centralisée mais distribuée (via la mise en réseau des machines), et celle d'une véritable symbiose homme/machine. Quant il était à l'*Information Processing Techniques Office*, R. W. Taylor avait travaillé avec ardeur à la concrétisation de la première de ces deux visions. Grâce à la politique de financement que J.C.R. Licklider avait mise en place à l'I.P.T.O. au début de la décennie 60, les A.R.P.A. *Contractors* avaient tout d'abord conçu les premiers systèmes informatiques capables d'opérer en *time-sharing*. Au cours de la seconde moitié des années 60, Ivan E. Sutherland et Robert W. Taylor avaient brillamment poursuivi la dynamique initiée par leur Directeur et mentor en démarrant et en pilotant le programme de recherche et de développement qui aboutit finalement à la constitution du réseau ARPANET. Mais si le rêve de l'*Intergalactic Network* si cher à J.C.R. Licklider vit essentiellement le jour à l'A.R.P.A., c'est au sein du *Xerox Palo Alto Research Center* que l'on matérialisa celui de l'*Human-Computer Symbiosis*. Nous employons ici le verbe « matérialiser » à escient car en plus des technologies informatiques avancées dont nous avons procédé plus haut à l'énumération, on doit impérativement mentionner le fait que le personnel du P.A.R.C. mit au point un ordinateur – en réalité une station de travail – qui possédait la particularité d'intégrer la plupart d'entre elles. Conjointement réalisée par le *Learning Research Group* et le *Computer Systems Laboratory*, la construction de cet ordinateur fut achevée au cours du premier semestre 1973. Ses principaux concepteurs, Butler Lampson⁴²⁸ et Chuck Thacker lui donnèrent le nom d'*Alto*⁴²⁹.

⁴²⁸ En décembre 1972 Butler Lampson a rédigé un mémorandum intitulé « *Why Alto ?* » dans lequel il présentait l'*Alto*, expliquait les raisons pour lesquelles cette machine avait été créée et pourquoi il était opportun d'en construire plusieurs dizaines (le texte de ce rapport interne peut être consulté ou téléchargé à l'adresse suivante : <http://66.102.9.104/search?q=cache:m8TV02Fu3QgJ:research.microsoft.com/~lampson/38aWhyAlto/Word.doc+why+alto&hl=fr&gl=fr&ct=clnk&cd=3>). Chuck Thacker dirigeait quant à lui l'équipe qui a conçu et réalisé l'*Alto*.

⁴²⁹ D'origine espagnole le mot « *alto* » que l'on retrouve bien entendu dans Palo Alto, signifie « haut » ou « grand ».



Photo 13: le *Xerox Alto*, développé au *Xerox Palo Alto Research Center* (P.A.R.C.), en 1973.
Image Courtesy of the Xerox Corporation.

Pour l'époque les caractéristiques de l'*Alto* étaient tout simplement impressionnantes. Son unité centrale était de petite taille (le fait de la comparer avec un minibar n'était pas rare). Ainsi était-il possible de l'installer sous une table ou sous un bureau. La machine était pourvue d'un moniteur monochrome blanc/noir à 901 lignes qui possédait une résolution de 606 x 808 pixels. Tandis que les capacités des autres terminaux graphiques se limitaient à l'affichage d'objets fixes – en l'occurrence des caractères alphanumériques et des lignes - chacun des pixels de l'*Alto* pouvait être allumé ou éteint indépendamment de tous les autres. Les possibilités d'affichage de la station de travail du PARC se trouvaient grâce à cela littéralement démultipliées. L'écran de son moniteur possédait une forme rectangulaire, proche dans ses dimensions de celles d'une feuille de papier de format A4. Le C.P.U. de l'*Alto* était un processeur à microcode 16 bits réalisé en technologie T.T.L., qui avait entièrement été imaginé au P.A.R.C. Ce dispositif était optimisé de façon à ce que les opérations de gestion des périphériques d'entrée/sortie raccordés à l'*Alto* ne dégradent pas les ressources de son processeur. La mémoire vive de l'*Alto* avait une capacité de 128 kilo-octets. Celle-ci pouvait être étendue à 512 Ko. Pour l'enregistrement de masse (stockage permanent), l'*Alto* disposait d'un disque dur *Diablo* de 10 mégaoctets et de gros disques magnétiques amovibles d'une capacité individuelle de 2,5 mégaoctets. La station de travail du *Xerox PARC* comportait également un clavier mécanique à 61 touches, une souris à trois boutons et

une interface de communication lui permettant de communiquer avec d'autres systèmes *Alto*, via une liaison réseau *Ethernet*.

Une des choses les plus remarquables à propos de l'*Alto* était indubitablement son interface graphique utilisateur: la *PARC User Interface* (P.U.I.). Le noyau de la P.U.I. était *Smalltalk*. Le langage inventé par Alan C. Kay n'était pas seulement un langage de programmation orienté objet caractérisé par une aisance de prise en main tout à fait remarquable. C'était également un environnement de développement graphique – ou un *environnement de développement intégré* (E.D.I.) si l'on veut formuler la chose en des termes plus actuels - qui formait la couche système grâce à laquelle les applications de l'*Alto* pouvaient fonctionner. Le langage de programmation orienté objet *Smalltalk* et l'environnement graphique de l'*Alto* étaient donc une seule et même chose. Un peu comme si sur un P.C. le langage *Visual C++* et l'O.S. *Windows* avaient été une unique entité, indifférenciée pour l'utilisateur. Donner une description précise des fonctionnalités offertes par la *PARC User Interface* est extrêmement aisé tant elles étaient voisines – et pour cause *elles les préfiguraient intégralement* - de celles offertes aujourd'hui par nos O.S. *Linux*, *Mac O.S.* ou *Windows*. Chacun étant désormais habitué à utiliser quotidiennement ou presque un ordinateur, tout le monde reconnaîtra aisément dans la *PARC User Interface* de l'*Alto* les différentes propriétés et fonctions qui caractérisent nos actuels environnements de travail informatiques. Près d'une décennie avant l'apparition sur le marché du *Macintosh* et de son fameux système d'exploitation à environnement graphique⁴³⁰, lequel devait comme on le sait contribuer énormément à la démocratisation de ce modèle, la P.U.I. de l'*Alto* implémentait pour la première fois le paradigme W.I.M.P. : *Windows* (fenêtres), *Icons* (icônes), *Mouse* ou *Mice* (souris), *Pointers* (pointeurs). En 1973 l'environnement de l'*Alto* permettait déjà l'affichage de fenêtres déplaçables, redimensionnables (automatiquement ou manuellement), superposables et réductibles. Pour chaque tâche donnée, il intégrait aussi des menus déroulants qui affichaient sous forme de liste verticale hiérarchisée plusieurs options de fonctions lorsque l'utilisateur les activait à l'aide du pointeur de la souris, et se rétractaient – libérant par là même de l'espace de travail – dès que celui-ci en avait terminé. L'environnement graphique de l'*Alto* comportait également des icônes, c'est-à-dire de petites représentations symboliques au graphisme explicite représentant des applications, des fichiers ou des dossiers informatiques, qui autorisaient leur activation et/ou leur manipulation. D'autres composants graphiques du même genre, comme des fenêtres surgissantes (*popup*),

⁴³⁰ Il s'agissait du *System Software*, c'est-à-dire du futur *Mac O.S.*

des boîtes de dialogue, des ascenseurs (*scroll bars*) et des boutons radio firent aussi leur apparition avec l'interface graphique utilisateur du *Xerox Alto*.

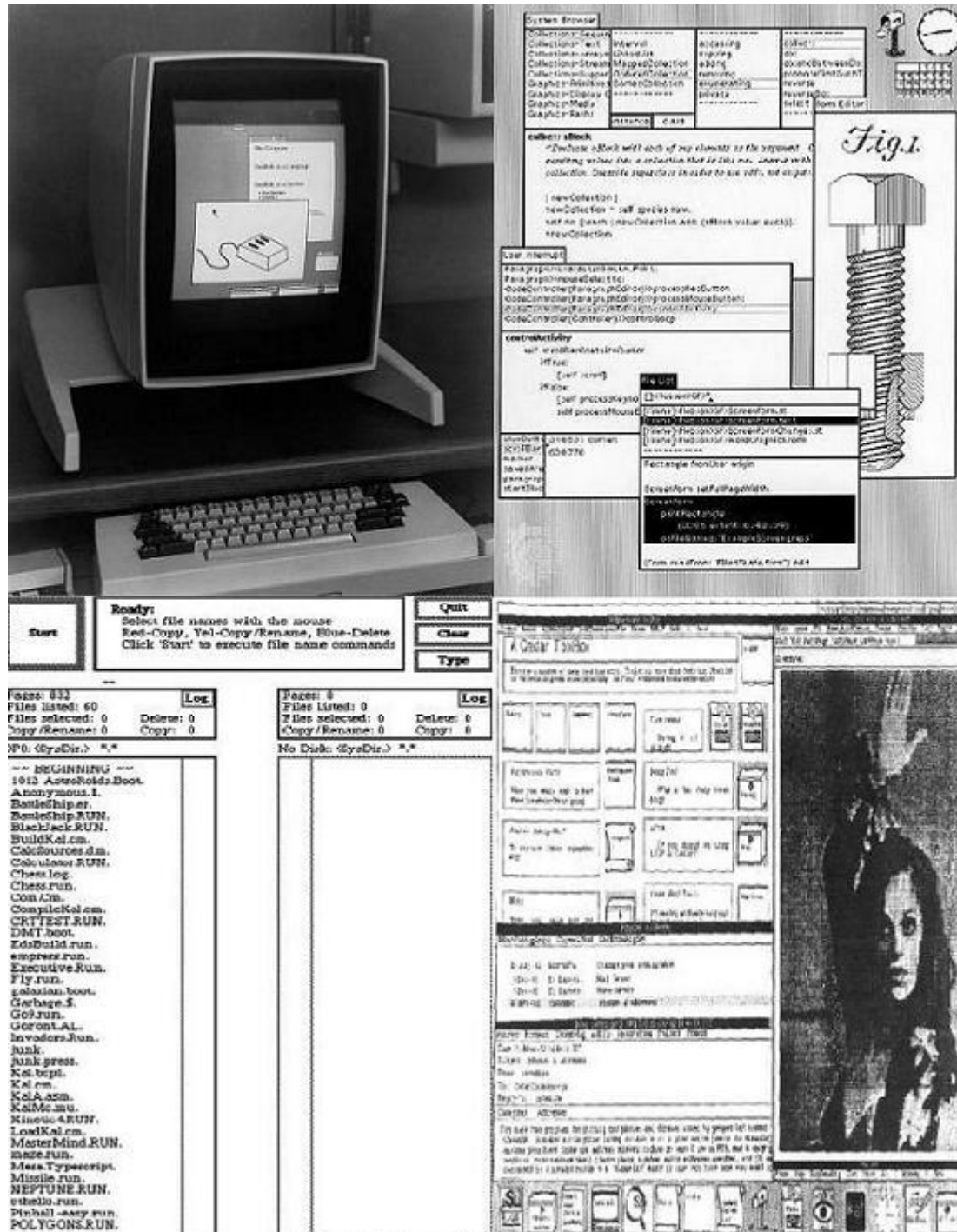


Photo 14: photomontage présentant (de gauche à droite et en partant du haut) : 1°) le clavier et le moniteur de l'Alto (on remarquera la souris représentée à l'écran) ; 2°) L'environnement de travail sous *Smalltalk* ; 3°) le gestionnaire de fichiers *Neptune* ; et 4°) l'éditeur de texte (et d'images) *Bravo*.

All images courtesy of the Palo Alto Research Center and Xerox Corporation.

Pris dans leur ensemble tous ces *widgets* (composants d'interface graphique), donnaient à l'utilisateur de l'*Alto* le sentiment qu'il se trouvait devant un environnement de travail certes inhabituel – il s'agissait en effet d'un espace symbolique *digital* affiché sur un plan *vertical* – mais avec lequel il entretenait déjà certains rapports de familiarité. Cette impression d'avoir finalement affaire à une sorte de *bureau* se trouvait en outre renforcée par les dimensions de l'écran, qui se rapprochaient comme nous l'avons dit de celles d'une feuille de papier au format A4. Cet effort de conception visant à élaborer une métaphore électronique ou informatique des éléments typiques d'un bureau – lieu de travail par excellence – fut effectué par les chercheurs du P.A.R.C. dans le but de répondre à un double objectif : démythifier l'ordinateur – ce qui est déjà connu n'inspire en effet ni la peur ni la réserve - et en faciliter l'emploi (informatique ou pas un dossier reste un dossier). L'implémentation de la fonctionnalité *WYSIWYG* (ce que vous voyez à l'écran est ce que vous obtiendrez en sortie d'imprimante), la disponibilité de logiciels de traitement de texte et de dessin puissants – comme *Bravo* et *SuperPaint* – ajoutées à la possibilité d'imprimer textes et graphismes avec une qualité encore jamais atteinte (grâce à l'imprimante laser), et aussi le fait de pouvoir partager des fichiers et d'envoyer des mails grâce au protocole réseau *Ethernet*, eurent tôt fait de rendre l'*Alto* extraordinairement populaire parmi les chercheurs du *Xerox Palo Alto Research Center*.

Véritable incarnation de l'informatique orientée utilisateur développée par *Xerox*, l'*Alto* devint opérationnel en 1973, tandis que sa production démarra un an plus tard. Peu d'exemplaires de l'*Alto* furent produits. En 1979, environ un millier d'*Altos* étaient en service. Un grand nombre de ces machines appartenait bien sûr au parc informatique du *Palo Alto Research Center*, tandis que le restant se trouvait dispersé dans certaines des unités de recherche du M.I.T., de Carnegie Mellon ou de l'Université de Stanford. Pourtant, on aura beau chercher, les ordinateurs directement dérivés de l'*Alto* que *Xerox* commercialisa – comme le *Xerox Star* en 1981 – furent des échecs (quelquefois retentissant). Lorsqu'on considère ce qu'ont réalisé les chercheurs du P.A.R.C. au cours des années 70, on ne peut manquer de s'étonner du rang somme toute très secondaire qu'occupe aujourd'hui la *Xerox Corporation* au sein de l'industrie informatique mondiale. A l'orée des années 80 il semble pourtant que la société de Stamford avait toutes les cartes en main pour se hisser au niveau des plus grandes compagnies informatiques mondiales. On sait que ce ne fut pas le cas. Dans le cadre d'un entretien accordé aux créateurs de la série de documentaires *Triumph of the Nerds: The Rise of Accidental Empires*, Steve Jobs, le cofondateur avec Steve Wozniak et Ronald Wayne de la firme *Apple Computer*, a déclaré que : « [la société] *Xerox* aurait pu

posséder la totalité de l'industrie informatique aujourd'hui. Qu'elle aurait pu être une compagnie dix fois plus grande. Qu'elle aurait pu être I.B.M. – l'I.B.M. des années 90. Qu'elle aurait pu être le Microsoft des années 90 ».

De fait force est de reconnaître que si en matière d'informatique personnelle (ou à tout le moins individuelle), le *Palo Alto Research Center* inventa littéralement le futur, par la suite la compagnie *Xerox* échoua dans une large mesure à « le » commercialiser tant sa foi dans les technologies et les concepts imaginés au P.A.R.C. était faible. Ce sont ainsi *Apple Computer* et *Microsoft* qui ont exploité – avec le succès que l'on sait – le paradigme W.I.M.P⁴³¹. Les distributions de *Smalltalk* payantes ou en *open source* abondent et si à l'instar d'I.B.M., d'*Apple Computer*, de la *Digital Equipment Corporation*, de *Hewlett Packard* ou encore de *Tektronix*, la *Xerox Corporation* a elle aussi commercialisé ses propres versions de ce langage de programmation/environnement graphique, celles-ci n'ont jamais assuré sa fortune Et cette liste pourrait encore être rallongée. Même si elle a été conçue au P.A.R.C., ce n'est pas *Xerox* mais la société *Hewlett Packard* qui a introduit la première⁴³² l'imprimante laser sur le marché de masse (il s'agissait de la *Laserjet 8ppm*). Robert E. Metcalfe a mis au point le protocole réseau *Ethernet* quant il travaillait au *Palo Alto Research Center*, mais devant le manque d'intérêt manifesté par son employeur à l'égard de cette technologie, il a créé sa propre société – *3Com* – en 1979 afin de la rentabiliser lui-même. Evidemment, et contrairement à une idée peut-être trop facilement reçue, la *Xerox Corporation* n'a pas réalisé un investissement à pertes en créant le P.A.R.C. A l'occasion d'une visioconférence réalisée pendant le *Symposium/Openhouse* organisé à Paris au mois d'octobre 2004 par le *Sony Computer Science Laboratory*, Alan C. Kay a déclaré la chose suivante :

« Il y a d'ailleurs un mythe selon lequel Xerox n'a jamais gagné d'argent avec le PARC. C'est absolument faux. Rien qu'avec l'impression laser, les investissements que représentaient le PARC ont été très largement compensés (le retour sur investissement fut très probablement d'un facteur 100). Mais Xerox a loupé un retour sur investissement d'un facteur 10.000, car la valeur des innovations issues du PARC se chiffre en milliers de milliards de dollars. Xerox a choisi de n'utiliser qu'une seule de ces technologies, celle qu'ils comprenaient⁴³³ ».

⁴³¹ Au point que la firme de Redmond a choisi le mot « *Windows* » pour désigner son produit phare.

⁴³² *Xerox* a effectivement mis sur le marché une imprimante laser – le modèle *Star 8090* – en 1977. Cependant son coût était tellement élevé que sa diffusion demeura confidentielle.

⁴³³ In Alan C. Kay, « *Fostering creativity: children and computers* », *Sony Computer Science Laboratory Symposium on Creativity*, Paris, 5 octobre 2004.

A propos du P.A.R.C., nul ne saurait songer un instant à taxer la *Xerox Corporation* de frilosité exagérée. Profitant il est vrai d'un climat social et politique très favorable, l'industriel n'hésita pas à engager des sommes extrêmement importantes pour financer l'établissement d'une structure sans équivalent, engager les meilleurs scientifiques du pays, et leur permettre d'effectuer dans des conditions idéales des recherches avancées concernant des domaines technologiques auxquels la firme de *Stamford*, historiquement, était étrangère. Ce manque de familiarité de *Xerox* avec l'informatique fut la clef de la réussite du P.A.R.C. – en prévision de l'avenir la société *Xerox* avait besoin d'un tel fer de lance et d'emblée elle consentit à investir massivement afin de forger cet outil d'excellence - mais aussi la cause principale de son incapacité à tirer partie des avancées qui y furent réalisées. Rétrospectivement la cécité dont fit preuve *Xerox* à la fin des années 70 peut paraître aberrante. Mais encore une fois, il convient de rappeler que cette compagnie ne possédait ni culture, ni expérience dans le domaine de l'informatique. Quant on se souvient des erreurs stratégiques⁴³⁴ grossières qu'I.B.M. se laissa aller à commettre parfois, on ne saurait réellement s'étonner du fait qu'une firme aussi peu aguerrie que l'était *Xerox* en matière d'industrie informatique ait privilégié la voie de la prudence et du conservatisme quant la question s'est posée de savoir ce qui devrait ou non être commercialisé, parmi toutes les choses qui avaient été conçues au P.A.R.C. En définitive c'est la technologie qui se rapprochait de ce qu'elle connaissait le mieux, à savoir l'impression laser, qu'elle décida de privilégier.

Quid de l'*Alto* dans ces conditions ? Cette machine, tous les spécialistes de l'histoire de l'informatique s'accordent à la reconnaître, possédait une bonne dizaine d'années d'avance sur les tous les autres systèmes informatiques du moment. Ce serait une erreur toutefois de chercher à établir une comparaison directe entre l'*Alto* – qui était une station de travail - et les machines les plus emblématiques des débuts de la micro-informatique. En effet leurs caractéristiques techniques, les usages à destination desquels ils avaient été conçus et aussi leur prix faisaient du *Mark 8*, de l'*Altair 8800*, de l'*IMSAI 8080* ou des tout premiers modèles d'*Apple* de véritables micro-ordinateurs. En dehors peut-être des systèmes fabriqués par la firme de Cupertino, lesquels pouvaient sans doute être vus comme des produits complets et aboutis⁴³⁵, ces premiers micro-ordinateurs étaient fort rudimentaires. Leur programmation s'effectuait via des commutateurs manuels disposés en façade et bien souvent, c'était un simple oscilloscope que leurs (heureux) possesseurs utilisaient en guise de sortie vidéo. Ces

⁴³⁴ Par exemple la société I.B.M. ne croyait guère au principe du *time-sharing*. Elle y vint sur le tard et un peu en catastrophe, pour contrer la concurrence. Quant à l'informatique personnelle, on peut difficilement s'accorder à dire qu'elle en fut une pionnière.

⁴³⁵ Selon les critères applicables à la seconde moitié des années 70.

micro-ordinateurs ne disposaient en outre de rien qui puisse se voir vaguement rapproché de l'interface graphique *Smalltalk* de l'*Alto*, ou bien encore de l'un ou l'autre de ses périphériques révolutionnaires (souris à trois boutons, imprimante laser). Quand à leur puissance computationnelle et à leur capacité mémoire, elles ne leur auraient tout simplement pas permis de supporter la gestion de ces instruments d'entrée/sortie très sophistiqués. A leur « décharge », il nous faut rappeler que ces différentes machines coûtaient entre 500 (*Altair* 8800 en kit) et 1300 dollars (*Apple II* avec 4 Ko de R.A.M.) quant la valeur unitaire de l'*Alto*, elle, se montait à un peu plus de 40000 dollars. Les technologies matérielles et logicielles ultraperformantes que l'on avait mises au point pour construire et faire fonctionner l'*Alto* avaient en effet un coût, qui le plaçait d'emblée dans la catégorie des mini-ordinateurs. Bien qu'il ait été d'abord et avant tout pensé dans la perspective d'humaniser l'ordinateur, d'en faire une machine si facile à prendre en main que des enfants s'y seraient d'emblée sentis à l'aise, le *Xerox Alto*, modèle d'ergonomie et de puissance par excellence, n'était pas destiné aux particuliers. A une époque où l'informatique personnelle était encore en pleine phase d'élaboration et même s'il représentait ce vers quoi devait finalement tendre ce processus de devenir, l'*Alto* était beaucoup trop cher pour que des particuliers puissent raisonnablement envisager d'en acquérir un exemplaire. En réalité acheter un mini-ordinateur D.E.C. P.D.P. 8 ou P.D.P. 12 aurait été nettement plus économique ici. Même le *Xerox Star* (ou *Information System 8010*), introduit par *Xerox* en 1981 fut un échec. A tous les égards le micro-ordinateur *Star* était un descendant direct de l'*Alto*. Seul son prix – 16000 dollars ! – hérité lui aussi de l'*Alto* le plaçait définitivement hors de portée des bourses des particuliers. C'est en définitive le *Macintosh* d'*Apple Computer* (2495 dollars en janvier 1984) et les P.C. équipés de *Microsoft Windows 1.0* (100 dollars en novembre 1985, plus le coût d'un P.C. à microprocesseur *i386*, soit environ 5000 dollars), qui érigèrent le principe de l'interface graphique W.I.M.P. et la présence de la souris en standards industriels.

Il serait exagéré de prétendre que l'informatique personnelle – cette troisième informatique identifiée par Philippe Breton – a démarré au *Xerox Palo Alto Research Center*. Il serait en fait plus approprié de dire que ce sont les *formes futures* de la micro-informatique – celles qu'elle commença à revêtir partir de la seconde moitié des années 80 – qui furent pensées et développées au P.A.R.C. Quant à la micro-informatique elle-même, on doit fondamentalement ses débuts à des amateurs passionnés. Comme nous allons le voir à présent, ce sont en effet des individus férus d'électroniques, des petits entrepreneurs, des *hackers* et des *nerds* qui, grâce à leur action et à leurs réalisations audacieuses, firent de l'ordinateur non seulement un objet que l'on *pouvait* posséder, mais aussi que l'on *désirait* posséder.

3.5. Le rôle joué par les amateurs d'électronique et leurs réseaux ; les premiers micro-ordinateurs de masse ; le logiciel et le lecteur de disquettes comme forces motrices de la micro-informatique.

3.5.1. Les *Electronic Hobbyists* et le MARK-8 de Jon Titus.

Si la première et la deuxième informatique doivent être considérées comme résultant des actions combinées de l'état, de grandes institutions scientifiques et de puissantes entités industrielles – et cela sur trois décennies – on doit en grande partie l'essor de la troisième informatique, c'est-à-dire de la micro-informatique ou de l'informatique personnelle, à la mobilisation et à l'ingéniosité d'individus souvent jeunes et férus de technologie (on dirait aujourd'hui technophiles). Héritiers directs de la communauté des radioamateurs dont les membres, au sortir de la deuxième guerre mondiale, avaient également commencé à se tourner vers le bricolage de postes de télévision et celui de chaînes à haute fidélité, ceux que l'on a fini par désigner sous le nom de *computer hobbyists* – expression qu'on peut éventuellement traduire par « micro amateurs » – répondaient en général à un profil psychologique et professionnel type. Lorsqu'ils n'exerçaient pas une profession entretenant un lien direct ou indirect avec les secteurs de l'informatique et de l'électronique, ces passionnés s'étaient en général déjà trouvés en contact avec des ordinateurs dans le cadre de leurs études au lycée et/ou à l'université. Il est important ici de bien remarquer une chose. Pour ces individus dont le comportement en société était parfois déroutant, le paradigme du système informatique était le mini-ordinateur⁴³⁶ (assorti bien sûr de ses différents équipements périphériques). Or si cette classe de machines n'avait plus rien de commun avec les Léviathans à lampes des années 50, il s'agissait encore d'ordinateurs onéreux et volumineux. Ainsi il fallait compter au moins 20000 dollars pour une installation complète, laquelle occupait fréquemment la superficie d'une salle de classe. A moins de posséder une fortune personnelle, nul amateur n'aurait pu se permettre une pareille dépense. Ce qui, dans les ordinateurs, fascinait en tout premier lieu ces *hobbyists* était la formidable complexité de leur « mécanique » interne. Pour des personnes habituées à réaliser de petits montages en kit dont les plans et les composants étaient le plus souvent commandés par le biais de publicités parues dans des magazines spécialisés, ces machines universelles encore si coûteuses représentaient assurément ce qui se faisait de plus abouti et de plus performant en matière de constructions électroniques. A cause de sa nature

⁴³⁶ Il s'agissait d'ailleurs bien souvent d'un D.E.C. *Programmed Data Processor*.

fondamentalement logico-mathématique, de sa difficulté inhérente et de tout ce qu'il était possible de réaliser grâce à elle – comme l'avait démontré *Spacewar* on pouvait tout faire avec un ordinateur y compris *jouer* – la programmation, discipline qui permettait de *contrôler* un des artefacts les plus compliqués qu'ait jamais engendré l'industrie humaine, revêtait aussi pour eux une dimension extrêmement attractive. A l'instar de la tâche consistant à assembler en une unité fonctionnelle des composants électroniques épars sur la base de plans obtenus par correspondance, ils ne percevaient pas la programmation comme un labeur difficile, rebutant. Pour eux c'était plutôt un défi technique de plus à relever. Un de ceux que le profane ne pouvait se résoudre à comprendre. Tout comme l'assemblage de kits électroniques, ces férus de technologie considéraient que la programmation pouvait être une activité récréative, gratifiante, et donc génératrice de plaisir. Aux yeux de ces gens, et pour l'ensemble des motifs qui viennent d'être évoqués, le fait de posséder un ordinateur, même s'il était a priori irréalisable, représentait souvent un rêve obsédant. En 1974 ce rêve commença à devenir réalité grâce au microprocesseur *i8008* que la société *Intel* commercialisait depuis le mois d'avril 1972.

Dans l'Amérique des années 70, les radioamateurs et les passionnés de technologie électronique avaient la possibilité d'acheter plusieurs revues à grande diffusion – on les trouvait en effet dans n'importe quel kiosque à journaux - consacrées à leur hobby. Chaque mois, ces magazines spécialisés passaient en revue les nouveaux composants introduits sur le marché, dévoilaient techniques et tournemains aux électroniciens amateurs et, bien souvent, proposaient des plans de montage et des listes de pièces pour permettre à leur lectorat de construire tel ou tel gadget domestique (une petite alarme ou un amplificateur audio par exemple).

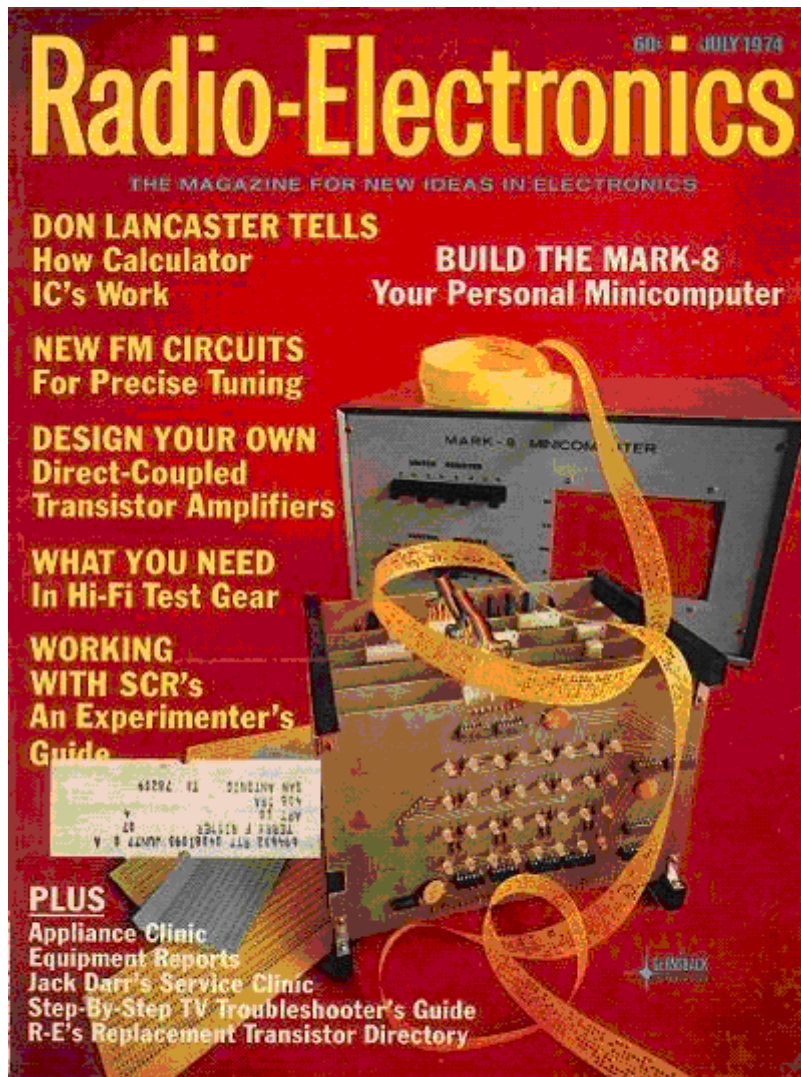


Photo15: couverture du numéro du mois de juillet 1974 du mensuel *Radio-Electronics*. Le magazine « pour les nouvelles idées en électronique » présentait ici pour la première fois le « mini-ordinateur personnel » MARK-8. Image Courtesy of the Computer Museum of America.

Il n'était pas rare que ces journaux – *Popular Electronics*, *Radio Electronics* ou *QST* étaient les plus connus – offrent par ailleurs la possibilité à leurs lecteurs de commander un kit contenant les plans et les composants nécessaires à l'assemblage des gadgets présentés dans leurs pages. C'est dans le numéro du mois de juillet 1974 de la revue *Radio-Electronics* que parut un article d'environ 4 pages, qui présentait et proposait de construire le MARK-8. Le magazine avait d'ailleurs fait sa couverture avec la petite machine (voir photographie ci-dessus) en usant d'un titre pour le moins accrocheur puisqu'il invitait le lecteur à « *Construire le MARK-8, votre mini-ordinateur personnel* [sic] ». La chose n'était pas fortuite puisque pour son introduction, le MARK-8 avait bénéficié d'un véritable plan de commercialisation préparé par Jon Titus, son concepteur, et l'équipe rédactionnelle de *Radio Electronics*. Ainsi

l'article consacré au MARK-8 contenait-il un descriptif présentant les caractéristiques techniques de la machine, et suggérait les utilisations qu'il était possible d'en faire. Les informations divulguées étaient cependant insuffisantes pour permettre à un amateur, même expérimenté, d'entreprendre seul l'assemblage du « mini-ordinateur personnel ». Pour cela, il était nécessaire de commander les plan conçus par Titus auprès de la revue *Radio Electronics*, puis 1°) de se procurer les six plaquettes imprimées permettant de réaliser les circuits de l'ordinateur et 2°) d'acheter le microprocesseur - un *Intel 8008* - et les différents composants de la machine auprès de leurs fabricants respectifs. Grâce à un accord qu'il avait passé avec la *Techniques Inc.*, une petite société spécialisée dans la production d'éléments électroniques, les lecteurs intéressés pouvaient se procurer les six circuits imprimés en échange d'une somme légèrement inférieure à 50 dollars. Pour le reste, ils devaient prendre contact avec *Intel*. En tout et pour tout, un amateur devait déboursé à peu près 300 dollars pour se trouver en mesure de démarrer la construction de son ordinateur MARK-8⁴³⁷. Puisque Jon Titus percevait des royalties sur les ventes des manuels de fabrication du MARK-8 édités par *Radio-Electronics*, on sait de façon tout à fait certaine qu'une dizaine de milliers de ces fascicules furent commandés par des particuliers. De la même manière, et étant donné que le plan de commercialisation du MARK-8 imaginé par Titus prévoyait qu'il toucherait une certaine somme d'argent sur chaque ensemble de plaquettes de circuits imprimés acheté auprès de la société *Techniques Inc.*, on sait qu'environ 2500 personnes firent effectivement l'acquisition de ces composants. A titre de comparaison, on rappellera que dans le courant des années 1972 et 1974, la firme *Hewlett-Packard* (bientôt suivie par *Texas Instruments*), introduisit deux calculatrices électroniques, respectivement les modèles HP-35 et HP-65. La HP-35 *Classic* fut la première calculatrice scientifique multifonctions de poche. Elle automatisait notamment le calcul des fonctions trigonométriques et des fonctions exponentielles. Son coût s'élevait à 350 dollars. Nettement plus perfectionnée que sa devancière puisqu'elle offrait à ses possesseurs la possibilité de composer puis d'entrer leurs propres programmes grâce à un langage rudimentaire et à l'usage de petites cartes magnétisées servant de médium d'enregistrement, la calculatrice professionnelle HP-65 *Classic SUPERSTAR* coûtait quant à elle 795 dollars. Dans l'un et l'autre cas, on le voit, le prix de ces calculatrices excédait celui du MARK-8 (et à la différence de celui-ci elles pouvaient. Le succès commercial époustouflant immédiatement rencontré par la calculatrice

⁴³⁷ Concernant le MARK-8, l'emploi du vocable « kit » est quelque peu abusif puisque les personnes intéressées par sa construction devaient se procurer son plan et ses divers composants auprès de plusieurs fournisseurs. Ce terme est donc employé ici par simple souci de commodité.

programmable de *Hewlett-Packard* – en à peine une année ce ne sont pas moins de 25000 exemplaires de HP-65 qui furent ainsi écoulés par le constructeur américain – est selon nous fort intéressant car il est révélateur d'une tendance qui commença à se dessiner dans la société nord-américaine au cours de la première moitié des années 70: celle d'une demande croissante pour des dispositifs de calcul électroniques personnels offrant la possibilité d'être programmés (même si c'était de façon rudimentaire). Compte tenu du prix élevé de ces machines, il n'est guère surprenant d'apprendre que la majorité de ceux qui se portèrent acquéreurs de calculatrices HP-65 le firent d'abord et avant tout afin de répondre à des exigences professionnelles. Dans bien des cas cependant cette motivation initiale plutôt sérieuse n'empêcha pas le développement d'un attrait personnel pour l'activité de programmation. Pour leur très grande majorité, les possesseurs de HP-65 ne pouvaient évidemment pas être assimilés à des *Electronic Hobbyists*, ou bien encore à des hackers. Pourtant certains en vinrent peu à peu à partager la passion dévorante que ces derniers nourrissaient à l'endroit des instruments électroniques programmables et de leurs langages. Avec les amateurs d'électronique et les hackers, qui devaient représenter ici une sorte d'avant-garde éclairée, ce sont (au moins pour une partie), ces gens déjà initiés aux arcanes de la programmation qui formèrent la base des consommateurs de produits micro-informatiques pendant la seconde partie de la décennie 70. Leur rôle ne saurait être négligé dans cette affaire et il convenait par conséquent de leur faire bonne place.

Sur les 2500 électroniciens amateurs qui commandèrent les circuits imprimés du MARK-8, combien achetèrent ensuite le microprocesseur *i8008*, c'est-à-dire la pièce maîtresse du kit permettant d'assembler l'ordinateur MARK-8 ? Cela est très difficile à dire. Cependant et après recoupements successifs d'informations, la fourchette couramment admise lorsqu'il s'agit d'estimer le nombre de MARK-8 dont la construction fut un jour achevée se situe d'ordinaire entre 1000 et 1500 unités. Au regard des quantités formidables auxquelles nous sommes désormais habitués en matière de diffusion d'équipements informatiques, ce nombre peut paraître fort peu élevé. Afin d'être en mesure d'apprécier tout ce qu'il recouvre, il convient donc de le resituer à présent dans son contexte. Au début de 1974, aucun individu ne possédait d'ordinateur (tout au moins à titre privé et sauf exception qui nous aurait échappée). Pourtant ce ne sont pas moins de 10000 personnes qui firent la démarche de se procurer le descriptif du MARK-8 contre espèces sonnantes et trébuchantes. Compte tenu du profil type des lecteurs de *Radio-Electronics*, il y a fort à parier que parmi cette dizaine de milliers de passionnés d'électroniques fascinés par l'informatique, nombreux étaient ceux qui avaient déjà eu l'occasion d'utiliser un ordinateur dans le cadre de leurs études ou de leurs

activités professionnelles. Dans un article⁴³⁸ qu'il a consacré à la genèse du MARK-8 en 1999, Jon Titus a d'ailleurs raconté combien ses premières expériences informatiques avec le D.E.C. P.D.P.-8/L du département de chimie du *Virginia Polytechnic Institute*, avaient été déterminantes pour lui. Ce mini-ordinateur restant financièrement inaccessible au commun des mortels, Titus éprouvait une certaine frustration à ne pas pouvoir en disposer pour son usage personnel. C'est cela qui l'amena à concevoir l'idée d'un petit ordinateur économique que tout un chacun pourrait posséder et utiliser pourvu seulement qu'il soit prêt à dépenser la somme de 300 dollars et à consacrer de très nombreuses heures à son assemblage. Dans ses aspirations premières Jon Titus n'était au fond guère différent de la majorité de ceux auxquels il espérait vendre son kit informatique. C'était tout simplement quelqu'un que les ordinateurs intéressaient au plus haut point et même s'il n'avait en vérité que fort peu d'idées quant à ce qu'il pourrait finalement réaliser au moyen d'un tel instrument (à titre privé s'entend), il désirait ardemment en posséder un à son domicile. Comme en témoigne le nombre d'amateurs d'électronique qui passèrent commande du manuel du MARK-8 et « » celui, plus modeste mais encore très significatif, de ceux qui se procurèrent les différents composants nécessaires à sa construction, le fait que l'on ne sache pas exactement ce que l'on se trouverait en mesure de faire avec un ordinateur si d'aventure on en avait un à la maison ne constituait aucunement un frein à l'enthousiasme que ce type d'instrument soulevait au sein d'une certaine frange de la population. Tout ceci ne peut manquer de paraître paradoxal. A quoi bon en effet dépenser de l'argent et surtout du temps pour réaliser une machine complexe et rebutante si au final on ignorait à quoi on pourrait bien l'employer ? Il faut alors se souvenir que de manière générale, le défi consistant à fabriquer un instrument électronique revêtait pour les *Electronic Hobbyists* une importance au moins équivalente – si ce n'est même supérieure – à la destination fonctionnelle, et donc aux possibles utilisations finales, dudit dispositif.

Sachant que pour ces multitudes de passionnés souvent nourris de science fiction l'ordinateur représentait à l'époque le plus haut degré qui se puisse concevoir en matière de technologie de pointe, le simple fait de se voir offrir la possibilité d'en construire un de ses propres mains (et à moindres frais qui plus est), représentait déjà une fin en soi. Une fin qui en raison de son caractère remarquable primait sur la question des usages que l'on pourrait éventuellement faire ensuite de cet ordinateur. Bien sûr, à supposer que ces amateurs enthousiastes parviennent à assembler convenablement le MARK-8, il leur resterait encore à

⁴³⁸ Jon Titus, « The Mark-8 Minicomputer...being some memories of the machine from its designer, Jon Titus », document en trois parties (*Part 1: The Beginning; Part 2: The Design; Part 3: The After Effect*), consultable à l'adresse suivante: <http://www.his.com/~jlewczyk/adavie/mark8b.html>.

acquérir les bases de son langage assembleur, seul capable de leur permettre de gouverner les opérations de la précieuse machine. Or ce défi logique et mathématique – car la programmation ne concerne rien d’autre que la logique et les mathématiques, a fortiori quant il est question de langages qui se rapprochent foncièrement de la modalité de fonctionnement la plus élémentaire des ordinateurs – devait captiver l’attention des *Electronic Hobbyists* comme l’avait auparavant fait celui consistant à construire le petit ordinateur imaginé par Jon Titus. Pour résumer, et après avoir appréhendé les subtilités de l’architecture d’un ordinateur en construisant un exemplaire de cette machine composant par composant, il s’agissait désormais pour eux de comprendre et de maîtriser l’outil logique assurant le contrôle et la coordination de ses divers composants matériels. Même si ce versant des choses relevait fondamentalement de l’ordre logico-mathématique, l’aspect technique de la démarche qu’ils étaient susceptibles de poursuivre après avoir construit le petit ordinateur primait ici encore une fois sur son caractère proprement utilitaire. En somme et au moins pendant le temps que pouvait durer la phase d’apprentissage, le fait même d’apprendre à programmer, pour ces *hobbyists*, l’emportait sur ce qu’ils pouvaient effectivement programmer. L’impact qu’eut le MARK-8 sur la communauté encore très embryonnaire et très spécialisée des micro informaticiens est souvent occultée par le succès marquant que connurent en 1975 les deux machines dont nous allons maintenant parler, le M.I.T.S. *Altair* 8800A et l’IMSAI 8080. On sait cependant que plusieurs mois avant la fondation du fameux *Homebrew Computer Club* (celle-ci eut lieu en mars 1975), deux groupes d’utilisateurs de MARK-8 se constituèrent aux Etats-Unis, le premier en Californie et le second dans le Colorado. A l’image des *Users Groups* mis sur pied dans les années 50 par les géants de l’industrie informatique – et bien entendu à une échelle incomparablement plus modeste – ces deux clubs dont les centres d’intérêt se situaient quelque part entre l’électronique et une informatique personnelle en cours de définition s’efforçaient de promouvoir « leur » machine en tenant des réunions et en éditant régulièrement un bulletin contenant conseils techniques et informations diverses à l’intention de tous ceux que le MARK-8 – et plus généralement la micro-informatique – commençaient à intéresser.

3.5.2. Le M.I.T.S. *Altair* 8800.

A propos de l’ordinateur personnel inventé par Jon Titus, il est une anecdote intéressante car éminemment révélatrice du fait qu’il y eut pour ainsi dire un avant et un après MARK-8. Il faut savoir en effet qu’avant de proposer l’article qui décrivait sa machine au

magazine *Radio-Electronics*, Jon Titus l'avait soumis au comité de lecture de son concurrent direct, *Popular Electronics*. Or la rédaction de cette revue ne s'était pas montrée le moins du monde intéressée par le document de Titus. Une dizaine de mois plus tard pourtant, les choses avaient profondément changé, y compris l'attitude adoptée par *Popular Electronics* à l'égard des ordinateurs personnels...Au mois de janvier 1975, *Popular Electronics* illustra ainsi sa couverture au moyen de la photographie d'un ordinateur – le M.I.T.S. *Altair* 8800 – qu'il proposait par ailleurs d'acquérir par correspondance et sous la forme d'un kit à monter pour la somme de 400 dollars (ou 600 dollars si l'on désirait obtenir une machine déjà assemblée). Ce petit ordinateur en apparence très similaire au MARK-8 imaginé par Jon Titus était présenté comme « *Le premier mini-ordinateur en kit ... capable de rivaliser avec des modèles commerciaux.* ». Au sein de sa rubrique *Construction Articles*, le magazine contenait aussi la première partie d'un article intitulé « *Altair 8800 Computer Part I. The most powerful minicomputer project ever presented – for under \$400*⁴³⁹ ». Il avait été rédigé par Edward H. Robert et Williams Yates. A l'origine de la conception de l'*Altair* 8800, Edward H. Robert était le co-fondateur de la petite société qui le commercialisait, la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems* (M.I.T.S.). Celle-ci avait été créée par lui-même, Forrest M. Mims III⁴⁴⁰ et deux autres personnes, Stan Cagle (un camarade de collège) et Glen Doughty (un officier de l'*U.S. Air Force*), à Albuquerque (Nouveau Mexique), au cours de l'année 1968. Williams Yates était quant à lui l'un des principaux collaborateurs d'E. H. Roberts. En 1969 Edward H. Robert servait en qualité d'ingénieur en électronique à l'*Effects Branch Weapons Laboratory* de la base de l'*U.S. Air Force* de Kirtland, à Albuquerque, au Nouveau Mexique.

⁴³⁹ Edward H. Robert et William Yates, « *Altair 8800 Computer Part I. The most powerful minicomputer project ever presented – can be built for under \$400* », in *Popular Electronics*, vol. 7, n°1, pp. 33-38, janvier 1975. La seconde partie de cet article fut publiée dans le numéro de février 1975. On notera également que dans son éditorial, Arthur P. Salsberg (le directeur éditorial de la revue), annonçait que « *L'ordinateur domestique [était] là* », (*The Home Computer is Here*, Editorial p. 4.).

⁴⁴⁰ Ce dernier vendit les parts qu'il détenait de la société M.I.T.S. en 1970. Il ne participa donc pas au développement de l'*Altair* 8800.

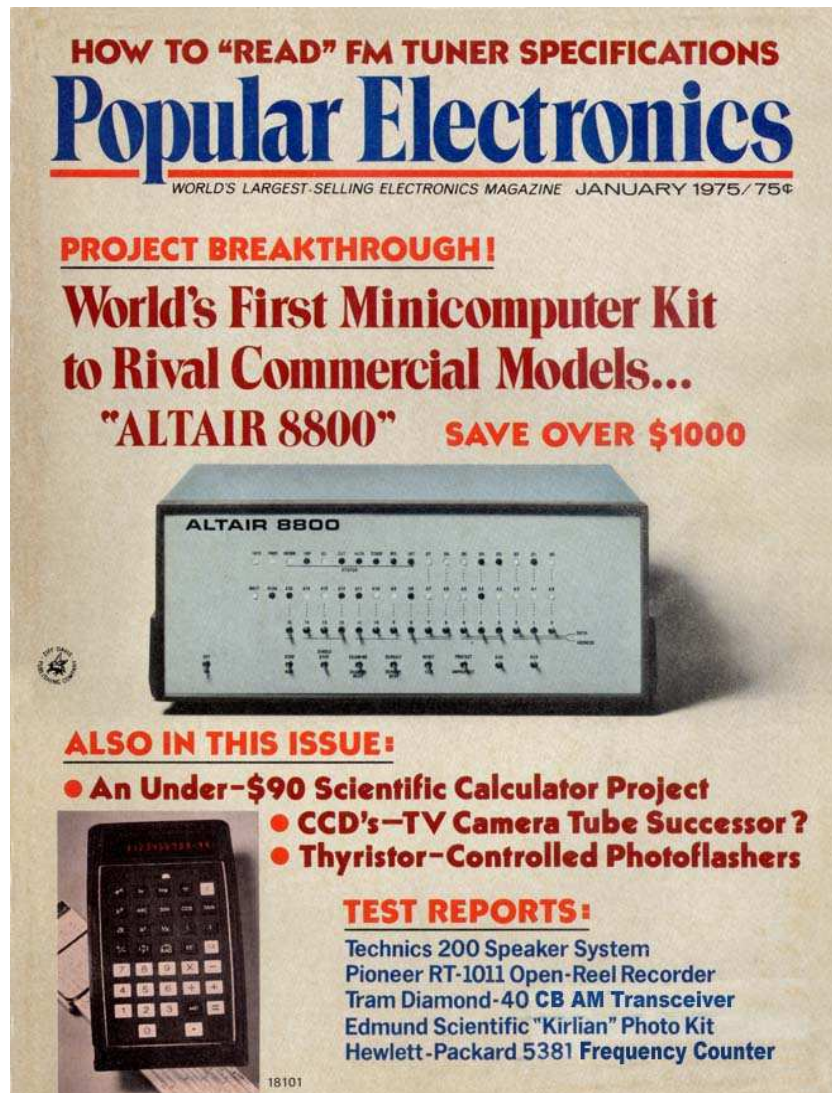


Photo 16 : couverture du numéro de janvier 1975 du magazine américain *Popular Electronics*. La revue titrait : «*Altair 8800 le premier kit de mini-ordinateur au monde capable de rivaliser avec les modèles commerciaux*». Image Courtesy of the Digibarn Computer Museum.

Afin de valoriser leurs connaissances et leur savoir-faire en matière de technologie électronique, E. H. Robert et ses trois compagnons décidèrent de mettre au point et de vendre des petits kits pour modèles réduits radiocommandés, principalement des transmetteurs pour avions et fusées. Pour ce faire, ils créèrent la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems Inc.*, société dont les activités commerciales commencèrent dans le garage d'Edward H. Robert. En 1970, après avoir racheté les parts de ses associés, Roberts implanta son entreprise dans des locaux plus vastes et il commença à diversifier sa production en concevant des kits permettant de réaliser des calculatrices électroniques de poche. Malheureusement pour les affaires de M.I.T.S. – lesquelles commençaient alors à se porter plutôt bien - l'année 1972 fut celle que le géant *Texas Instruments* choisit pour introduire sur le marché ses propres

calculatrices électroniques. Basées sur les puces nouvellement conçues par le faiseur texan, ces calculatrices complètes et performantes étaient surtout vendues à un prix qui défiait véritablement toute concurrence⁴⁴¹. Les sociétés de moindre taille qui s'étaient spécialisées dans le développement et la vente de ce type d'articles furent prises dans une tourmente financière qui laissa exsangues un grand nombre d'entre elles. Lourdemment endettée, la firme de Roberts n'échappa que de justesse à la banqueroute et son fondateur fut contraint de batailler fermement pour la maintenir à flots. C'est dans ce contexte économique singulièrement défavorable qu'Edward H. Robert décida de développer un petit ordinateur. En plusieurs occasions déjà, il avait caressé cette idée sans toutefois jamais lui donner de suite. Désormais les circonstances l'exigeaient: cette machine, à supposer bien sûr qu'on soit en mesure de l'écouler convenablement, pourrait sauver M.I.T.S. du naufrage qui semblait l'attendre. Pour Roberts et sa société, concevoir un ordinateur était donc devenu une simple question de survie économique. Eut égard à cela, Roberts n'avait désormais plus droit à l'erreur. Pour élaborer son ordinateur, il délaissa le microprocesseur *i8008* (employés entre autres choses sur le MARK-8), et le récent *Motorola* 6800 et choisit de recourir à la nouvelle puce d'*Intel*, le modèle *i8080A*. Successeur de l'*i8008* avec lequel il était d'ailleurs compatible, ce microprocesseur cadencé à 2 MHz était capable d'adresser une mémoire à accès aléatoire (R.A.M.) d'une capacité de 64 Ko et il possédait la particularité de posséder un répertoire d'instructions très complet. L'*i8080* était composé de 6000 transistors gravés en technologie 6 microns. Il était doté de 7 registres 8 bits (dont 6 combinables pour former trois registres de 16 bits), d'un accumulateur 8 bits, d'un pointeur de pile (sous la forme d'un registre 16 bits), et d'un pointeur d'instruction (registre 16 bits également). Conditionné dans un boîtier D.I.P. (*Dual In-line Package*) en plastique ou céramique pourvu de 40 broches, ce microprocesseur était capable d'utiliser un bus d'adressage opérant sur 16 bits ainsi qu'un bus de données travaillant sur 8 bits. Il possédait de surcroît 512 ports d'entrée/sortie (256/256), ce qui permettait aux unités périphériques d'être raccordées à l'ordinateur sans qu'il soit nécessaire de leur assigner individuellement un espace mémoire spécifique. Avec l'*Intel* *i8080A*, le nombre de puces additionnelles nécessaire à la construction d'un système informatique opérationnel n'était que d'une demi-douzaine quant il en fallait près de vingt avec l'*i8008*. En raison de toutes ces propriétés, la puce *i8080A* est habituellement considérée

⁴⁴¹ Spécialement celle qui proposait des instruments devant être assemblés. A titre d'exemple, il fallait en général compter une dépense d'une centaine de dollars pour obtenir un kit électronique permettant de construire une calculatrice d'entrée de gamme. La société *Texas Instruments* proposait elle un modèle fonctionnellement équivalent et déjà prêt à l'emploi pour environ la moitié de cette somme.

comme le premier microprocesseur véritablement utilisable – c'est-à-dire employable d'une façon qui soit pratique, aisée et efficace - dans un ordinateur.

En homme d'affaires consommé et puisque qu'il avait prévu que son ordinateur, à l'instar de toutes ses productions antérieures, devrait être livré à ses commanditaires sous la forme d'un kit complet, Edward H. Robert entama des négociations commerciales avec la société *Intel*. Ceci dans le but d'obtenir des tarifs satisfaisants sur des volumes relativement importants de puces *i8080A* (initialement Robert espérait vendre quelques centaines d'*Altair 8800*). De fait, il parvint à obtenir de la part du faiseur de Santa Clara un prix unitaire remarquablement intéressant. Chacun des microprocesseurs *i8080A* qu'il acquerrait lui reviendrait à 75 dollars, alors que le coût normalement pratiqué pour ce produit était de 360 dollars. La chose n'est nullement anecdotique puisqu'en parvenant à faire ainsi baisser les prix sur le dernier fleuron de la technologie d'*Intel* – lequel devait constituer le composant le plus onéreux, mais aussi le plus essentiel de son ordinateur - E. H. Robert fut à même de proposer son kit d'*Altair 8800* à un prix singulièrement abordable. Le puissant microprocesseur *i8080A* coûtant en temps normal presque aussi cher que l'intégralité du kit informatique commercialisé par M.I.T.S., cela permit d'assurer la diffusion de ce dernier au-delà de toutes les espérances permises. A partir de ce point, les versions concernant le déroulement exact de la genèse de l'*Altair 8800* tendent quelque peu à diverger, selon qu'on prend en compte le témoignage des membres de la rédaction de *Popular Electronics*, ou celui des protagonistes directs de sa genèse, chez M.I.T.S. Qui, de Leslie Solomon et Arthur P. Salsberg (respectivement éditeur technique et directeur éditorial de la revue), ou d'Edward H. Robert, prit réellement l'initiative de contacter l'autre partie afin de lui proposer une collaboration autour de l'*Altair 8800* ? Il est assez difficile de répondre à cette question, les récits des uns et des autres tendant tout naturellement à faire ressortir le caractère déterminant du rôle qu'ils jouèrent dans cette affaire. En revanche, un certain nombre de faits sont parfaitement avérés. Premièrement, le président de la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems Inc.* avait déjà travaillé avec *Popular Electronics*. En 1971 il avait ainsi rédigé un article technique décrivant la calculatrice électronique de bureau modèle 816 que sa société vendait par correspondance (sous forme de kit évidemment). Ce document avait fait l'objet d'une parution dans le numéro de novembre 1971 de *Popular Electronics*. A cette occasion d'ailleurs le M.I.T.S. 816 *Desktop Calculator* avait eu les honneurs de la couverture du magazine américain. Deuxièmement, on sait fort bien la rivalité féroce qui existait entre *Radio-Electronics* et *Popular Electronics*. Lorsqu'au mois de juillet 1974, *Radio-Electronics* édita l'article de Jon Titus tout à proposant à son lectorat d'acquiescer pour une somme dérisoire

le manuel technique qui leur permettrait de fabriquer eux-mêmes le MARK-8 son concurrent *Popular Electronics* – lequel, rappelons-le, avait refusé l'article de Titus quelques temps auparavant - n'eut d'autre choix que de répliquer en trouvant « quelque chose » de mieux à offrir à ses lecteurs. C'est donc cette logique concurrentielle, cette dialectique commerciale, qui poussa Arthur P. Salsberg à s'enquérir activement de l'existence du projet d'ordinateur personnel qui permettrait à *Popular Electronics* de supplanter l'offre de *Radio-Electronics*.

A dire vrai et avant que toute cette affaire ne débute, l'intérêt qu'Arthur P. Salsberg manifestait pour les ordinateurs l'avait déjà conduit à découvrir un projet approchant de cela. Il s'agissait en l'occurrence d'un dispositif élémentaire baptisé *Microcomputer Trainer*. Jerry Odgen, son concepteur, était un collaborateur régulier de *Popular Electronics*. Lorsqu'A. P. Salsberg et lui avaient discuté du *Microcomputer Trainer* et examiné la possibilité d'une publication le concernant dans la revue d'électronique au début de l'année 1974, l'inventeur avait déjà terminé l'essentiel des travaux préliminaires sur sa petite machine. Cependant le *Microcomputer Trainer* manquait encore de finition pour donner pleine satisfaction et Odgen ne disposait en outre d'aucun document digne d'être immédiatement publié. Après réflexion, il fut donc décidé que le *Microcomputer Trainer* apparaîtrait dans la parution du mois de décembre 1974 de *Popular Electronics*. Le numéro de juillet 1974 de *Radio-Electronics*, avec l'article et les photographies présentant le MARK-8, eut évidemment tôt fait de remettre en cause ce calendrier peut-être trop prudent. A côté de l'ordinateur personnel de Jon Titus, le *Microcomputer Trainer* aurait fait figure de parent pauvre. Dans tous les cas, il ressortait clairement que ce n'était pas la machine de Jerry Odgen qui permettrait à *Popular Electronics* de refaire non seulement son retard sur son rival, mais aussi de le dépasser. Selon toutes vraisemblances c'est par le biais de Leslie Solomon qu'Arthur P. Salsberg apprit l'existence de l'*Altair 8800*, au cours du second semestre de l'année 1974. Ce sont Forrest M. Mims III et Don Lancaster, deux collaborateurs de *Popular Electronics*⁴⁴², qui présentèrent Edward H. Robert à Leslie Solomon. Ce dernier avait été mis au courant des travaux en cours chez M.I.T.S. à cette occasion. Quant Solomon parla à Salsberg de l'*Altair 8800*, le directeur éditorial de la revue reconnut aussitôt dans le petit ordinateur architecturé autour du nouveau microprocesseur d'*Intel* la machine dont il était en quête. Il demanda donc à son confrère de prendre immédiatement contact avec le président de la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems Inc.* pour lui proposer un partenariat avantageux avec le magazine et savoir également s'il serait en mesure de lui livrer un prototype opérationnel et un descriptif

⁴⁴² Nous rappelons que Forrest M. Mims III avait aussi été l'un des cofondateurs de M.I.T.S.

technique du système pour la période de l'hiver 1974/75. Bien que l'*Altair 8800* n'ait pas encore été entièrement fonctionnel à l'époque, E. H. Roberts accepta volontiers l'offre des représentants de *Popular Electronics*. Les dettes contractées par sa société ne lui laissaient de toute façon pas d'autre choix.



Photo 17 : l'*Altair 8800 Computer*, commercialisé par la société M.I.T.S. au début de l'année 1975. Image Courtesy of the Smithsonian Institution/ National Museum of American History (<http://americanhistory.si.edu/collections/object.cfm?key=35&objkey=29>)

Entre temps, Robert et son équipe poursuivirent leur travail de développement sur le prototype de l'*Altair 8800*. Comme nous l'avons déjà dit, l'unité centrale de traitement de ce micro-ordinateur était un microprocesseur 8 bits *Intel 8080*. L'*Altair 8800* devait être équipé en série d'une mémoire interne à accès aléatoire de 256 octets de capacité, d'une alimentation électrique et d'un boîtier/châssis présentant en façade 36 diodes d'état et 25 commutateurs de contrôle. Il ne possédait ni clavier, ni sortie vidéo. Robert eut également l'idée de doter sa machine de plusieurs emplacements vides (16 slots au total), capables le cas échéant de recevoir différentes sortes de circuits imprimés. Ainsi l'*Altair 8800* fut-il d'emblée pensé comme un ordinateur évolutif. Lorsque cette première machine fut enfin prête, Roberts l'expédia à la rédaction de *Popular Electronics*. Malheureusement – ou heureusement selon la façon dont on aborde cette histoire – la machine se perdit ou bien fut dérobée quelque part entre Albuquerque et New York alors même que Robert était en train de rejoindre la mégapole américaine par avion, pour y effectuer une présentation technique devant plusieurs membres de la rédaction du magazine. La perte du prototype de l'*Altair 8800* n'empêcha cependant pas Robert de mener à bien sa conférence. Ayant par chance affaire à un parterre de spécialistes en électronique, il s'appuya pour sa démonstration sur les plans de la machine

qu'il avait eu la précaution d'emporter. Sa présentation, pourtant privée accidentellement de son principal support matériel, emporta définitivement l'approbation de l'auditoire.

L'échéance prévue pour la publication de l'article consacré à l'*Altair 8800* se rapprochant, la rédaction de *Popular Electronics* avait impérativement besoin de photographies de la machine pour réaliser sa couverture et illustrer les pages qu'elle entendait dédier à ses caractéristiques techniques. Dans l'urgence William Yates bricola donc une carcasse vide, la photographia puis expédia les clichés à New York. Le micro-ordinateur qui figure sur la couverture du célèbre numéro du mois de janvier 1975 de *Popular Electronics* n'est donc qu'une coque inerte, une maquette d'*Altair 8800*. Quant aux photographies illustrant l'article technique proprement dit, c'était celles du prototype. Elles avaient été prises par Robert avant qu'il ne l'envoie à New York. Ce numéro historique de *Popular Electronics* fit son apparition dans les kiosques de presse américains un peu avant Noël 1974. Dans l'éditorial enthousiaste intitulé qu'il signa alors en l'intitulant « The Home Computer is Here », Arthur P. Salsberg déclara: « *Nous étions déterminé à ne pas présenter un démonstrateur d'ordinateur digital avec des diodes clignotantes qui soit amusant à construire et à regarder, mais qui souffrirait d'une utilité limitée... Ce que nous voulions pour nos lecteurs était un mini-ordinateur [sic] à la pointe de la technologie dont les performances seraient comparables à celles des unités actuellement disponibles [dans le commerce] pour une simple fraction de leur prix*⁴⁴³ ».

L'ère de l'ordinateur domestique étant soi-disant arrivée, il était difficile de s'en faire le héraut (de surcroît en faisant montre d'une pareille assurance) sans avoir quelque chose de concret à offrir pour appuyer matériellement cette déclaration pour le moins audacieuse. Aussi l'article présentant l'*Altair 8800* était-il accompagné d'une annonce commerciale de la société M.I.T.S. Celle-ci proposait aux lecteurs de *Popular Electronics* de se procurer le kit et le manuel nécessaires à son montage pour la somme de 397 dollars. Le petit ordinateur pouvait également être commandé déjà assemblé et testé. Dans ces conditions ce sont près de 500 dollars que son futur propriétaire devait s'approprier à débours. Dans l'intervalle qui sépara la perte du premier *Altair 8800* et la parution du numéro de janvier 1975 de *Popular Electronics*, Edward H. Robert était bien entendu rentré à Albuquerque où il s'était aussitôt attelé au design d'un nouveau prototype. Si sur la précédente machine l'ingénieur en électronique avait

⁴⁴³ Arthur P. Salsberg, « The Home Computer is Here », in *Popular Electronics*, Editorial, p. 4, janvier 1975. Nous voyons dans la référence à un « démonstrateur d'ordinateur digital... amusant... mais... d'une utilité limitée » une allusion à peine voilée au MARK-8 proposé par le journal concurrent. En justifiant ainsi le retard qu'il avait prit – ou plutôt semblait avoir prit – sur *Radio-Electronics*, par le désir qu'il avait d'offrir à ses acheteurs un ordinateur exceptionnel et non un simple « gadget digital », *Popular Electronics* valorisait son lectorat tout en minorant fortement la portée du coup éditorial réalisé en juillet 1974 par *Radio-Electronics*.

retenu la solution des câbles plats multiconducteurs pour interconnecter les différents circuits imprimés la composant, cette fois, il décida d'utiliser une carte spéciale – une carte « bus » ou « fond de panier » - équipée de connecteurs à 100 pins pour remplir la même fonction. Baptisé *The Altair Bus*, ce dispositif permettait de connecter les unes aux autres les quatre cartes électroniques de l'*Altair 8800* bien sûr, mais grâce à la présence des emplacements libres qui figuraient justement sur certains de ces circuits imprimés, il autorisait aussi la connexion de cartes électroniques additionnelles (lesquelles pouvaient par exemple supporter de la mémoire ou une interface de contrôle permettant au système de piloter un lecteur de cassettes magnétique). Ceci avait pour effet de permettre l'extension des capacités et des performances de la machine si le besoin s'en faisait sentir. Notons à propos de ce bus qu'Edward H. Robert choisit de faire sien la politique d'ouverture technologique et commerciale que la *Digital Equipment Corporation* avait inaugurée au début des années 60 pour les composants des mini-ordinateurs de sa gamme *Programmed Data Processors*. Les spécifications techniques de ce circuit n'étant ni secrètes, ni protégées, n'importe quelle entreprise pouvait prétendre à l'utiliser et/ou à le reproduire, de manière à se trouver ensuite en position de concevoir toutes sortes de cartes périphériques à destination de l'*Altair 8800* (ou d'une machine compatible - autant dire un clone - elle aussi équipée du fameux bus). Conséquences directes de cette décision : 1°) le « Bus *Altair* » en vint bientôt à être universellement connu sous le nom de bus S-100, au fur et à mesure que les nouveaux constructeurs d'équipements informatiques l'adoptaient en lui conférant de fait le statut de premier standard de l'industrie de la micro-informatique ; 2°) la disponibilité de cartes périphériques additionnelles diverses disponibles non seulement auprès de M.I.T.S., mais aussi auprès d'autres compagnies de matériel électronique, contribuèrent énormément à garantir le succès de l'*Altair 8800*.

Cette ouverture que Robert avait voulue pour l'*Altair 8800* – une machine dont l'ergonomie et la fiabilité laissaient pourtant à désirer – fit qu'à bien des égards celui-ci représenta pour de nombreux passionnés d'électronique et d'informatique à la fois une plateforme de départ économique et un tremplin entrepreneurial relativement sûr. Ces différents facteurs, et d'autres que nous aborderons sous peu, font que beaucoup d'experts de l'histoire de l'informatique s'accordent à considérer la petite machine d'Albuquerque non pas comme le premier micro-ordinateur – ce qu'elle n'était pas, effectivement – mais comme le système dont les caractéristiques techniques et la diffusion massive permirent l'établissement et le développement initial d'une véritable industrie de la micro-informatique.

Personne ne sait combien d'Altair 8800 la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems Inc.* vendit exactement. Ce qui est sûr en revanche, c'est que dans les premiers jours qui suivirent la parution du numéro de *Popular Electronics* qui le présentait, ce sont plusieurs centaines de commandes qui parvinrent au siège de la petite entreprise, au Nouveau Mexique. Au bout de deux ou trois mois, ce nombre inespéré avait déjà atteint quatre milliers. Il grossit encore au fur et à mesure que la petite machine gagnait en notoriété, d'une part grâce aux campagnes publicitaires réalisées par M.I.T.S. dans les magazines à fort tirage spécialisés dans l'électronique et l'informatique personnelle (*Popular Electronics*, *Creative Computing*, *Byte Magazine*), et d'autre part à cause des puissants relais que représentèrent ici les réseaux et les clubs d'*Electronic* et de *Computer Hobbyists*. Le succès rencontré par l'Altair 8800 fut à ce point inattendu et considérable que bien vite l'entreprise de Robert se trouva littéralement submergée et incapable de répondre à la demande dans des délais acceptables. Qui plus est, aucun manuel utilisateur décrivant l'Altair 8800 et la manière de l'utiliser n'avait encore été rédigé ! Pour faire face à ces nouvelles difficultés, M.I.T.S. déménagea et embaucha du personnel. Robert reprit contact avec Forrest M. Mims III, pour lui proposer de prendre en charge la rédaction du manuel manquant. Le cofondateur démissionnaire de M.I.T.S. accepta l'offre et s'acquitta prestement de la tâche qui lui avait été confiée par son ancien collègue. Grâce à son travail sur l'*Altair 8800 Operator's Manual*⁴⁴⁴, F. M. Mims III devint ainsi l'auteur du premier mode d'emploi pour micro-ordinateur de l'histoire de l'informatique. Le directeur de M.I.T.S. organisa également une campagne de promotion sérieuse afin de continuer à vanter les mérites sa machine (et cela en dépit des difficultés rencontrées pour répondre à la demande). L'entreprise affréta une sorte de mobile home spécialement équipé pour recevoir et faire fonctionner plusieurs Altair 8800 – ce véhicule fut fort à propos baptisé *MitsMobile* - et démontrer en direct les performances de cet ordinateur et de ses périphériques au public des grandes villes dans lesquelles il faisait halte. C'est au cours de l'un de ces arrêts promotionnels, à Los Angeles, que Dick Heiser et son épouse Lois virent pour la première fois un Altair 8800 en situation d'opération. Enthousiasmés, ils réitérèrent cette expérience et, après avoir multiplié les contacts auprès de M.I.T.S., ils parvinrent finalement à convaincre la direction de l'entreprise de leur conférer le statut de distributeurs pour cette machine (alors que toutes les ventes réalisées par la société depuis sa création l'avaient été correspondance). Dans le courant du mois de juillet 1975, les époux Heiser ouvrirent donc à Los Angeles un

⁴⁴⁴ Forrest M. Mims III, *Altair 8800 Operator's Manual*, *Micro Instrumentation and Telemetry Systems Inc.*, 1975. Ce document qui compte une centaine de pages peut être librement téléchargé à l'adresse suivante: <http://vt100.net/mirror/harte/Altair/Altair%208800%20Operator's%20manual.pdf>.

commerce auquel ils donnèrent le nom d'*Arrowhead Computers: The Computer Store*. Spécialisé dans la vente d'ouvrages informatiques et seul revendeur officiellement accrédité par M.I.T.S. pour distribuer directement l'*Altair 8800* dans le pays, l'*Arrowhead Computers* devint très vite la coqueluche des journaux, des revues spécialisées et des informaticiens amateurs aux Etats-Unis. Et pour cause ! Il s'agissait du premier magasin de micro-informatique dans le monde. Un magasin où, contre un peu moins d'un demi-millier de dollars, tout un chacun pouvait espérer pouvoir acheter un ordinateur⁴⁴⁵. Pour la première fois dans toute l'histoire de l'informatique, un particulier se voyait donc offrir la possibilité de se rendre chez un détaillant pour y acheter directement un ordinateur, tout comme il aurait pu le faire pour un téléviseur ou bien un poste radiophonique. Quatre ou cinq années avant cela, l'ordinateur était encore un dispositif relativement mystérieux, que seules des organisations – et non des personnes civiles – pouvaient se permettre d'acquérir. A la fin de l'année 1975 il se trouvait en passe de devenir un produit technologique commun, même s'il n'existait pas encore d'applications informatiques susceptibles de gagner les faveurs du grand public.

Au moment même où les premiers clubs d'informaticiens amateurs commençaient à voir le jour aux Etats-Unis, Robert et les responsables du marketing de M.I.T.S. créèrent un *Altair Users Group*. Dans la foulée ils décidèrent d'éditer un petit mensuel⁴⁴⁶ à l'intention des membres de cette communauté et d'organiser aussi des conventions⁴⁴⁷. Cette initiative n'était pas isolée et à travers le pays quelques clubs d'amateurs d'informatique commencèrent à voir le jour. Le plus légendaire d'entre eux, le *Homebrew Computer Club* (que l'on connaît peut-être un peu moins sous le nom d'*Amateur Computer User's Group*), tint sa première réunion dans un garage de Menlo Park (Santa Clara), le 5 mars 1975. Les centres d'intérêt partagés par les membres de ce club qui n'était affilié ni à M.I.T.S. ni à aucun constructeur d'ordinateurs ne concernaient pas exclusivement l'*Altair 8800*. A vrai dire, tout ce qui touchait de près ou de loin à l'informatique personnelle les intéressait. Cette année là cependant, ce sont le microprocesseur *Intel i8080* et le M.I.T.S. *Altair 8800* qui étaient au centre de toutes les conversations. Remarquons qu'à l'occasion de ce premier meeting, une démonstration de l'*Altair 8800* fut réalisée. Parmi les 32 personnes qui assistèrent à cette présentation figurait notamment Steve Wozniak, le futur cofondateur d'*Apple Computer*, avec Steve Jobs.

⁴⁴⁵ La concrétisation de cet acte à l'époque tout juste concevable dépendait bien sûr étroitement de la capacité de M.I.T.S. à approvisionner régulièrement les stocks du *Computer Store*.

⁴⁴⁶ Il s'agissait de *Computer Notes*.

⁴⁴⁷ C'est David Bunnell, le vice-président du marketing de M.I.T.S., qui eut l'idée d'organiser des conventions *Altair*. L'annonce du premier de ces événements (prévu pour avoir lieu à la fin du mois de mars 1976), fut publiée dans le numéro du mois de décembre 1975 de *Computer Notes*, la publication de l'*Altair Users Group*.

A compter du premier trimestre 1975, c'est donc tout un ensemble d'activités qui commença à voir le jour et à s'organiser autour de l'*Altair* 8800. De nombreuses petites firmes – telles *Processor Technology Inc.* par exemple - furent créées, avec pour objectif déclaré de mettre au point et de vendre des cartes et des périphériques complémentaires pour la machine de M.I.T.S. Bien souvent, ce sont des amateurs d'informatique et d'électronique appartenant à des clubs où l'*Altair* 8800 faisait évidemment figure de référence incontournable et de bête de somme qui montèrent ces entreprises. Progressivement ces spécialistes de l'*Altair* 8800 imaginèrent des circuits électroniques permettant d'augmenter les capacités du petit ordinateur ou bien d'améliorer sa très rudimentaire interface utilisateur (s'il nous est permis de la désigner de la sorte). On vit ainsi apparaître des cartes d'extension mémoire, des circuits permettant d'interfacer un magnétophone à cassettes, un télétype ou une imprimante (ces deux derniers dispositifs demeurant cependant onéreux même d'occasion), et, surtout, des cartes qui permettaient le raccordement d'un clavier et d'un téléviseur à l'*Altair* 8800. Rompus aux arcanes de cette machine, de son microprocesseur *i8080* et de son bus S-100, les dirigeants de certaines des sociétés qui produisaient ces extensions matérielles finirent d'ailleurs par les engager dans le développement d'ordinateurs personnels. Plusieurs facteurs sur lesquels nous désirons revenir à ce point permettent de comprendre l'extraordinaire succès rencontré par l'*Altair* 8800 dès le moment de son introduction sur le marché. Pour commencer, cette machine étonnamment peu coûteuse et a priori très performante – elle était construite autour du puissant microprocesseur *i8080* – rencontra un public avide et connaisseur qui rêvait littéralement d'assembler et/ou de posséder un ordinateur, même s'il subsistait à l'époque un certain flou quant à ce que ces gens se trouveraient effectivement en mesure d'accomplir grâce à une telle machine une fois celle-ci devenue opérationnelle. En quelques mois, semblable en cela à une traînée de poudre, la demande s'enflamma et explosa. Tandis que la publicité et le bouche à oreille contribuaient à alimenter ce phénomène, de petits groupements rassemblant des amateurs d'électronique et d'informatique se constituèrent – spécialement en Californie - autorisant ainsi des *hobbyists* de plus en plus nombreux et intéressés à partager les uns avec les autres leur savoir, leurs idées et leur expérience. Ces clubs où se côtoyaient des amateurs d'ordinateurs bien sûr, mais aussi parfois des activistes politiques, des professionnels et des étudiants en informatique – ce fut tout particulièrement le cas du *Homebrew Computer Club* dont le siège se situait non loin de l'Université de Berkeley - jouèrent pour la micro-informatique le rôle de bouillonnants

creusets intellectuels et technologiques. De ces *think tanks* non institutionnels, de ces paradis pour hackers ainsi que les surnomma Lee Felsenstein⁴⁴⁸, devaient émerger certains des individus les plus influents et les plus respectés de cette nouvelle industrie. Le nom de Steve Wozniak – que Steve Jobs rejoignit par la suite au *Homebrew Computer Club* – figure bien sûr au nombre de ceux qui sont le plus fréquemment mentionnés par les historiens de l’informatique. A l’instar du cofondateur d’*Apple Computer*, d’autres informaticiens amateurs profitèrent du succès de l’*Altair 8800* et de l’excellente connaissance qu’ils avaient de cette machine pour s’aventurer dans le domaine des affaires. L’architecture ouverte de l’*Altair 8800* et la présence de son fameux bus autorisèrent ces premiers entrepreneurs de la micro-informatique à développer pour ce système un grand nombre de circuits imprimés additionnels. La diversité fonctionnelle de ces derniers et leur caractère bien souvent abordable contribuèrent alors à renforcer davantage la popularité du micro-ordinateur de M.I.T.S. De fait, l’*Altair 8800* avait beau être peu cher – y compris lorsqu’il était déjà assemblé - la double nécessité dans laquelle se trouvaient ses premiers possesseurs de le programmer pas à pas via des boutons et de suivre l’état de ses registres grâce à des diodes lumineuses représentait encore un frein à sa diffusion sur une plus grande échelle. Quant on put réaliser ces opérations et suivre leur progression en utilisant un clavier et un écran de télévision, les choses changèrent évidemment. A côté de tout cela il est encore une chose que l’on se doit obligatoirement de porter au nombre des éléments qui jouèrent grandement en faveur du succès de l’*Altair 8800*. Comme ses quelques prédécesseurs ce micro-ordinateur pouvait être programmé en assembleur. Certes ce langage était économique et rapide en exécution, ce qui était tout à fait indiqué pour une machine disposant d’une puissance de traitement et d’une mémoire limitées. D’un point de vue pratique toutefois, son apprentissage demeurait extrêmement difficile. Il s’agissait d’un élément susceptible de rebuter certains acheteurs potentiels. Aussi, pour éviter cela, Edward H. Robert décida de doter l’*Altair 8800* d’un langage de programmation de haut niveau au moment où il le conçut. En définitive et contre toute attente, il se détermina pour le langage BASIC.

⁴⁴⁸ Ingénieur informaticien formé à Berkeley, membre du *Homebrew Computer Club*, Lee Felsenstein est essentiellement connu pour avoir conçu l’*Osborne 1*, qui fut le premier micro-ordinateur portable commercial de l’histoire. L’*Osborne Computer Corporation* introduisit cette machine architecturée autour du microprocesseur Z-80 de *Zilog* au mois d’avril 1981. Pesant près de 12 kg, il coûtait 1800 dollars. Notons qu’en 1975-76, il coréalisa avec Gordon French et Robert Marsh (deux autres membres du H.C.C.) l’ordinateur SOL-20, pour le compte de la société *Processor Technology*, firme qui produisait des cartes d’extension électroniques pour l’*Altair 8800*. Le

3.5.3. Le logiciel comme force motrice de la micro-informatique : le BASIC de Microsoft et le *Control Program/Monitor / Control Program for Microcomputers de la Digital Research Inc.*

3.5.3.1. Le BASIC *Altair*, les premières années de Microsoft et la question du piratage.

Rétrospectivement, le choix du BASIC comme langage de haut niveau résidant (stocké en R.O.M.), pour un micro-ordinateur peut sembler aller de soi. Après tout la très grande majorité des machines 8 bits introduites sur le marché à partir des années 1977-78 (*Tandy TRS-80 Model 1, Commodore Personal Electronic Transactor, Apple II*), et après (*Texas Instruments TI/99/4A, ZX81, I.B.M. P.C., Sinclair Spectrum et QL, Oric 1 et Atmos, Amstrad, Thomson TO7 et MO5, Commodore Amiga, Atari ST, etc.*), possédaient un basic intégré en mémoire morte⁴⁴⁹. La plupart de ceux qui découvrirent les ordinateurs en utilisant ce genre de machines firent donc leurs premières armes en programmant en BASIC. En 1975 le fait de choisir de doter un ordinateur – qui plus est un micro-ordinateur – d’un BASIC comme langage intégré ne constituait en rien une chose évidente. Pour les différents motifs que nous allons voir maintenant, le BASIC semblait en effet être un langage bien peu indiqué dans la perspective d’un portage vers un système informatique tel qu’un micro-ordinateur. Le terme BASIC signifie *Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code*. Le langage BASIC a été développé en 1964 par John G. Kemeny et Thomas E. Kurtz, deux enseignants du *Dartmouth College* (respectivement en mathématiques et en sciences informatiques). C’est dans le cadre du *Dartmouth Time-Sharing System (D.T.S.S.)* que le langage BASIC a été conçu. Les *mainframes* devant supporter le D.T.S.S. étaient des ordinateurs construits par la société *General Electric*. Comme il était couramment d’usage à l’époque, ces machines (des GE-256) furent livrées à leur destinataire sans logiciels aucun, c’est-à-dire sans utilitaires système et sans applications. La charge de programmer ces derniers revenait par conséquent à leurs utilisateurs. Puisque le spectre des personnes susceptibles de se servir du D.T.S.S. devait être large, au point d’inclure des gens qui n’avaient absolument aucune expérience en matière

⁴⁴⁹ Une exception notable à cela était le *Jupiter ACE*. Nommé ainsi pour rendre hommage à l’ordinateur imaginé par Alan M. Turing à la fin des années 40, ce micro-ordinateur 8 bits à microprocesseur *Zilog Z-80* était commercialisé par la *Jupiter Cantab*, une société fondée par Steven Vickers et Richard Altwasser, deux anciens membres de l’équipe qui avait développé le *ZX81* de *Sinclair*. En lieu et place de disposer nativement d’un BASIC, comme la quasi-totalité des micro-ordinateurs de l’époque, le *Jupiter ACE* devait être programmé en FORTH, un langage procédural extrêmement rapide, mais peu répandu et d’un emploi beaucoup plus ardu que le BASIC.

d'informatique, Kemeny et Kurtz décidèrent ici de concevoir un *Operating System* très simple. Si simple qu'il devait pouvoir être programmé par de simples étudiants en informatique. Sous la supervision des deux scientifiques, c'est donc un groupe d'une douzaine d'étudiants à peine qui développa l'O.S. du D.T.S.S., en même temps qu'un langage de programmation générique de haut niveau, le BASIC. Répondant en cela aux exigences de simplicité qu'avaient voulues Kemeny et Kurtz pour le système en temps partagé du *Dartmouth College*, les caractéristiques techniques du BASIC (vocabulaire, syntaxe, structuration des programmes), devaient permettre à des personnes étudiant aussi bien les mathématiques que la littérature ou bien l'histoire de l'art de développer leurs propres applications sans jamais se heurter à de grosses difficultés. En cela le BASIC se distinguait de langages comme le FORTRAN ou le COBOL. Si ceux-là étaient puissants, apprendre le FORTRAN ou le COBOL, puis concevoir des programmes grâce à eux, n'étaient pas des tâches à la portée des premiers venus. Des informaticiens et des individus versés dans le domaine des mathématiques auraient certes parfaitement pu s'en acquitter. Mais certainement pas des débutants en informatique. Or c'était à eux que le D.T.S.S. s'adressait en priorité, le BASIC devant jouer ici le rôle d'un langage de programmation éducatif.

La mise au point du BASIC, langage de haut niveau imaginé en premier lieu pour des novices en informatique, exigea que son équipe de concepteurs opère un certain nombre de choix techniques – autant de sacrifices diraient sans doute quelques-uns - au moment de sa programmation. Des facteurs tels que la facilité d'apprentissage ou bien la proximité des instructions et de la structure des programmes avec le langage naturel de ses futurs usagers (l'anglais bien sûr), se virent ainsi privilégiés au détriment de la puissance de traitement du langage, de sa richesse conceptuelle (limitation du nombre de type de données disponible par exemple), et de son élégance logico-mathématique. Cela valu au BASIC de nombreuses critiques de la part des spécialistes – les puristes tendant en effet à penser qu'il n'était rien de plus qu'une sorte de langage « jouet » à la fois générateur de mauvaises habitudes et très peu à même de représenter l'art de la programmation tel qu'il devait être pratiqué selon eux -, et une extrême popularité auprès de tous ceux qui, peu familiers des ordinateurs, furent conduits à le devenir pour une raison ou pour une autre. Si le BASIC eut une quelconque importance dans l'histoire de l'informatique, alors celle-ci fut sociale avant d'être technique.

Le BASIC ayant été créé dans l'objectif de rendre la programmation accessible à tous ou presque, le fait de le choisir pour en faire le langage résidant d'un micro-ordinateur destiné au public peut sembler après coup une chose tombant sous le sens. Or ici l'évidence est trompeuse puisque c'était fort loin d'être le cas. Bien que possédant une vocation éducative,

le langage BASIC fut développé pour des *mainframes* servant d'infrastructure physique à un système informatique opérant en temps partagé. Même dans ses versions initiales où les restrictions imposées par le matériel ne jouaient que modérément⁴⁵⁰, le jeu d'instructions et de paramètres du BASIC comportait des limitations importantes. Du point de vue des spécialistes de la programmation les variantes du BASIC qui, au prix de nombreuses modifications, furent portées par la suite sur d'autres supports informatiques (par exemple des mini-ordinateurs), n'étaient guère plus recommandables que la version initialement produite pour les grands systèmes de *General Electric*. Pour résumer les choses le BASIC avait beau être un langage facile d'accès, il était de notoriété publique, chez les professionnels du codage informatique, que cette facilité avait été acquise au détriment de choses telles que la performance procédurale et l'élégance mathématique. Des programmeurs dignes de ce nom n'auraient jamais préféré le BASIC pour réaliser une quelconque application. Celui-ci n'était pas considéré comme un véritable langage de programmation alors que c'était le cas du FORTRAN, du COBOL, du PL/I et de l'A.P.L. (*A Programming Language*). Lorsqu'Edward H. Robert dessina l'*Altair 8800*, la situation financière de son entreprise était catastrophique. Au début des années 70 le marché des calculatrices électroniques avait été bouleversé par l'entrée en lice de fabricants tels que *Texas Instruments* et à l'instar de la plupart des petites firmes qui réalisaient ce type de produits, la *Micro Instrumentation Telemetry Systems Inc* s'était rapidement trouvée au bord de la faillite. Dans de pareilles circonstances, il est patent que l'*Altair 8800* représentait pour la M.I.T.S. son ultime chance d'échapper à la banqueroute. Ce dernier élément pesa de façon non négligeable dans le choix que fit Robert du BASIC comme langage de programmation résidant pour son micro-ordinateur. Du point de vue de l'homme de l'art, le FORTRAN constituait assurément une des options les plus judicieuses qui se puisse envisager ici. Du point de vue du chef d'entreprise désireux de ne pas voir sa société sombrer définitivement, cela ne l'était pas en revanche. Si le BASIC n'était certainement pas la panacée en matière de langage informatique, l'existence d'une version de ce langage éducatif pour l'*Altair 8800* représentait pour Robert une chance de plus de voir son micro-ordinateur et ses cartes additionnelles⁴⁵¹ se vendre convenablement. De fait s'il était une catégorie d'acheteurs quasiment garantie que la présence d'un BASIC pour l'*Altair 8800* pouvait ne pas intéresser – à savoir celle des hackers – cette dernière aurait toujours la ressource de pouvoir programmer la machine de M.I.T.S. en assembleur. Ce langage

⁴⁵⁰ Un *mainframe* étant par définition un ordinateur d'une grande puissance.

⁴⁵¹ Pour faire fonctionner le BASIC sur un *Altair 8800*, il était nécessaire de lui adjoindre une carte d'extension mémoire. Autrement la capacité de base de la R.A.M. du micro-ordinateur était insuffisante.

complexe aux mnémoniques ésotériques correspondait d'ailleurs parfaitement à l'état d'esprit qui animait les membres les plus « radicaux » de cette communauté informatique. Quant aux autres, c'est-à-dire tous ceux qui se passionnaient pour l'électronique et l'informatique sans avoir nécessairement les compétences techniques requises pour programmer un ordinateur, il est évident que la perspective de pouvoir disposer d'un BASIC avec l'*Altair 8800* représentait un puissant argument en faveur de l'acquisition du micro-ordinateur. De surcroît, des versions du langage du *Dartmouth College* avaient été écrites pour des systèmes ne disposant que d'une capacité mémoire limitée. En droit comme en fait rien ne s'opposait donc à ce qu'un BASIC puisse être développé pour l'*Altair 8800*. Ce fut chose faite et bientôt, l'accueil très favorable réservé par un public de plus en plus large aux micro-ordinateurs équipés de ce langage incitèrent les constructeurs de ces machines – eux aussi de plus en plus nombreux – à l'intégrer systématiquement dans les R.O.M.S. de leurs productions. Le micro-ordinateur 8 bits *Jupiter ACE* commercialisé en 1981 par la société britannique *Jupiter Cantab* est à notre connaissance une des seules exceptions puisque son langage de haut niveau était non pas un BASIC, mais un FORTH (cf. note 398, ci-dessus).

L'histoire du BASIC de l'*Altair 8800* est intéressante à plus d'un titre. D'abord parce sur le plan purement technique, ce langage ne constituait a priori pas la solution de programmation de haut niveau la mieux adaptée pour équiper un ordinateur offrant un niveau de performances générales modeste. Ensuite parce qu'Edward H. Robert décida de confier la réalisation de cette version du langage BASIC à deux jeunes gens qui, à la fin des années 60, avaient fait ensemble leurs premières armes en informatique sur un système D.E.C. P.D.P.-10 opérant en time-sharing. Les heures systèmes sur ce P.D.P.-10 avaient été achetées au *Seattle Computer Centre Corporation* par la *Lakeside Preparation School*, la prestigieuse école privée de Seattle qu'ils fréquentaient l'un et l'autre. En plus d'être animés par une même passion dévorante pour la programmation ces deux jeunes personnes – leurs noms étaient Paul Gardner Allen et William Henry Gates III. – possédaient assurément un sens inné pour les affaires. Alors que Bill Gates et Paul Allen n'étaient âgés que de 16 et 18 ans, respectivement, ils avaient ainsi créé une société - *Traf-O-Data* – spécialisée dans la conception de petits systèmes informatiques et de programmes dédiés à l'analyse des flux routiers. Malheureusement le marché visé (essentiellement celui des municipalités), se montra peu réceptif à l'offre de *Traf-O-Data* et l'expérience tourna bientôt à l'échec. En 1973, Bill Gates intégra l'Université d'Harvard pour y poursuivre des études de droit tandis que Paul Allen, après deux années passées à la *Washington State University*, parvint à se faire embaucher en

qualité de programmeur par la compagnie *Honeywell*. Le poste qu'il obtint se trouvait dans la succursale de *Honeywell* à Boston. Autant dire à un jet de pierre de l'Université d'Harvard.

D'après les récits qu'on fait les deux hommes de cette période, c'est Paul Allen qui, le premier, prit connaissance de l'article que le magazine *Popular Electronics* consacra à l'*Altair 8800*, au mois de janvier 1975. Aussitôt Allen contacta Bill Gates pour lui faire part de sa « découverte ». Enthousiastes comme ils avaient rarement eu l'occasion de l'être auparavant et reconnaissant avant tout le monde l'opportunité commerciale qu'il pourrait y avoir à développer et à vendre – sous certaines conditions, nous y reviendrons - des logiciels pour ce type de machines, Allen et Gates décidèrent immédiatement de commencer à programmer un BASIC pour l'*Altair 8800*. Lorsque Bill Gates contacta la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems Inc.* pour proposer à Edward H. Robert de lui faire une démonstration de l'interpréteur BASIC que Paul Allen et lui avaient prétendument mis au point – un BASIC qui, affirma-t-il alors, pourrait aisément être porté sur l'*Altair 8800* - aucune ligne de code pour ce programme n'avait encore été écrite. Allen et Gates n'avaient en outre jamais été en présence directe d'un *Altair 8800* et ils ne disposaient d'aucun accès à cette machine. Au reste ils n'avaient pas non plus accès à un système équipé du microprocesseur *Intel i8080*.

Edward H. Robert se montra tout de suite intéressée par la proposition des jeunes gens. En conséquence les deux parties s'accordèrent à fixer immédiatement une rencontre. Il fut décidé que celle-ci aurait lieu dans le courant du mois de février 1975. Au moment où ce rendez-vous fut planifié par les entrepreneurs, il ne restait donc que 6 semaines à Allen et à Gates pour assurer le développement du BASIC de l'*Altair 8800*. Ce répit accordé aux deux développeurs par M.I.T.S. peut s'expliquer par le fait que la société d'Albuquerque avait besoin d'un délai correspondant pour être en mesure de produire les cartes d'extension mémoire nécessaires au fonctionnement d'un langage tel que le BASIC sur l'*Altair 8800*. D'un autre côté ce sursis était du pain béni pour les jeunes informaticiens puisque le BASIC qu'ils étaient en train d'essayer de vendre à M.I.T.S. n'existait tout bonnement pas. Mettant à profit le temps qui leur restait avant la présentation de février, les deux hommes se mirent alors à travailler de façon frénétique. Bill Gates, secondé ici par Monte Davidoff, un étudiant en mathématiques à Harvard, se chargea pour l'essentiel du travail d'encodage de l'interpréteur BASIC. De son côté Paul Allen développa un émulateur d'*Altair 8800* pour un des D.E.C. P.D.P. 10 de l'Université d'Harvard. Pour créer cette machine logique qui, une fois exécutée sur un autre ordinateur, était capable de reproduire exactement le comportement du petit système informatique de M.I.T.S et de son microprocesseur *i8080*, Allen se basa sur les spécifications techniques qui en avaient été publiées dans la presse. Après un mois et demi

d'un régime de travail fiévreux et ininterrompu, Paul Allen s'envola enfin en direction du Nouveau-Mexique pour présenter « son » BASIC à Edward H. Robert. Affirmer ici que les co-fondateurs de *Traf-O-Data* oeuvrèrent dans l'urgence relève du pur et simple euphémisme. Pour preuve, de nombreuses et interminables séances de programmation s'étaient déjà succédées quant Allen se rendit compte, à 10000 pieds d'altitude, que ni lui ni Gates n'avaient songé à écrire l'utilitaire qui lui permettrait de charger la bande papier supportant le BASIC dans la mémoire de l'*Altair* 8800, une fois rendu au siège de M.I.T.S. Lorsque l'appareil du programmeur de *Honeywell* se posa à l'aéroport d'Albuquerque, le petit programme était achevé mais à ce moment précis, le BASIC de Bill Gates et Paul Allen n'avait encore jamais été exécuté sur un exemplaire réel de ce micro-ordinateur. Le travail de programmation réalisé dans la plus grande hâte par les deux hommes s'avéra pourtant d'une qualité exemplaire puisque dès le second chargement dans la mémoire d'un *Altair* 8800 équipé de 6 Ko de mémoire vive, leur BASIC fonctionna à la perfection. En conséquence M.I.T.S. accepta officiellement le BASIC d'Allen et de Gates au mois de février 1975. La compagnie d'Edward H. Robert procéda immédiatement à la modification de ses publicités afin d'annoncer la disponibilité prochaine de deux BASIC pour sa machine: un *Altair* 4K BASIC et un *Altair* 8K BASIC. Achetés indépendamment de tout matériel, ces deux logiciels coûtaient 350 et 500 dollars. A supposer que l'on décide de les procurer en même temps que tel ou tel équipement informatique fabriqué par M.I.T.S. (micro-ordinateur, cartes additionnelles, cartes d'entrée/sortie), leur coût chutait alors à 60 et 75 dollars, respectivement. Force est faite ici de reconnaître le caractère remarquable de l'intuition, de l'audace et du savoir-faire technique dont firent preuve ces deux entrepreneurs alors âgés d'une vingtaine d'années à peine, Bill Gates et Paul Allen. Mais, plus sûrement encore que leur intrépidité en matière d'affaires ou la prouesse technique que représenta le développement éclair de leur BASIC *Altair*, c'est la modalité sous laquelle ils réussirent à vendre leur application à la *Micro Instrumentation Telemetry Systems Inc.* qui doit à ce point retenir impérativement notre attention. Parce qu'appelée à devenir un jour la norme dominante dans ce secteur d'activités, la façon de commercialiser le logiciel qu'instaurèrent Gates et Allen revêtit une importance capitale dans le processus de façonnement de la physionomie de l'industrie de la micro-informatique.

A contrario des pratiques qui avaient usuellement cours dans le secteur de l'industrie informatique, Gates et Allen décidèrent non pas de vendre directement les produits logiciels qu'ils avaient conçus à leurs clients (sous la forme d'un package incluant programme, mode d'emploi et suivi pour la mise à jour par exemple), mais, en échange de la perception de

royalties, de céder à ces derniers une licence d'exploitation autorisant l'emploi de ces programmes. En procédant de la sorte, c'est-à-dire en commercialisant le *droit d'utiliser* leur(s) logiciel(s) et non le(s) logiciel(s) eux-mêmes, Gates et Allen étaient donc assurés de rester entièrement maîtres de leur production informatique. Mais pourquoi au juste vouloir faire cela – pourquoi vouloir changer de modèle de distribution/vente et ainsi prendre des risques économiques ? - alors même que le succès rencontré par l'*Altair 8800* était suffisant pour garantir aux deux hommes une réussite entrepreneuriale exemplaire ? Après tout, puisque leur précédente tentative avec *Traf-O-Data* s'était soldée par un échec et que leurs activités professionnelles respectives ne leur apportaient guère de satisfaction, ils auraient tout aussi bien pu choisir d'aller au plus simple et se contenter de gagner de l'argent de la façon la plus conventionnelle qui soit. Or ce ne fut pas le cas. La volonté d'établir ici le principe commercial de la licence d'exploitation pour des programmes informatiques s'explique par le fait que bien avant tout le monde, Gates et Allen avaient compris que le logiciel – et non le matériel – jouerait un rôle absolument prépondérant dans l'avènement et l'explosion de la micro-informatique. Comme l'a expliqué Williams H. Gates III dans un entretien qu'il a accordé en 1993 à David K Allison, le Conservateur et titulaire de la Chaire *Division of Information Technology and Communications* du *National Museum of American History* (*Smithsonian Institution*) :

« Bien, nous savions que *M.I.T.S.* n'était qu'une compagnie parmi d'autres et nous voulions que notre logiciel soit utilisé sur toutes les machines [possibles]. Même notre arrangement initial avec *M.I.T.S.* spécifiait que nous pourrions vendre des licences d'exploitation à d'autres sociétés. Pendant qu'*Intel* faisait la promotion de sa puce [*i.e.* l'*i8080*] auprès des fabricant de terminaux intelligents et des autres constructeurs d'ordinateurs, nous comprimes qu'au lieu de laisser ces compagnies écrire elles-mêmes leur propre *BASIC*, nous pourrions leur vendre notre *BASIC* pour un coût inférieur [à celui que leur aurait coûté le développement d'un *BASIC*]. En fait, nous entendions le faire sur la base d'une redevance. Et ainsi nous commençâmes à démarcher des compagnies telles que la *N.C.R.* et un grand nombre de sociétés [spécialisées dans la fabrication] de terminaux pour les convaincre de produire des systèmes utilisant des microprocesseurs. Je n'ai jamais été un employé de *M.I.T.S.* Paul travailla pour eux [en qualité de directeur de la division logiciels] pendant 18 mois. [...]. Et j'ai commencé à engager d'autres personnes. En fait, avant que Paul ne revienne, nous avons commencé à travailler sur un *BASIC* pour [les microprocesseurs *Motorola* et *M.O.S. Technology*] 6800 et 6502, d'autres puces. Nous

entamâmes la programmation d'un compilateur FORTRAN. Nous étions [aussi] en discussion avec la Texas Instruments pour le développement d'un BASIC.⁴⁵² ».

Le 1^{er} juillet 1975, la disponibilité de la version 2.0 des interpréteurs BASIC 4 Ko et 8 Ko pour l'*Altair* 8800 fut officiellement annoncée par ses concepteurs. Le 22 du même mois, l'accord portant sur l'octroi de licences d'exploitation pour ces programmes fut signé avec la société M.I.T.S. Gates et Allen qui en avril avaient créé une nouvelle société – en l'occurrence *Micro-Soft*⁴⁵³ – reçurent immédiatement 3000 dollars de la part de la *Micro Instrumentation Telemetry Systems Inc.* En plus de ce montant, il était également prévu que leur entreprise perçoive 30 ou 35 dollars – selon la version concernée – à chaque fois que M.I.T.S. vendrait une copie du BASIC *Altair*. Comme le montre fort bien l'extrait d'entretien produit ci-dessus, les liens professionnels existant entre la M.I.T.S et les deux programmeurs de Seattle avaient beau être solides – à tel point qu'Edward H Robert engagea et rémunéra Paul Allen pendant près d'une année et demi – Bill Gates et son associé ne perdirent jamais de vue le fait que l'entreprise d'Albuquerque et son *Altair* 8800 n'étaient qu'une compagnie informatique et un ordinateur parmi d'autres sur un marché qui, présentaient-ils fort justement, était sur le point de connaître une envolée économique exceptionnelle. Ce qu'ils avaient deviné c'était que la réussite de l'*Altair* 8800 susciterait nécessairement de nombreuses vocations personnelles et professionnelles (les unes s'entremêlant quelquefois aux autres), que le BASIC deviendrait à cause de sa facilité un produit informatique incontournable, que le microprocesseur *i8080* d'*Intel* serait plébiscité par les industriels, et que les concurrents du fabricant de puces texan le suivraient nécessairement en s'efforçant de proposer des produits microélectroniques au moins aussi compétitifs que l'*i8080* en termes de performances, de qualité et de coût. C'était donc auprès des compagnies informatiques existantes et nouvellement créées – lesquelles étaient toutes également susceptibles de jouer un rôle clef au sein d'une industrie micro-informatique en passe d'exploser – qu'Allen et Gates ambitionnaient de placer leurs produits. Si les deux jeunes programmeurs avaient fait le choix de vendre leurs programmes à telles ou telles d'entre elles, une fois lesdits programmes cédés, aliénés, ils se seraient trouvés dans l'incapacité légale de les offrir à d'autres clients. En optant au contraire pour la solution qui consistait à vendre le droit d'utiliser leurs logiciels – la

⁴⁵² In David Allison et William H. Gates III, « Bill Gates Interview », *Video History Interview Series, Division of Computers, Information, & Society, National Museum of American History, Smithsonian Institution, 1993*. La transcription de ce document vidéographique peut être consultée dans son intégralité à l'adresse suivante : <http://americanhistory.si.edu/collections/comphist/gates.htm#tc14>.

⁴⁵³ Le terme *Micro-Soft* est en fait une contraction de l'expression *Microcomputer Software* que l'on peut traduire par « logiciels pour micro-ordinateurs ».

plus stratégique qui soit à bien des égards - Gates et Allen se ménagèrent dès le départ la meilleure des marges de manœuvre commerciale possibles. Ainsi, quel que soit le nombre de sociétés qui déciderait effectivement d'employer leurs produits informatiques, ils en seraient toujours les légitimes propriétaires, ce qui signifiait qu'ils pourraient encore continuer à démarcher des entreprises concurrentes pour les leur proposer. Gates et Allen avaient donc compris que la micro-informatique, et tout particulièrement sa composante logicielle, étaient en passe de venir tout bouleverser dans une industrie informatique jeune, puissante et déjà sujette à des processus d'évolution et de transformation fréquents.

Cette compréhension précoce des choses, cette intuition profonde de la révolution à venir, leur conféra bien entendu un avantage considérable sur tous ceux qui allaient bientôt devenir leurs concurrents. Par concurrents, il faut entendre ici non seulement les concurrents « institutionnels », c'est-à-dire les entreprises productrices de logiciels accomplissant peu ou prou des fonctions similaires à celles réalisées par les programmes de *Microsoft*, mais aussi les individus qui alimentaient des « filières » d'approvisionnement parallèle en copiant et en distribuant illégalement les applications conçues et vendues par la petite firme d'Albuquerque⁴⁵⁴. En 1975, présentant sans nul doute l'ampleur que ce phénomène allait être appelé à prendre dans le futur, Bill Gates réalisa la première campagne anti-piratage qu'ait jamais connue l'industrie de la micro-informatique. La signification de cette initiative ne doit pas nous échapper. En effet, au moment même où la micro-informatique commençait à émerger en tant que secteur économique, son existence et ses objectifs déclarés signifiaient on ne peut plus clairement qu'une rupture intellectuelle profonde était en train de s'opérer au sein de la communauté somme toute restreinte que formaient ses acteurs majeurs. Cette campagne initiée par Bill Gates doit ainsi être tenue pour ce qu'elle est, c'est-à-dire comme un des indices les plus significatifs du fait qu'en 1975 déjà, l'idéologie hippie/hacker teintée d'amateurisme éclairé qui avait dans une très large mesure présidé à la création du micro-ordinateur était en passe de se trouver mise en marge, au profit d'une démarche entrepreneuriale caractérisée par sa nature orientée et structurée, sa tendance marquée à l'innovation et à la réactivité technologique, et son opportunisme parfois féroce. Nous revenons maintenant brièvement sur ce moment clef de l'histoire de la micro-informatique puisqu'il correspondit à celui où le jeune cofondateur de *Microsoft* commença à imposer à ce secteur en devenir un nouveau modèle de production et de distribution du logiciel. Un

⁴⁵⁴ C'est seulement à la fin du mois de février 1986 que le siège de la société *Microsoft* fut transféré d'Albuquerque à Redmond, dans l'état de Washington.

modèle⁴⁵⁵ où tenter de lire et/ou de modifier le code source des programmes – une pratique excessivement courante dans le monde des amateurs d’informatique ainsi que dans les petites et moyennes structures utilisatrices d’ordinateurs - était considéré comme un acte illégal, passible de poursuites légales.

Quant on ne les a tout simplement pas opposés⁴⁵⁶ on a souvent comparé Bill Gates et Paul Allen à Steve Jobs et Steve Wozniak. Certes ces deux couples légendaires de l’histoire de la micro-informatique se sont constitués à peu de choses près à la même période, alors que les individus qui les formaient étaient encore très jeunes. Originaires de la région de Seattle (côte est des Etats-Unis), Bill Gates et Paul Allen se sont rencontrés à la fin des années 60, en fréquentant la *Lakeside Preparation School*. Passionnés eux aussi par l’électronique et l’informatique, les californiens Steve Jobs et Steve Wozniak se connaissaient quant à eux depuis les années 1970-71. Le début véritable de leur amitié et de leur collaboration professionnelle remonte cependant à l’époque où ils commencèrent à assister ensemble aux premières réunions du *Homebrew Computer Club*. Dans les deux cas de figure, l’un des deux partenaires, en raison de ses talents d’orateur, d’homme d’affaires et, jusqu’à un certain point, de visionnaire, en est progressivement venu à éclipser l’autre. Chez *Microsoft*, le rôle du porte-parole, du businessman était en général échu à Bill Gates – pourtant un excellent programmeur - tandis que Paul Allen était plutôt perçu comme le spécialiste en électronique et en programmation. La même chose pourrait également être affirmée des cofondateurs d’*Apple Computer*. Steve Jobs était considéré comme l’homme public – une tâche où il excellait - et Steve Wozniak comme le technicien et le programmeur (de génie). Pourtant, en dépit de leurs nombreux points communs, les personnalités de Bill Gates et de Steve Jobs étaient très différentes. Jobs interrompit très tôt ses études et devint programmeur pour le compte de la firme de jeux vidéo *Atari*. Parallèlement à cette activité à laquelle il lui arriva d’associer ponctuellement Steve Wozniak⁴⁵⁷, Jobs poursuivit pendant quelques années une sorte de quête spirituelle. Il était adepte du mode de vie hippie, il fréquentait les cercles pacifistes, il lui est arrivé de prendre du L.S.D. et il suivait un régime alimentaire végétarien.

⁴⁵⁵ On parle ici souvent de *Closed Source Software Model*, par opposition au modèle de l’*Open Source Software Model*. A la différence du premier cas, où toute tentative de désassemblage et d’altération du code informatique d’un logiciel représente une action illégale, un logiciel dont le code source est défini comme ouvert (open) peut être étudié et modifié tout à fait librement, par quiconque le souhaite et dispose des compétences pour le faire. De telles modifications, si elles sont effectivement apportées, sont ensuite validées/refusées (et éventuellement corrigées) par la communauté constituée par les utilisateurs de l’application concernée.

⁴⁵⁶ Bill Gates et Steve Jobs ne s’apprécient guère. A dire vrai leur antipathie mutuelle est au moins aussi fameuse que peuvent l’être certaines de péripéties épiques qui ont ponctué leur rivalité industrielle.

⁴⁵⁷ Wozniak travaillait chez *Hewlett-Packard* comme programmeur quand Steve Jobs fit appel à ses compétences pour concevoir le fameux jeu vidéo de casse briques *Breakout*.

En 1974 il fit même une retraite en Inde. N'eut été son appétence irréfragable pour la reconnaissance publique et l'argent, Jobs aurait pu être à bien des égards parfaitement représentatif de cette génération d'étudiants/hackers californiens inspirée par les thèses et les pratiques psychédéliques de Timothy F. Leary, les mises en garde faites par Norbert Wiener contre la concentration et la détention monopolistique de l'information, et les visions d'une informatique distribuée et librement accessible à tous que défendaient et exploraient sans relâche des pionniers tels que Vannevar Bush, Joseph C. R. Licklider, Douglas C. Engelbart ou encore Theodor H. Nelson. Mais l'engagement philosophique et politique de Jobs n'était pas assez fort ou profond pour en faire à proprement parler un membre radical de la sous culture californienne des années 70. Sa volonté de réussir, son redoutable sens des affaires, ses connaissances techniques et sa capacité de visionnaire en matière de technologie le destinaient finalement à devenir l'un des entrepreneurs les plus influents qu'ait connue l'industrie informatique.

Bill Gates n'adhéra quant à lui jamais à l'idéologie hippie. Jamais il ne se réclama d'une quelconque fraction de la mouvance contestataire qui secoua les Etats-Unis tout au long des mandats présidentiels de John F. Kennedy et de Richard M. Nixon. A la différence de Steve Jobs qui était un enfant adopté et qui connut quelques épisodes plutôt tumultueux au cours de sa jeunesse⁴⁵⁸, Bill Gates grandit de façon paisible, dans des conditions matérielles confortables, et auprès de parents riches et attentionnés. S'il n'était pas un activiste politique, ni non plus un adepte du credo new age, le jeune Gates pouvait en revanche être considéré comme un véritable hacker. Non pas un pirate⁴⁵⁹ mais plutôt un passionné sincèrement animé par la volonté de comprendre et de maîtriser les rouages les plus intimes de l'informatique et de ses instruments. Quant il étudiait dans son école huppée de Seattle, Bill Gates créa le *Lakeside Programmers Group* en compagnie de son ami Paul Allen. Utilisant – à outrance d'ailleurs, nous y reviendrons sous peu – le temps machine P.D.P.-10 que la *Lakeside School* achetait auprès de la *Computer Center Corporation* de Seattle, les deux jeunes gens devinrent rapidement des experts du fonctionnement de ce système et ils se forgèrent l'un et l'autre une solide expérience dans le domaine de la programmation. Le BASIC était le langage par défaut employé sur ce système en temps partagé. Aussi, à force d'heures de pratique, Bill Gates et Paul Allen en acquirent-ils une exceptionnelle maîtrise. Inutile bien entendu de revenir sur le rôle déterminant que cette compétence apprise durant les années de collège joua quelques

⁴⁵⁸ Toutes choses qui permettent dans une certaine mesure de comprendre la volonté de réussite de Jobs, sa personnalité « affirmée » et les sautes d'humeurs qui caractérisèrent ses premières années à la tête d'*Apple Computer*.

⁴⁵⁹ Dans le jargon coloré de l'informatique underground, on aurait alors parlé de *Black Hat Hacker*.

années plus tard, lorsque Gates et Allen contactèrent le Président de la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems* pour lui vendre un BASIC *Altair* qu'ils n'avaient d'ailleurs pas encore commencé à programmer. Il a déjà été dit qu'une des choses les plus remarquables concernant les cofondateurs de *Microsoft* fut leur aptitude à pressentir l'importance formidable que la micro-informatique n'allait pas tarder à prendre au sein de la société et de son économie. Plus encore, Gates et Allen perçurent que l'élément fondamental de la révolution technologique dont ils entrevoyaient maintenant les contours se dessiner n'était pas le matériel – pour eux il était clair que les ordinateurs deviendraient tôt ou tard un bien de consommation courante – mais bien le logiciel. Dès lors il ne subsistait aucun doute quant au fait que celui qui se donnerait les moyens de maîtriser ce secteur de la production informatique se ménagerait du même coup une place véritablement stratégique au sein de cette industrie.

Bien entendu cette compréhension des choses qui à terme devait déboucher sur la mise en place d'une politique générale destinée à s'assurer le contrôle de la future industrie du logiciel, allait complètement à l'encontre des us en vigueur dans le milieu où l'on inventa le micro-ordinateur. Ce sont de petits entrepreneurs indépendants qui créèrent les premiers systèmes informatiques domestiques. Souvent empreints de l'esprit de contestation qui caractérisa les années 60 et 70, ceux qui formaient leur clientèle étaient pour la plupart des amateurs d'électronique et d'informatique compétents, qui, après des dizaines d'heures passées à assembler leur kit, n'hésitaient pas à se lancer dans une tâche encore plus ardue que le montage d'un micro-ordinateur, à savoir l'apprentissage de sa programmation. Dans cette sphère où l'amateurisme était la règle, l'entraide faisait évidemment force de loi. Par l'entremise des revues spécialisées et le biais des clubs et des associations, on n'hésitait pas à partager des informations techniques et à prodiguer gracieusement des conseils à ceux qui en avaient besoin. Dans le cas précis des micro-ordinateurs, cela concernait aussi bien l'assemblage des kits, que la programmation des machines résultant de leur montage. Au milieu des années 70 aucune restriction précise ne pesait sur le code source des (rares) programmes disponibles pour les MARK-8, *Altair* 8800 et autres IMSAI 8080. Les possesseurs de ces petites machines échangeaient et, parfois modifiaient ce code, sans que quiconque trouve quoi que ce soit à y redire, y compris ceux-là même qui en étaient à l'origine (eux aussi des amateurs pour la plupart). Le mode interrelationnel qui prévalait au sein de ces communautés constituées de gens partageant les mêmes centres d'intérêt et quelquefois aussi les mêmes idéaux sociaux et politiques était donc assurément celui de la coopération. Le 3 février 1976 Bill Gates adressa un courrier ouvert à tous les possesseurs d'*Altair* 8800 dans *Computer Notes*, la publication mensuelle grâce à laquelle la société

M.I.T.S. tenait ses clients au courant de toutes les nouveautés, informations techniques et astuces qui concernaient sa petite machine. Dans cette lettre intitulée « *An Open Letter to Hobbyists* », Gates se livrait à une diatribe virulente contre tous ceux qui utilisaient le BASIC *Altair* sans s'être jamais acquitté du coût de sa licence d'exploitation. Le jeune directeur général de *Micro-Soft* avançait différents arguments afin de démontrer combien l'attitude fort peu honnête d'un nombre considérable de *hobbyists* pouvait non seulement nuire aux intérêts de sa compagnie mais aussi, à plus ou moins long terme, à ceux de tous les informaticiens amateurs. Afin d'en respecter la logique et de ne point en dénaturer l'esprit, nous reproduisons ci-dessous le contenu de ce document dans son intégralité:

« *Lettre ouverte aux Hobbyists.*

3 février 1976

William Henry Gates III

De mon point de vue, le manque de bon cours de programmation, de bons livres et de logiciels est aujourd'hui la question la plus critique pour les hobbyistes. Sans bon logiciel, si l'utilisateur ne connaît pas la programmation, l'ordinateur du hobbyiste reste stérile. Écrira-t-on du logiciel de qualité pour ce marché ?

Voici près d'un an, Paul Allen et moi avons anticipé sa croissance, embauché Monte Davidoff et développé le BASIC pour l'Altair. Le travail initial n'a pris que deux mois mais nous avons tous les trois dû passer l'essentiel de l'année dernière à documenter ce BASIC, l'améliorer et l'enrichir en fonctionnalités. Nous avons maintenant des versions BASIC pour les mémoires 4K, 8K, étendues, ROM et disque dur. Nous avons utilisé pour plus de 40 000 dollars de temps d'ordinateur.

Nous avons reçu des réactions positives de centaines de personnes qui utilisent ce BASIC. Cependant, deux faits surprenants apparaissent : 1) la plupart de ces " utilisateurs " n'ont jamais acheté le BASIC (il a été acheté par moins de 10 % des possesseurs d'un Altair), 2) le montant des redevances venant de nos ventes aux hobbyistes rémunère le travail qui a été fourni sur le BASIC de l'Altair à moins de 2 \$ de l'heure.

Pourquoi cela ? La plupart des hobbyistes savent bien qu'ils volent le logiciel. Il faut bien acheter le matériel, mais le logiciel, cela se partage. Qui se soucie de rémunérer les gens qui ont travaillé pour le produire ?

*Est-ce honnête ? Si vous volez le logiciel, vous ne pourrez pas vous retourner contre MITS en cas de problème. MITS ne fait aucun profit en vendant le logiciel. La redevance qui nous est payée, le manuel, la bande etc. en font une opération tout juste équilibrée. Ce que vous faites, c'est d'empêcher la production de bon logiciel. Qui peut se permettre de faire travailler des professionnels pour rien ? Quel hobbyiste pourrait mettre trois hommes*année dans la programmation, détecter toutes les bogues, documenter le produit puis le distribuer pour rien ? Le fait est que personne, en dehors de nous, n'a investi d'argent dans le logiciel pour les hobbyistes. Nous avons écrit le BASIC pour le 8080, nous sommes en train d'écrire l'APL pour le 8080 et le 6800, mais rien ne nous incite à mettre ces logiciels à la disposition des hobbyistes. Vous êtes tout simplement des voleurs.*

Que penser de ceux qui revendent le BASIC pour Altair ? Ne se font-ils pas de l'argent sur le marché des logiciels pour hobbyistes ? Oui, mais ceux que l'on nous a signalés pourraient finalement y perdre. Ils donnent une mauvaise réputation à tous les hobbyistes : on devrait les chasser des réunions des clubs où ils apparaissent.

J'aimerais recevoir des lettres de tous ceux qui souhaitent payer leur dette envers nous, ainsi que de ceux qui ont des suggestions ou des commentaires à formuler. Écrivez-moi à 1180 Alvarado SE, #114, Albuquerque, New Mexico, 87108. Rien ne pourrait me plaire davantage que d'embaucher dix programmeurs et de pouvoir inonder de bons logiciels le marché des hobbyistes.

Bill Gates, Directeur Général, Micro-Soft⁴⁶⁰ ».

Les différents points du raisonnement de Bill Gates étaient donc les suivants :

1°) Les livres et les cours de programmation destinés aux informaticiens amateurs sont rares, particulièrement ceux de qualité. Or sans logiciel, un ordinateur ne sert à rien. Privé de ces sources de formation et d'information essentielles, il est fort peu probable que l'informaticien amateur lambda soit susceptible de développer quoi que ce soit de probant.

⁴⁶⁰ Gates W. H., « An Open Letter to Hobbyists », in *Computer Notes*, 3 février 1976.

Dans de telles conditions, son ordinateur demeurera muet, à moins que quelqu'un de compétent ne se charge de développer des programmes utiles et efficaces.

2°) Le développement initial du BASIC de l'*Altair* n'a duré que deux mois. Mais sa documentation – à ce point tellement nécessaire aux *Computer Hobbyists* – son perfectionnement puis l'élaboration de versions plus puissantes que le programme original ont nécessité le travail de trois personnes pendant (presque) une année et demandé près de 40000 heures d'une ressource encore très chère, le temps ordinateur. En d'autres termes produire du code informatique reste un processus long et coûteux, même quand il s'agit d'ordinateurs domestiques

3°) Les impressions recueillies auprès de très nombreux informaticiens amateurs confirment que le BASIC *Altair* est un logiciel apprécié. Cependant ces retours de la part de la « clientèle » sont révélateurs de deux choses moins heureuses: primo, seuls 10% des acheteurs de micro-ordinateurs *Altair* 8800 ont acquis la licence d'exploitation du BASIC de *Micro-Soft*; secundo, les ventes de BASIC effectivement réalisées sont tout juste suffisantes pour que la société parvienne à son équilibre économique. D'où l'on conclut que la très grande majorité des copies – peut-être 90% - de BASIC *Altair* en circulation en 1975 et au début de l'année 1976 étaient des versions copiées illégalement. Le manque à gagner pour *Micro-Soft*, et le nombre de pirates nuisant à la santé économique de la petite firme d'Albuquerque, étaient par conséquent proportionnels à ce pourcentage.

4°) La grande majorité des gens qui n'ont pas acheté le BASIC de *Micro-Soft* mais qui l'emploient malgré se comportent comme des voleurs (certes) et ils le savent (dans certains cas cela est moins sûr).

5°) Cette façon de faire quasi généralisée est irresponsable et ceux qui la cautionnent en y prenant part sont simplement des voleurs. D'abord parce qu'elle place la microinformatique en situation de grand péril. A supposer qu'il dispose des compétences nécessaires pour le faire, aucun informaticien amateur ne peut de toute façon se permettre de consacrer le temps et l'argent que le développement de programmes informatiques de qualité exige impérativement. C'est là le travail de professionnels. Or si le travail de ces professionnels n'est pas suffisamment rémunéré en raison de l'ampleur et de la persistance du phénomène du piratage, ces derniers ne pourront pas continuer à exercer leur activité, c'est-à-dire la production de code informatique. Les informaticiens amateurs se retrouveront donc

sans logiciels et leurs machines seront inutiles. *Micro-Soft* est en train d'effectuer le portage du langage A.P.L. (*A Programming Language*) vers les microprocesseurs *Intel i8080* et *Motorola 6800*. Rien cependant ne garantit que ces programmes seront mis un jour sur le marché puisqu'en l'état actuel des choses, la société est assurée de ne jamais voir ses efforts récompensés. Il s'agit donc d'une forme de chantage.

7°) Toutes les copies du BASIC *Altair* qui sont en circulation n'ont pas simplement été copiées et échangées par des passionnés plus ou moins conscients de la portée de leurs actes. Profitant de l'existence des réseaux d'échange et des clubs informatiques certains hobbyists particulièrement peu scrupuleux – en fait de véritables pirates – vendent des copies de ce programme à des tarifs évidemment inférieurs à ceux officiellement pratiqués dans le commerce. Ainsi lèsent-ils la compagnie *Micro-Soft* et ses programmeurs et incitent-ils les amateurs à se rendre coupables de vol par recel.

8°) De la cessation de cette pratique dépend le devenir de la micro-informatique : sa disparition conditionne la création d'emplois dans ce secteur (des férus d'informatique pourraient ainsi vivre de leur passion), et la production de logiciels répondant à un haut standard de qualité.

Pour pouvoir prendre la pleine mesure du contenu de cette lettre ouverte, il est nécessaire de rappeler deux choses. Premièrement la société *Microsoft* (qui à l'époque s'appelait *Micro-Soft*), n'était bien entendu pas la surpuissante entreprise transnationale que nous connaissons aujourd'hui. Deuxièmement jamais on n'avait osé s'adresser aux électroniciens et informaticiens amateurs de cette manière, c'est-à-dire en condamnant certains de leurs actes et en les traitant ouvertement de voleurs par l'entremise d'une publication faisant autorité dans le milieu où ils évoluaient. Cette charge en règle conduite par un entrepreneur d'une vingtaine d'années contre la communauté des possesseurs d'*Altair 8800* fut évidemment très mal reçue par ces derniers. Elle était cependant révélatrice des profondes lignes de tension qui traversaient et structuraient la micro-informatique au moment même où celle-ci commençait à devenir une industrie. Une première contradiction constitutive de cette sphère et de la phase de changement qu'elle était en train de subir était la suivante. La communauté des informaticiens amateurs était constituée de gens qui trouvaient normal le fait d'avoir à déboursier de l'argent pour posséder un micro-ordinateur. Il s'agissait là d'un dispositif de haute technologie qui, en plus d'intégrer des composants électroniques onéreux, représentait depuis fort longtemps un objet de fantasme technologique pour nombre

d'entre eux. Ils acceptaient donc de payer volontiers pour obtenir une chose concrète qui revêtait encore à l'époque un caractère exceptionnel. La même chose ne pouvait pas être affirmée à propos du logiciel. L'esprit qui régnait dans les clubs d'informaticiens amateurs, la sous culture et les valeurs qui étaient les leurs et qui les rassemblait, incitaient ces derniers à s'entraider et à partager ce qui pouvait l'être. Or s'il était impossible de reproduire gratuitement un micro-ordinateur dans le but de le donner ou de l'échanger, il était en revanche facile de copier des programmes pour les fournir, gratuitement ou non, aux personnes que l'on fréquentait. Un programme informatique ne possède en effet rien de matériel. C'est un ensemble d'informations structurées d'une certaine façon, qui, au moins en droit, demeure indépendant du support sur lequel il se trouve inscrit à tel ou tel instant. Au milieu des années 70, il n'existait aucune espèce de protection visant à prévenir le piratage des logiciels. Reproduire un programme était par conséquent un acte aisé à accomplir. Il suffisait seulement de disposer de l'équipement approprié, à savoir des magnétophones ou des lecteurs de disquettes (ce qui était déjà plus rare). Cette immatérialité des programmes informatiques, la facilité technique de leur reproductibilité, l'absence d'un modèle de référence spécifiant les modalités de commercialisation des applications micro-informatiques et la culture contestataire et communautaire qu'ils avaient peu ou prou hérité des années 60 représentaient autant de facteurs incitant les informaticiens amateurs à reproduire et échanger illégalement les logiciels qui existaient alors. Alors certes, ce qu'ils faisaient était assimilable à du vol. Mais étant donné le contexte qui était celui de l'époque, et la mentalité qui baignait celle-ci, tous n'avaient peut-être pas conscience du fait que cela en était.

En réalité ce sont plusieurs conceptions, plusieurs représentations des choses qui entraient ici littéralement en collision les unes avec les autres. Pendant près d'une vingtaine d'années un nombre croissant d'individus avaient souhaité voir advenir la démocratisation massive de l'ordinateur et celle de son corollaire, la démonopolisation de la détention de l'information. Durant ces deux mêmes décennies des pionniers, des visionnaires, s'étaient employés à jeter les bases théoriques de cette révolution à venir et aussi à en développer les conditions de possibilité techniques. La mise sur le marché du mini-ordinateur, puis son arrivée dans les universités et les écoles, au cours de la seconde moitié des années 60, avaient commencé à préparer les gens à ce qui allait suivre. De nombreux étudiants et lycéens – de futurs adeptes de la micro-informatique pour certains – avaient ainsi pu se familiariser avec le fonctionnement et la programmation de ces systèmes. En 1975, le bouleversement tant attendu était précisément en train de se produire. Sous la forme du micro-ordinateur, la machine informatique qui était depuis si longtemps l'apanage des gouvernements, des forces

armées, des groupes industriels et des entreprises toutes puissantes commençait peu à peu à faire son apparition au domicile des particuliers. Et avec elle venaient plusieurs promesses, comme la fin des centralisations étatique et corporatiste de l'information et le début de sa circulation libre et gratuite.

Le fait que dans son *Open Letter* le Directeur de *Micro-Soft* traite les micro-informaticiens amateurs de voleurs, puisqu'il les somme dans le même document de rembourser l'argent dont ils étaient redevables à sa compagnie pour avoir reproduit, distribué et utilisé le BASIC *Altair* – un programme effectivement nécessaire au fonctionnement de leur système - avait donc de quoi heurter leurs convictions et leur façon commune de penser et d'agir. Organisés en petits clubs, ces individus souvent jeunes se caractérisaient par leur volonté d'échanger données et tournemains techniques. Ils voulaient également partager les connaissances et l'expérience qu'ils avaient glanées ici ou là. Il y a donc fort à parier que la plupart d'entre eux ne percevaient pas le fait de copier des programmes comme un acte véritablement délictueux. Reproduire des programmes était une des choses que le micro-ordinateur permettait de faire et puisqu'ils avaient besoin de ces logiciels, ils le faisaient sans forcément avoir conscience de l'ampleur du tort qu'ils causaient à leurs auteurs. Au fond deux visions fondamentales mais antithétiques de la micro-informatique s'opposaient ici: celle des amateurs, en général sous-tendue par les idéaux contestataires et communautaires propres aux années 60 et 70, et celle fondée sur la logique de libre entreprise défendue avec force virulence par Bill Gates. Paradoxalement, ces deux sphères constitutives de la micro-informatique dépendaient si étroitement l'une de l'autre que le parasitage systématique de la seconde par la première risquait tout bonnement d'entraîner les deux sinon à leur perte, du moins dans une impasse durablement et mutuellement incapacitante.

La lettre ouverte de Bill Gates aux amateurs d'informatique parue le 3 février 1976 dans *Computer Notes* ne devait en réalité constituer que la première salve de l'offensive contre le piratage que le patron de *Micro-Soft* avait décidé de lancer cette année là. Le 27 mars suivant, dans le cadre du discours inaugural qu'il fut convié à prononcer à l'occasion de la première *World Altair Computer Convention*, Gates réitéra de vive voix sa condamnation sans appel du piratage informatique ainsi que ses mises en garde à l'endroit de tous ceux s'y adonnaient. Cette intervention remarquée – et pour cause les individus qu'elle visait se trouvaient très largement représentés lors de cet événement - fut suivie par la parution d'une nouvelle lettre dans *Computer Notes*. Intitulé « A Second and Final Letter », ce document s'attaquait une nouvelle fois au piratage informatique et, dans la droite lignée des interventions antérieures de Gates, il continuait à poser les jalons d'une nouvelle politique de

commercialisation des programmes. Seule une licence concédant un droit d'exploitation des programmes serait vendue. En plus de rester la propriété exclusive de *Micro-Soft* – on parlerait désormais de logiciel propriétaire - son code source compilé serait protégé. Ainsi le programme vendu pourrait-il être vu à la manière d'une boîte noire dont on pourrait se servir, sans toutefois avoir la possibilité (légale) de l'ouvrir pour voir et comprendre son fonctionnement. Ce modèle qui *mutatis mutandis* a toujours cours aujourd'hui, a évidemment joué un rôle fondamental dans le processus de formation de l'industrie du logiciel. La chose n'est d'ailleurs pas sans saveur quant on sait que lorsqu'ils fréquentaient la *Lakeside Preparation School*, Gates et Allen avaient provoqué à plusieurs reprises le crash du système informatique en temps partagé du *Seattle Computer Center* en tentant d'en violer à distance les différentes mesures de sécurité. Les deux jeunes gens avaient aussi été exclus plusieurs semaines de l'institution scolaire pour avoir piraté les fichiers de connexion utilisateurs (*Log Files*) du même ordinateur central. Leur consommation d'heures système avait en effet dépassé si déraisonnablement le quota qu'on leur avait octroyé qu'ils s'étaient efforcés (sans succès) d'effacer leurs « traces » sur le *mainframe* du centre.

Ainsi que l'avaient prévu Bill Gates et Paul Allen, les dernières années de la décennie 70 et les premières années de la décennie 80 virent augmenter spectaculairement le nombre de sociétés (nord-américaines et internationales) commercialisant des kits informatiques ou des micro-ordinateurs déjà assemblés. Selon le cas et l'année intéressés, ces machines étaient équipées de microprocesseurs produits par *Intel*, *Motorola*, *M.O.S. Technology*, *Zilog* ou *Texas Instruments*. Sans prétendre à aucune exhaustivité – car il serait possible de dénombrer littéralement des centaines de petits systèmes informatiques - on mentionnera ici les entreprises les plus connues, ainsi que les micro-ordinateurs qu'elles produisirent :

⇒ 1975.

- le M6800 de la société texane *Southwest Technical Products Corporation* (puce *Motorola 6800*, été 1975).
- le JOLT *Microcomputer* proposé par la firme californienne *Microcomputer Associates Inc.* (puce *M.O.S. 6502*, 1975, mois inconnu).
- le *Jupiter II 6800 Computer System* de *Wave's Mates* (puce *Motorola 6800*, 1975, mois inconnu).
- le *Compucolor*, premier micro-ordinateur doté d'une capacité d'affichage graphique sur écran couleur intégré, commercialisé par la *Compucolor Corporation Inc.* (puce *i8080*, 1975, mois inconnu).

- le *Sphere I Computer* conçu par la *Sphere Corporation Inc.* (puce *Motorola 6800*, 1975, mois inconnu).

⇒ 1976.

- l'IMSAI 8080, clone amélioré de l'*Altair 8800* construit par la société californienne *I.M.S. Associates Inc.* (puce *i8080*, début de l'année 1976).
- l'*Altair 8800B*, évolution du modèle précédent, toujours fabriqué par M.I.T.S. (puce *i8080*, mars 1976).
- le L.C.M.-1001 *Learning Module Microprogrammer μP* de *Texas Instruments* (puce T.I. SPB0400, 1976, mois inconnu).
- l'*Apple I*, produit par *Apple Computer Company* (puce M.O.S. 6502, avril 1976).

⇒ 1977.

- l'*Apple II*, de l'*Apple Computer Company* (puce M.O.S. 6502, avril 1977).
- le P.E.T. (*Personal Electronic Transactor*) 2001 de *Commodore Business Machines Inc.* (puce M.O.S. 6502, juin 1977).
- le T.R.S. (*Tandy Radio Shack*) 80 *Model I* de la *Tandy Corporation Inc.* (puce *Zilog Z-80*, août 1977).

⇒ 1979.

- le T.R.S. 80 *Model II* de la *Tandy Corporation Inc.* (puce *Zilog Z-80-A*, mai 1979).
- le TI/99/4 *Home Computer* produit par la *Texas Instruments Corporation* (puce T.I. TMS9900, novembre 1979).

⇒ 1980.

- le ZX-80, produit par le britannique *Sinclair Ltd.* (puce *NEC780-C1*, février 1980)
- l'ATOM, construit par le britannique *Acorn Computer* (puce M.O.S. 6502, mars 1980).
- le *Victor Lambda*, de la société française *Micronique/Lambda Systèmes* (puce *i8080A*, avril 1980).
- le *Color Computer*, de la firme américaine *Tandy Radio Shack* (puce *Motorola 6809 E*, juillet 1980).

⇒ 1981.

- le VIC-20, produit par *Commodore* (puce *Commodore Semiconductor Group 6502A*, mai 1981).
- le ZX-81, du britannique *Sinclair Ltd.* (puce *Zilog Z-80-A*, mars 1981).
- l'I.B.M. *Model 5150*, ou *Personal Computer (P.C.)*, (puce *i8088*, août 1981).
- le TI/99/4A, de la *Texas Instruments Corporation* (puce T.I. *TMS 9900*, juin 1981).

⇒ 1982.

- les Atari 600 et 800, de l'américain *Atari* (puce M.O.S. *6502C*, janvier 1982).
- le C-64, de *Commodore* (puce M.O.S. *6510*, janvier 1982).
- le *Dragon 32*, produit par le britannique *Dragon Data Ltd* (puce *Motorola MC6809EP* janvier 1982).
- le *ZX Spectrum*, de l'anglais *Sinclair Ltd.* (puce *Zilog Z-80-A*, avril 1982).
- le TO-7, du français *Thomson* (puce *Motorola 6809*, décembre 1982)

⇒ 1983.

- l'*Apple IIe*, d'*Apple Computer Company* (puce M.O.S. *65c02*, janvier 1983).
- L'*Oric-1*, fabriqué conjointement par les britanniques *Oric Products* et *International Ltd. Tangerine Computer Systems Ltd.* (puce M.O.S. *6502A*, janvier 1983).
- l'I.B.M. *Model 5160 Personal Computer/Extended Technology* (puce *i8088*, mars 1983).
- le *X-07 Handy Personal Computer*, produit par le japonais *Canon* (puce *National Semiconductors NSC 800*, mai 1983).
- l'*Alice*, du français *Matra-Hachette* (puce *Motorola MC6803*, 1983, mois inconnu).

⇒ 1984.

- le *Macintosh*, construit par *Apple Computer Company* (puce *Motorola MC 68000*, janvier 1984).
- le *Color Personal Computer 464* du britannique *Amstrad Ltd.* (puce *Zilog Z-80-A*, juin 1984).
- l'I.B.M. *Model 5170 Personal Computer/Advanced Technology*, (puce *i80286*, août 1984).

Parmi la trentaine de micro-ordinateurs qui viennent d'être énumérés il en est certains qui se vendirent à plusieurs dizaines de milliers d'exemplaire aux Etats-Unis et/ou en Europe. A de très rares exceptions, ces machines disposaient toutes d'un BASIC en R.O.M. – preuve éclatante de la pertinence du choix original que fit le président de M.I.T.S. pour l'*Altair 8800* et de l'influence que celui-ci exerça par la suite - et lorsque ce n'était pas le cas, il était en général toujours possible de charger une version de ce langage de haut niveau dans la mémoire du système par l'intermédiaire d'une bande magnétique ou d'une disquette. Au fur et à mesure que de nouveaux microprocesseurs (8 et 16 bits) et que de nouvelles plateformes informatiques faisaient leur apparition, *Microsoft*⁴⁶¹ continua à diversifier son offre de logiciels (avec les BASIC v2.0 à v5.0, le BASIC *Advanced*, le BASIC *Extended*, le MBASIC, le MSBASIC, le GW BASIC, le QBASIC, les *Level x* BASIC, un compilateur FORTRAN et un compilateur COBOL-80, etc.), et à multiplier les ventes de licences d'exploitation pour ses programmes. Progressivement la firme de Bill Gates et de Paul Allen réussit à devenir le fournisseur de très nombreux fabricants de micro-ordinateurs. Les sociétés *Tandy Radio Shack*, *Micronique/Lambda Systèmes*, *Atari*, *Hewlett Packard* (terminaux), *MSX*, *Canon*, *N.E.C.*, *Commodore* - sans oublier bien sûr *Apple Computer Company* - devinrent ses clients. Au mois de décembre 1978 le chiffre d'affaire de *Microsoft* – la marque fut déposée le 26 avril 1976 - avait dépassé un million de dollars. Cependant une société fondée à la fin de l'année 1974 – à l'époque elle se nommait encore *Intergalactic Digital Research* – commençait à lui faire de l'ombre sur ce marché.

3.5.3.2. Le Control Program/Monitor / Control Program for Microcomputers (CP/M) de la Digital Research Inc.

Une société spécialisée dans l'édition de logiciels – la *Digital Research Inc.* – a bien failli occuper un rang équivalent à ceux d'I.B.M., d'*Intel*, de *Microsoft* et de la *Digital Equipment Corporation* au panthéon des grandes entreprises qui ont « créées » l'informatique telle que nous la connaissons aujourd'hui. Si les choses avaient été différentes – et très peu de choses auraient réellement suffi pour qu'elles le soient – la société de Bill Gates n'aurait peut-être pas connu l'ascension fulgurante et vertigineuse qui a été la sienne au début de la décennie 80.

⁴⁶¹ Le nom *Microsoft*, orthographié sans tiret, a été officiellement utilisé pour la première fois le 29 novembre 1975 par Bill Gates, dans une lettre adressée à Paul Allen.

Avant d'être rebaptisée *Digital Research Inc.*, la petite entreprise cofondée par le Dr. Gary A. Kildall et son épouse Dorothy McEwen à la fin de l'année 1974 se nommait *Intergalactic Digital Research Inc.* Originaire de la région de Seattle – comme Bill Gates - c'est à l'âge de 30 ans que Gary A. Kildall obtint son doctorat en sciences informatiques à l'Université de Washington. A la fin de son cursus, et puisqu'il faisait partie des troupes de réserve, l'*U.S. Navy* lui offrit de choisir entre une affectation au Vietnam et une position de Professeur d'informatique à l'*United States Naval Postgraduate School* de Monterey. Pour ce jeune diplômé dont la famille n'avait jamais cessé d'assurer la conduite de l'école de navigation⁴⁶² qu'elle avait créée en 1924, il ne fut guère difficile de se déterminer. Gary A. Kildall enseignait donc l'informatique et les mathématiques dans une école navale militaire implantée en Californie quant, en consultant le bulletin de l'institution et la revue *Electronic News*, il prit connaissance de l'existence d'un tout nouveau dispositif informatique : le microprocesseur *i4004*, conçu et vendu par l'*Intel Corporation*. Kildall saisit immédiatement les potentialités techniques recelées par le nouveau composant électronique du fondateur de Santa Clara. Après s'être renseigné davantage il s'en procura un (avec sa suite de puces additionnelles), et il se mit immédiatement au travail. Rapidement ses premières tentatives pour développer de petits programmes à destination de l'*i4004* l'amènèrent à déchanter. En effet si le premier microprocesseur d'*Intel* était plein de promesses, la limitation de sa puissance de traitement à des séquences de 4 bits faisait qu'il ne pouvait malheureusement pas les tenir. Concrètement cela signifiait que la puce était incapable d'exécuter des programmes un tant soi peu élaborés. Quant à ceux qu'elle pouvait effectivement prendre en charge, leur simplicité ne l'empêchait pas de les exécuter avec une lenteur telle qu'elle aurait difficilement pu être tolérée dans le cadre d'une activité informatique normale. Cette expérience quelque peu décevante avec le premier microprocesseur de l'histoire ne suffit toutefois pas à faire retomber l'enthousiasme et la confiance que son principe inspirait à Gary Kildall. Toujours fermement convaincu du potentiel du composant, il prit la décision d'entrer en contact avec les dirigeants d'*Intel*. A cette époque la société de Robert Noyce et Gordon E. Moore cherchait justement à engager une personne afin de créer un langage de programmation pour l'*i4004*. Le succès commercial rencontré par le microprocesseur et l'inventivité avec laquelle les électroniciens et les informaticiens étaient parvenus à l'exploiter dans des secteurs d'application très diversifiés avaient à ce point été inattendus et considérables que l'entreprise californienne s'était littéralement trouvée prise de court. Lorsqu'*Intel* avait introduit l'*i4004*

⁴⁶² Il s'agissait du *Kildall College of Nautical Knowledge*.

sur le marché aucune application précise n'avait en effet été prévue pour lui. Désormais elles étaient potentiellement si nombreuses qu'un langage de programmation dédié était devenu une nécessité. A la même période le jeune professeur de sciences informatiques se rendit au siège de l'entreprise de semi-conducteurs. Il visita ses locaux, rencontra ses responsables et à l'issue d'une longue discussion au cours de laquelle ces derniers purent apprécier le niveau de ses connaissances, il accepta la proposition qu'ils lui firent, c'est-à-dire travailler pour *Intel* en qualité de consultant et prendre en charge le développement du langage informatique qui devait permettre de programmer le microprocesseur *i4004*. Cette nouvelle fonction professionnelle obligea Kildall à créer sa première société, la *Microcomputer Applications Associates Inc.*, pour vendre ses services d'expert.

Comme *Intel* le lui avait demandé, et sans renoncer pour autant à sa charge d'enseignant à l'école navale, Gary Kildall commença à travailler d'arrache-pied au développement du langage de programmation destiné à l'*i4004*. Tandis qu'il progressait rapidement sur cette voie, ses employeurs lui proposèrent également de concevoir une version de ce logiciel pour la puce 8 bits *i8008* qu'ils venaient d'introduire sur le marché (en avril 1972). Le Professeur d'informatique accepta cette mission supplémentaire. Peu à peu il mit au point un programme permettant de simuler sur un mini-ordinateur⁴⁶³ le comportement des deux microprocesseurs et de leurs jeux d'instructions respectifs. Au passage nous ne manquons pas de remarquer que deux ans après cet achèvement, Bill Gates et Paul Allen furent appelés à une méthode très similaire à celle qu'avait employée Kildall, pour programmer le BASIC de l'*Altair 8800*.

Gary Kildall appela son nouveau logiciel PL/M, un acronyme signifiant *Programming Language for Microprocessors*. Grâce à ce dernier il pu produire, contrôler et corriger les applications qu'il avait produites pour les microprocesseurs *i4004* et *i8008*. Le code informatique généré au moyen du PL/M devait être gravé sur des puces auxiliaires de mémoire morte⁴⁶⁴. Le contenu de ces puces était ensuite lu et exécuté par le microprocesseur cible. Incorporant notamment des concepts empruntés à l'ALGOL et au PL/I (*Programming*

⁴⁶³ La société *Intel* employait un D.E.C. P.D.P-10 tandis que la machine utilisée à l'U.S. l'*United States Naval Postgraduate School* était un I.B.M. 360. Nous n'avons pas réussi à déterminer pour quelle machine les programmes permettant de simuler le comportement des puces *i4004* et *i8008* avaient été écrits. Le fait est cependant que le CP/M – le langage que Kildall élaborait pour programmer ces puces – s'inspirait largement du PL/I (*Programming Language One*) qu'I.B.M. avait développé pour ses ordinateurs *System/360*. Kildall étant beaucoup plus souvent à Monterey qu'à Santa Clara, on peut raisonnablement penser qu'il développa son émulateur de microprocesseurs *Intel* sur et pour l'I.B.M. 360 de l'école navale où il enseignait.

⁴⁶⁴ Ce processus coûteux était évidemment irréversible pour une série de puces donnée. D'où l'intérêt du *Programming Language for Microcomputers* qui permettait de concevoir et de tester sur mini-ordinateur les programmes destinés aux microprocesseurs *i4004* et *i8008*.

Language One) d'I.B.M., le PL/M était un langage sophistiqué. Dans sa finalité il différait toutefois des langages de haut niveau comme le BASIC ou le C. D'emblée sa conception avait en effet été orientée vers la gestion des fonctionnalités offertes par les niveaux matériels inférieurs des microprocesseurs dont il devait précisément permettre d'assurer la programmation. Or en général les langages de programmation étaient plutôt pensés pour faire le contraire, c'est-à-dire rendre aussi transparentes que possible ces couches physiques et les opérations qui s'y trouvaient accomplies. Malgré une certaine similitude – en l'occurrence le recours à la technique de l'émulation sur un mini-ordinateur - une chose devait grandement différencier les conditions de travail de Gary Kildall de celles qui, deux ans plus tard, seraient celles des co-fondateurs de *Microsoft*. L'*Intel Corporation* des années 1972-73 n'était bien entendu pas la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems Inc.* La première commençait à devenir une entreprise puissante et reconnue dans le monde entier grâce à l'excellence de son savoir-faire et la qualité de ses produits tandis que la seconde se trouvait au bord de l'asphyxie financière, à cause de la crise qui venait de frapper durement l'industrie des calculatrices électroniques. En vertu de cela, les moyens qui pouvaient être mobilisés de part et d'autre n'étaient évidemment pas les mêmes. Quant à la façon dont les relations entre la société californienne et Gary Kildall se nouèrent et se déroulèrent, elle devait demeurer très éloignée de la manière dont Gates et Allen entrèrent en affaire avec le patron de la petite firme d'Albuquerque... Dans tous les cas, on est absolument certains de ce qui suit. Bill Gates et Paul Allen réalisèrent toute la programmation de leur BASIC en utilisant un émulateur d'*Altair 8800* qu'ils exécutaient sur un D.E.C. P.D.P.-1. Avant de commencer à travailler pour M.I.T.S., ils ne touchèrent jamais un exemplaire de ce micro-ordinateur. La situation de Kildall était toute autre. Non seulement celui-ci programma une application permettant d'émuler les microprocesseurs *i4004* et *i8008* sur un mini-ordinateur (cf. note 15), mais en plus, *Intel* lui donna plusieurs ordinateurs de développement de type *Intellec Microcomputer Development Systems* pour le rétribuer et lui permettre aussi de poursuivre ses travaux dans des conditions optimales. Le fondateur californien lui remit d'abord un *Intellec-8*, machine architecturée autour du microprocesseur *i8008*, puis un *Intellec 8/Mod 80* (ou *Intellec 8/80*) dans le courant de l'année 1974. Le cœur électronique de ce dernier système était le révolutionnaire microprocesseur *i8080*, celui-là même qui devait équiper l'*Altair 8800* et son célèbre concurrent, l'IMSAI 8080.

Parce qu'il était un enseignant dans l'âme et qu'il souhaitait plus que tout transmettre les connaissances qu'il possédait à ses élèves de l'U.S. *Naval Postgraduate School*, Gary Kildall installa l'*Intellec-8* dont *Intel* lui avait fait don au fond de sa classe. Par le fait même il

transforma cette zone en un véritable petit laboratoire d'informatique – très certainement le premier du genre –, c'est-à-dire en un lieu où les étudiants avaient la possibilité de tester leur savoir technologique, de l'enrichir, et de réaliser des expériences, notamment en effectuant des travaux de programmation. Evidemment, puisque l'*Intellec-8* était à l'origine un système informatique de développement dédié au microprocesseur *i8008*, l'extrême dépouillement de son « interface utilisateur » et l'absence d'applications permettant de le programmer avec « facilité » n'en faisaient pas à proprement parler un ordinateur idéal pour l'enseignement de l'informatique. Kildall était tout à fait conscient de cela. Aussi développa-t-il plusieurs outils logiciels, comme un simulateur et un débogueur, dans le but de rendre la programmation de l'*Intellec-8* plus aisée à ses étudiants. Grâce à ces petites applications le système était mieux adapté à la nouvelle fonction que Kildall lui avait assignée, mais il souffrait encore d'un défaut de taille. Ce défaut qui grevait lourdement son efficacité était en vérité aussi vieux que l'informatique elle-même.

L'*Intellec-8* ne disposait en effet d'aucun périphérique de stockage. Au début des années 70 les solutions techniques autorisant l'enregistrement de masse des données informatiques étaient relativement nombreuses. Si le principe des cartes était depuis longtemps tombé en désuétude, on employait encore des bandes de papier perforées. À côté de ces anciens systèmes dont la lenteur se trouvait jusqu'à un certain point compensée par un faible coût d'exploitation, il existait bien sûr des dispositifs plus récents, plus performants, mais aussi beaucoup plus chers. Les disques durs, les bandes et les cassettes magnétiques faisaient partie de cette dernière catégorie de supports. Bien qu'elles fussent très peu onéreuses, la lenteur de l'*Intellec-8* excluait que l'on utilise des bandes de papier. Quant aux cartes, et pour le même motif, c'était encore moins envisageable. Restaient alors les supports magnétiques. Malheureusement les instruments de stockage qui reposaient sur l'exploitation de ce principe étaient hors de prix. Kildall ne pouvait par conséquent pas se permettre d'en acquérir un pour l'asservir au petit ordinateur qui trônait dans le fond de sa classe. Le problème de la sauvegarde et du chargement des données sur l'*Intellec-8* apparaissait donc comme momentanément insolvable lorsque Kildall découvrit un échantillon de disquettes 8 pouces – des *Floppy Disks* ou « disques souples » - à l'occasion d'une visite effectuée au siège d'*Intel*, en 1973. Développé pour satisfaire à des raisons techniques et économiques, le principe de la disquette magnétique avait été imaginé au sein de la *Storage Development Division* de l'I.B.M. *San Jose Research and Development Laboratory*, dans les années 1967-68. À cette époque le géant de l'informatique recherchait un nouveau moyen de stockage pour sa nouvelle ligne de mainframes *System/370*. Les ordinateurs appartenant à la famille de

compatibles *System/370* étaient les premières machines de série fabriquées et vendues par I.B.M. qui devaient disposer d'une mémoire centrale réalisée en matériau semi-conducteur. Jusqu'à présent le support systématiquement privilégié par I.B.M. pour accomplir cette fonction avait été les tores de ferrite. Tous les mainframes du fameux *System/360* étaient pourvus de mémoires internes de ce type.

A la fin des années 60 l'avènement et l'intégration progressive des nouvelles mémoires en semi-conducteur dans les chaînes de production des ordinateurs bouleversèrent notablement l'industrie informatique. Ainsi qu'il a été dit, ces dernières permirent d'augmenter le niveau des performances des systèmes et de réduire très appréciablement leurs dimensions physiques. Hormis leur coût économique élevé – au moins pendant les premières années où on les utilisa – les mémoires en semi-conducteur possédaient (et possèdent toujours) ce qui peut être considéré comme un défaut majeur. A la différence des mémoires en matériau ferromagnétique, qui possédaient la particularité de conserver leurs patterns magnétiques lorsque l'ordinateur dont ils faisaient partie intégrante n'était pas alimenté, les mémoires en semi-conducteurs perdaient (et perdent) leur contenu informationnel sitôt l'électricité coupée. Sachant à partir de là que le code opérationnel et les utilitaires de diagnostic devant assurer le fonctionnement minimal des organes des machines du *System/370* ne pourraient pas être chargés à partir de sa mémoire interne, les ingénieurs d'I.B.M. furent sommés de mettre au point une solution technique – on donna temporairement à celle-ci le nom d'*Initial Control Program Load* - pour réaliser ce chargement dans des conditions de rapidité, de fiabilité et de coût optimales. Le prix unitaire du nouveau dispositif d'enregistrement représentait ici un facteur d'une extrême importance car I.B.M., en plus de vouloir l'utiliser pour charger en mémoire le microcode des mainframes 370, désirait également l'employer comme support standard afin d'envoyer des mises à jour logicielles à ses clients. Ce travail de développement fut confié à Alan F Shugart et à son équipe (composée notamment de David I. Noble). Dans un premier temps, on envisagea d'utiliser les unités de lecture/écriture de bandes magnétiques qui équipaient systématiquement les ordinateurs du *System/370*. Cependant ces dispositifs étaient lents et leurs consommables, c'est-à-dire les bandes, demeuraient assez chers. Après avoir testé les différentes solutions existantes sur le marché et réalisé quelques tentatives (infructueuses) pour améliorer le rendement des bandes, on abandonna cette piste. C'est alors que David I. Noble, l'un des membres de l'équipe de recherches de Shugart, conçut l'idée de réaliser des disques

magnétiques souples. Baptisés « *Minnow*⁴⁶⁵ » mais plus largement connus sous le nom de « disque mémoire » (*Memory Disks*), ces supports seulement accessibles en lecture possédaient une taille de 8 pouces (soit environ 20 cm), une épaisseur de 1,5 mm et ils offraient une capacité de stockage de 80 kilo-octets. Rapidement, les ingénieurs d'I.B.M. se résolurent à les recouvrir d'une enveloppe protectrice en plastique doublée de tissu afin de préserver leur surface d'enregistrement de tout ce qui était susceptible de l'endommager ou d'altérer ses propriétés magnétiques (poussières, décharges d'électricité statique, traces de doigts causées par les manipulations réalisées par les opérateurs des systèmes, etc.).

En 1973, alors que des dizaines d'employés du *San Jose Research and Development Laboratory* avaient déjà quitté leur emploi chez I.B.M. pour aller rejoindre (ou fonder) des firmes telles que *Memorex* ou *Shugart Associates*, toutes spécialisées dans la production et la commercialisation de lecteurs/enregistreurs de disquettes et de disquettes, I.B.M. introduisit son *Data Entry System Model 3740* et, avec lui, une version améliorée de son disque mémoire 8 pouces. A présent accessible en lecture et écriture, cette nouvelle disquette I.B.M. pouvait stocker jusqu'à 256 kilo-octets de données. Cet accroissement de la capacité de stockage des disquettes et le fait que désormais, il était possible non seulement de lire les informations déjà enregistrées mais aussi d'en écrire de nouvelles, eurent pour effet de les rendre extrêmement populaires parmi les utilisateurs de gros systèmes. Peu à peu les disquettes (et leurs lecteurs) remplacèrent les bandes magnétiques, beaucoup moins pratiques et surtout beaucoup plus chères.

Attiré comme bon nombre de ses anciens collègues du centre de recherches de San José par le potentiel économique de ce nouveau marché, Alan F Shugart donna sa démission à I.B.M. à la fin de l'année 1970 et après un rapide passage chez *Memorex*, il créa son entreprise - la *Shugart Associates Inc* - au mois de janvier 1973. Avant de se voir évincé de la direction de cette société par ses actionnaires majoritaires sous le double prétexte que les résultats financiers obtenus étaient insuffisants et qu'aucun produit exploitable commercialement n'avait encore été mis au point, A. F. Shugart mit au point une disquette accessible en lecture/écriture offrant une capacité de 800 Ko, ainsi qu'un lecteur. C'est un échantillon de cette disquette que Gary Kildall vit dans le courant de l'année 1973, à l'occasion d'une des visites qu'il effectuait régulièrement au siège d'*Intel*. En voyant ce dispositif, il comprit qu'il y avait de fortes chances pour qu'il s'agisse du médium d'enregistrement qu'il recherchait pour son *Intellec-8*. Il contacta Alan F Shugart et, en

⁴⁶⁵ C'est-à-dire « Vairon ».

échange de quelque service, il parvint à obtenir un lecteur de disquettes 8 pouces⁴⁶⁶. Kildall entama alors la construction d'une carte contrôleur. Une fois intégrée au petit ordinateur, cette carte devait servir à connecter « intelligemment » les deux systèmes. Ses principales fonctions consistaient donc à gérer les flux informationnels occurring entre l'*Intellec-8* et son lecteur et à contrôler les opérations mécaniques de ce dernier. Assez vite, Kildall se rendit compte que ses compétences en matière d'électronique étaient insuffisantes pour lui permettre de mettre au point ce dispositif somme toute assez complexe. Il contacta donc un de ses amis spécialistes en électronique, John Torode, qu'il avait rencontré durant ses études à l'Université de Washington, pour lui demander de concevoir cette carte. Torode se laissa convaincre par les arguments de Kildall et il commença à étudier les deux instruments pour déterminer comment les interfacer.

Pendant ce temps Kildall qui était bien sûr toujours professeur à l'école navale de Monterey et consultant pour *Intel*, s'associa avec une de ses connaissances, Ben Copper. Cet entrepreneur de San Francisco avait imaginé un système de prédiction astrologique électronique, architecturé autour du microprocesseur *i8008*. Copper avait impérativement besoin d'un informaticien chevronné pour écrire les utilitaires et les programmes spéciaux nécessaires à la mise au point et au fonctionnement de son *Astrology Machine*. Logiquement il avait songé à Gary Kildall. Sur le plan purement commercial, c'est peu de chose de dire que l'*Astrology Machine* fut un échec retentissant. Pourtant Kildall tira un bénéfice indirect énorme de ce projet entrepreneurial malheureux. La conception du logiciel spécifique de l'*Astrology Machine* avait en effet nécessité de sa part la mise au point de plusieurs outils de développement logiciel, parmi lesquels un assembleur, un débogueur, un interpréteur BASIC et un début d'éditeur de textes. Or tous ces programmes étaient des outils, c'est-à-dire des applications génériques. En dehors du fait qu'ils avaient servi à écrire le code de la machine astrologique conçue par Ben Copper, ils n'avaient absolument rien à voir avec elle. Au prix de quelques modifications éventuelles, ils pourraient donc sans problème être réutilisés dans un contexte informatique différent. C'était heureux, car c'est à peu de choses près à ce moment que John Torode annonça à Gary Kildall qu'il avait achevé de réaliser la carte contrôleur censée permettre à l'*Intellec-8* de piloter son lecteur de disquettes 8 pouces. En recourant aux utilitaires qu'il avait élaborés dans le cadre de sa participation à la mise au point de l'*Astrology Machine*, Kildall coda alors l'ensemble des programmes dont l'ordinateur avait besoin pour contrôler ladite carte et lui donna le nom de *Control Program/Monitor*. La

⁴⁶⁶ Ces derniers coûtaient alors près de 500 dollars.

version initiale du *Control Program/Monitor* (CP/M en abrégé) permettait de lire et d'écrire des fichiers informatiques à partir de et sur les disquettes qui étaient insérées dans le lecteur de l'*Intellec-8*. Il s'agissait en fait d'un système d'exploitation sommaire qui intégrait plusieurs modules fonctionnels fondamentaux, comme une console de commandes et un programme de gestion de disquettes. En anglais, ce logiciel était désigné sous l'appellation de *Disk Operating System*. En d'autres termes c'était un D.O.S. Certaines des instructions et des caractéristiques fonctionnelles implémentées dans CP/M étaient directement dérivées de celles mises en œuvre sur les systèmes d'exploitation⁴⁶⁷ qui équipaient communément les mini-ordinateurs *Programmed Data Processor* de la *Digital Equipment Corporation*. On pourrait par exemple citer le principe consistant à désigner un périphérique d'enregistrement au moyen d'une lettre de l'alphabet (il est toujours en vigueur aujourd'hui), le fait de désigner les fichiers par des identifiants comportant un nom de base formé de 5 à 8 symboles alphanumériques, un caractère de séparation (en l'occurrence un simple point) et une extension de fichiers à trois caractères (il est également toujours employé à ce jour), ou bien encore la commande DIR (pour *DIRectory*), qui permettait d'accéder à la liste des fichiers contenus dans un répertoire (on la retrouve notamment sous MS-DOS). Les performances offertes par l'*Intellec-8* de Gary Kildall étaient certes limitées mais grâce au *Control Program/Monitor*, le Professeur de l'école navale et ses étudiants pouvaient désormais réaliser avec lui la plupart des opérations de base qui étaient effectuables sur une installation informatique normale. La manipulation des fichiers à partir ou en direction d'un support de stockage amovible n'était pas la moindre.

Pendant que Kildall et Torode s'ingéniaient à perfectionner l'interface matérielle et le logiciel interfaçant l'*Intellec-8* à son lecteur de disquettes, des dissensions commencèrent à se faire jour entre les deux hommes et la direction d'*Intel*. Si la naissance de cette compagnie avait eu lieu après deux actes de « trahison » ou de « révolution » entrepreneuriale retentissants – d'abord vis-à-vis du *Shockley Semiconductor Laboratory*, puis envers la *Fairchild Semiconductors* – ses fondateurs Robert Noyce et Gordon E. Moore tendaient à présent à afficher une attitude relativement conservatrice. Au grand dam de Kildall puisque ce dernier essuya des refus successifs lorsqu'il tenta de leur proposer plusieurs applications – dont un jeu qu'il avait programmé avec des ingénieurs d'*Intel* sur le *i4004* - pour les microprocesseurs de la marque. La vérité était que Noyce et Moore étaient convaincus que leurs microprocesseurs – tout au moins les premiers modèles qu'ils commercialisèrent –

⁴⁶⁷ Par exemple TOPS-10 ou OS/8.

n'avaient pas d'avenir dans le domaine de l'informatique. Selon Robert Noyce, leur futur était dans les applications de contrôle industriel et surtout, dans les montres électroniques. Cette ligne politique signifiait par conséquent qu'il n'y avait pas de place pour des programmes tels que des jeux ou des applications plus sérieuses, mais moins ciblées vers les exigences spécifiques des consommateurs typiques de microprocesseurs *i4004* ou *i8008*. Kildall ne s'offusqua pas de ces refus. Cependant, sa position se transforma radicalement lorsque sa présentation du *Control Program/Monitor* et son offre de le céder à la société *Intel* pour la somme de 20000 dollars furent également accueillies par un refus ferme et définitif. Le raisonnement – circulaire – que tinrent ici les responsables d'*Intel* était le suivant. Le CP/M avait été présenté comme un système d'exploitation pour les machines *Intellec*. Or ces instruments étaient par nature destinés à des ingénieurs et des chercheurs effectuant des travaux de développement. Le fait était que Kildall était parvenu à créer plusieurs programmes informatiques remarquables – au nombre desquels figurait évidemment le CP/M – sans jamais avoir eu à sa disposition un quelconque système d'exploitation. En conséquence, et puisque tous les utilisateurs de systèmes *Intellec* se trouvaient dans la même situation que lui, *Intel* ne se trouvait nullement dans l'obligation d'acquérir une application telle que le *Control Program/Monitor*. Ce rejet du CP/M par *Intel* à la fin de l'année 1974 conduisit Kildall à l'idée de le proposer à d'autres sociétés. A cette fin et avec l'aide de sa femme, il créa une nouvelle société qu'il baptisa *Intergalactic Digital Research Inc.* Elle serait chargée de l'ensemble des opérations administratives – c'est là un détail qui revêtit plus tard une importance capitale – tandis que lui réaliserait la programmation.

Le tout premier client de l'*Intergalactic Digital Research Inc.* fut la G.N.A.T. *Computers Corporation*, un petit fabricant américain d'ordinateurs. Comme il n'existait pas encore de modèle de référence pour fixer le prix d'une licence d'exploitation de logiciel, la G.N.A.T. *Computers Corporation* obtint le droit d'utiliser le système d'exploitation CP/M sur toutes ses machines (actuelles ou futures) pour un montant absolument dérisoire. La somme *totale* généralement mentionnée lorsqu'on évoque cette transaction est en effet de l'ordre de 90 dollars. Progressivement la nouvelle société des époux Kildall commença à se faire un nom dans le milieu de l'informatique et, surtout, de la micro-informatique. Au cours du dernier trimestre de l'année 1977, alors que CP/M ne cessait de gagner en notoriété, Gary Kildall décida de modifier le nom de son système d'exploitation afin qu'il puisse être identifié plus sûrement par les acheteurs du marché qu'il visait en priorité : celui de la micro-informatique. A partir de là il ne serait plus question de *Control Program/Monitor*. On parlerait désormais de *Control Program for Microcomputers* (programme de contrôle pour les

micro-ordinateurs). Comme on le voit l'acronyme sous lequel le système d'exploitation 8 bits inventé par Kildall était habituellement désigné ne fut en rien bouleversé par ce changement. D'un point de vue marchand, cela permettait de conserver intacte l'identité originale de CP/M. Au moment même où l'industrie de la micro-informatique commençait à exploser, cette tactique de marketing permit ainsi d'associer le logiciel CP/M à la notion même de micro-ordinateur. Tout comme Bill Gates et Steve Jobs, Gary Kildall avait parfaitement saisi l'importance de l'image qui pouvait être associée à une entreprise. Il avait également compris combien la perception de cette image par le public était susceptible d'influer (négativement ou positivement) sur les ventes des produits commercialisés par ladite entreprise. Il était donc fondamental que dans l'esprit des possesseurs de micro-ordinateurs, le sigle CP/M soit systématiquement associé à leur loisir et à leur machine fétiche. Kildall et sa femme ne s'arrêtèrent pas là. Toujours dans cette perspective, ils décidèrent de rebaptiser leur société en supprimant de son appellation le bien peu sérieux qualificatif « *Intergalactic* ». Elle devint alors la *Digital Research Incorporated* (D.R.I.).

C'est aussi en 1977 qu'intervint un des moments les plus décisifs de toute l'histoire de la *Digital Research Incorporated*. A cette époque, le système d'exploitation de Gary Kildall était déjà un programme reconnu par les informaticiens amateurs et les acteurs de l'industrie de la micro-informatique. S'il était un élément qui traduisait justement à la perfection la renommée grandissante du logiciel CP/M, c'était bien le montant que la D.R.I. demandait désormais pour l'acquisition de sa licence d'exploitation. A présent celle-ci se négociait à des montants cent fois supérieurs à celui versé deux ans auparavant par la G.N.A.T. *Computers Corporation*. C'est ce moment que choisit Seymour Rubenstein pour approcher Kildall et la *Digital Research Incorporated*. S. Rubenstein occupait le poste de directeur des ventes au sein de la firme de micro-ordinateurs *IMSAI Manufacturing Corporation*. IMSAI était le principal concurrent de M.I.T.S., la société qui commercialisait l'*Altair 8800*. La firme IMSAI connaissait fort bien le système d'exploitation CP/M puisqu'elle en achetait régulièrement des exemplaires à la D.R.I., pour ses IMSAI 8080. En 1977 cependant, IMSAI avait décidé de distancer durablement ses concurrents en introduisant sur le marché un IMSAI 8080 équipé d'un lecteur de disquettes et d'un contrôleur. En raison de la présence de cet équipement additionnel ce micro-ordinateur était donc censé convenir aussi bien aux usagers domestiques qu'aux utilisateurs professionnels. M.I.T.S. n'était pas en reste puisque depuis le début de l'année 1977, elle offrait elle aussi un *Altair 8800* pourvu d'un lecteur de disquettes. La machine bénéficiait d'un BASIC étendu – l'*Altair Disk Extended BASIC* – écrit par spécialistes de *Microsoft*. Cette version augmentée du langage

résidant de l'*Altair 8800* était capable de gérer les opérations de lecture et d'écriture sur disquettes, pour des programmes écrits en BASIC. Du point de vue des fonctionnalités qu'elle offrait concernant la manipulation de fichiers, elle était cependant très limitée. Aussi, la *Micro Instrumentation and Telemetry Systems* résolu-t-elle de se tourner vers un autre développeur pour la production d'un *Disk Operating System* digne de cette appellation. Quant le programme fut enfin prêt, il se révéla très décevant, tant sa fiabilité et ses performances laissaient vraiment à désirer.

La faiblesse momentanée de son principal concurrent représentait évidemment une opportunité industrielle formidable pour la société IMSAI. Prendre le dessus sur la M.I.T.S. était désormais chose possible, à condition toutefois de se garder de commettre le même type d'erreurs qu'elle. Aussi le système de gestion de disques devant être livré avec les IMSAI 8080 à lecteurs de disquettes devait-il être particulièrement fiable et rapide. Puisque le *Control Program for Microcomputers* de la *Digital Research Incorporated* paraissait remplir ces deux conditions sine qua non, les dirigeants d'IMSAI choisirent de faire appel à elle. Seymour Rubenstein entama les négociations avec les époux Kildall pour l'acquisition (non exclusive) d'une licence d'exploitation de CP/M. Les deux parties finirent pas se mettre d'accord sur un montant de 25000 dollars. Une nouvelle fois c'était dérisoire et Rubenstein eut le sentiment d'avoir fait une excellente affaire. Mais la naïveté de ceux avec lesquels il avait traité n'était que de surface. La stratégie adoptée ici par Kildall et sa femme visait moins à réaliser une opération financière immédiatement avantageuse qu'à profiter de la très large base de consommateurs constituée par les clients de la société IMSAI. Ce que les époux Kildall souhaitaient réellement, en acceptant de brader de cette façon le programme CP/M, c'était réussir à associer organiquement ce dernier à la marque IMSAI. Par ce moyen pensaient-ils, la *Digital Research Incorporated* pourrait acquérir la meilleure des réputations. De fait cette stratégie se révéla extrêmement payante. Le fait qu'un constructeur de l'envergure d'*IMSAI Manufacturing Corporation* se soit prononcé en faveur du CP/M pour équiper les dernières évolutions de ses instruments informatiques garantissait à lui seul l'excellence de ce logiciel et la perspective qu'il avait de fortes chances de devenir sous peu un standard de l'industrie micro-informatique. Très vite, donc, d'autres fabricants d'ordinateurs souhaitèrent en doter leurs machines et ce faisant, ils contribuèrent à entretenir et accroître la réaction que Gary Kildall et sa femme avaient ingénieusement amorcée.

A la fin des années soixante-dix, *Intel* n'était plus le seul fabricant de microprocesseurs sur le marché américain. Des compagnies quelquefois fondées par des pionniers des semi-conducteurs ou d'anciens membres de leurs équipes – on pourra ainsi

penser à Federico Faggin, le concepteur de l'*Intel* i4004 qui créa la société *Zilog* et la fameuse puce Z-80 – avaient vu le jour et proposaient des microprocesseurs souvent capables de rivaliser en performances avec les puces *Intel*. Quant aux fabricants de cartes d'extension, de bus S-100 ou de mémoires informatiques, leur nombre n'avait cessé de grossir. Cette multiplication, assortie à la diversification croissante des composants informatiques, faisait que les micro-ordinateurs – eux aussi de plus en plus nombreux – étaient souvent composés d'éléments différents. Avec cette conséquence inévitable: pour chaque modèle et configuration d'ordinateur considérés, il était nécessaire de concevoir une variante spécifique du *Control Program for Microcomputers*. Pour résoudre ce problème, Gary Kildall eut une idée lumineuse. Il partit du principe qu'il existait dans CP/M des séquences de code qui demeuraient invariablement les mêmes, et cela quel que soit l'ordinateur sur lequel le système d'exploitation était installé (pour le dire autrement, ces séquences étaient parfaitement indépendantes des éléments *hardware* composant cet ordinateur). A l'inverse, il existait d'autres séquences du programme CP/M qui devaient systématiquement être révisées afin que celui-ci puisse devenir opérationnel sur tel ou tel type de machine (ces dernières étaient donc étroitement dépendantes du matériel cible). Après avoir procédé au repérage de tous les éléments de code qui exigeaient impérativement une telle refonte, Kildall les constitua en ensemble et les désolidarisa de ceux qui n'en avaient pas besoin. L'ensemble logiciel minimal ainsi isolé fut ensuite rendu aisément accessible et paramétrable (tandis que le reste du programme demeurait bien entendu protégé et opaque). Grâce à cette opération qui visait à rendre le *Control Program for Microcomputers* aussi peu dépendant du matériel qu'il était possible de le faire, la *Digital Research Inc.* put se contenter de commercialiser une seule et unique version de son système d'exploitation. Il appartenait alors à tous ceux qui l'achetaient – qu'ils soient simples particuliers ou fabricants d'ordinateurs – de le paramétrer en fonction de leur équipement et de leurs besoins particuliers, via la couche logicielle spéciale créée par Gary Kildall. Ce module chargé en mémoire vive au moment de la phase d'amorçage (*boot*) de l'ordinateur reçut le nom de *Basic Input/Output System*⁴⁶⁸.

La présence d'un B.I.O.S. dans le CP/M permit à la *Digital Research Inc.* de proposer son système d'exploitation à un nombre toujours plus important de constructeurs de micro-ordinateurs 8 bits. La plupart des machines qui comptèrent à la fin de la décennie 70 et au début des années 80 furent équipées d'un CP/M. Il serait difficile de mentionner tous ces micro-ordinateurs ici mais pour donner une idée précise de la puissance qui était celle de la

⁴⁶⁸ On parle également de *Basic Integrated Operating System*.

D.R.I. à cette époque, on citera les plus significatives, c'est-à-dire celles qui se vendirent le mieux. Outre l'IMSAI 8080, il y eut l'*Altair 8800*, l'*Osborne 1* (le tout premier ordinateur portable), les *Commodore 64* et 128, le D.E.C. V.T.180, les *Amstrad C.P.C. 464*, P.C.W. 8256, 8512 et 9512, l'*Atari ST*, les systèmes répondant au standard MSX, le *ZX Spectrum 3+*, les *Tandy TRS 80 Model II, IV et IVP*, et l'I.B.M. *Model 5150 Personal Computer*. Pour résumer et d'après les estimations courantes faites pour les années 1980-81, ce sont près de 500000 ordinateurs 8 bits qui étaient pourvus d'un système d'exploitation CP/M (ce qui représentait environ 3000 configurations différentes).

Dans cette liste d'ordinateurs, on aura peut-être remarqué une absence flagrante. En effet aucun ordinateur de marque *Apple Computer* ne s'y trouve mentionné. C'est là une chose pour le moins étonnante puisqu'à la toute fin des années 70, le micro-ordinateur le plus vendu dans le monde entier était justement un système fabriqué par cette firme : l'*Apple II*. Or avec tous les autres systèmes produits par cette marque, l'*Apple II* était un des très rares micro-ordinateurs sur lesquels CP/M ne fonctionnait pas encore. Ce n'est pas la *Digital Research Inc.* mais *Microsoft* qui changea cet état de fait. Entrepreneur redoutable, Bill Gates avait compris tout le bénéfice que son entreprise pourrait tirer de l'existence de cette faille. Comme le *Control Program for Microcomputers* était certainement le système d'exploitation le plus employé dans le monde⁴⁶⁹, un nombre incalculable d'applications et d'utilitaires informatiques avait déjà été programmé pour lui. Il va évidemment de soi que tous ces logiciels nécessitaient la présence du système d'exploitation de la *Digital Research Inc.* pour pouvoir fonctionner. Or les possesseurs d'*Apple II* ne pouvaient pas les utiliser puisque aucune version de l'O.S. CP/M n'avait été développée pour fonctionner spécifiquement sur leur machine. D'où le raisonnement du Président de *Microsoft*: si un moyen technique pouvait être imaginé pour le leur rendre accessible, alors, étant donné la taille du parc mondial d'*Apple II* et l'attrait irrésistible que ne manquerait certainement pas d'exercer l'extrême richesse de la programmathèque CP/M sur les très nombreux propriétaires de ces micro-ordinateurs, cela représenterait une source de revenus formidable pour l'entreprise de *Seattle*.

Les ingénieurs de *Microsoft* mirent finalement au point une solution matérielle qui permettait de faire cela de manière indirecte. Premier bien informatique matériel conçu par *Microsoft*, la *Z-80 SoftCard* était une carte d'extension qui intégrait un microprocesseur *Zilog Z-80*. Pour fonctionner celle-ci devait être enfichée dans un des ports de la carte mère de l'*Apple II*. Une fois cette connexion physique réalisée le micro-ordinateur pouvait être

⁴⁶⁹ Dans le secteur de l'industrie micro-informatique s'entend.

employé en mode normal – et dans ce cas c'était le microprocesseur M.O.S. 6502 de l'*Apple II* qui prenait en charge toutes les opérations de calcul – ou en mode secondaire (Z-80). Dans ce second cas la *SoftCard* plaçait le C.P.U. 6502 de l'*Apple II* en état de « demi sommeil » et son microprocesseur Z-80 se voyait activé⁴⁷⁰. Une disquette de démarrage système comportant la version 2.2. du CP/M, mais aussi deux versions de l'interpréteur BASIC de *Microsoft*, était systématiquement fournie avec la *SoftCard*. L'utilisateur devait insérer celle-ci dans un des deux lecteurs de l'*Apple II* puis redémarrer son micro-ordinateur afin de pouvoir basculer en mode CP/M. A partir de ce moment, et puisqu'à l'inverse du M.O.S. 6502 le microprocesseur *Zilog Z-80* était entièrement compatible avec le système d'exploitation CP/M, ce dernier avait la possibilité de faire tourner sur sa machine tous les programmes développés dans cet environnement. Bien entendu il pouvait également créer de nouvelles applications sous CP/M.

Introduite dans le courant du mois de mars 1980 et vendue aux alentours de 300 dollars avec une version du système d'exploitation CP/M – chose qui supposait bien entendu que des licences d'exploitation soient acquises au préalable auprès de la *Digital Research Inc.* - la *Microsoft Z-80 SoftCard* fut un formidable succès commercial. *Microsoft* vendit ainsi 5000 cartes périphériques Z-80 au cours des trois premiers mois qui suivirent la mise sur le marché de ce produit. Au total ce sont environ 200000 exemplaires de *SoftCard* que l'entreprise de Bill Gates écoula. De fait la perspective de pouvoir se servir d'applications « tueuses » telles que le traitement de texte *WordStar*, le système de gestion de base de données *DBase*, ou bien encore de langages de programmation comme les COBOL et FORTRAN de *Microsoft* eut tôt fait de convaincre des dizaines de milliers de possesseurs d'*Apple II* d'investir quelques centaines de dollars dans une *SoftCard*. Cette réussite, et aussi le partenariat industriel initié entre la *Digital Research Inc.* et *Microsoft*, entraînèrent plusieurs conséquences – heureuses ou malheureuses, c'est selon - pour les deux sociétés. Tout d'abord en raison de l'importance du volume de ses achats de licences d'exploitation CP/M, *Microsoft* devint pendant quelque temps le plus gros client de la *Digital Research Inc.* Ensuite, pendant les années 1980-1981, la *SoftCard* fut la première source de revenus financiers de *Microsoft*. Il est intéressant de savoir que cette entreprise spécialisée dans la conception et la vente de programmes réalisa à ses débuts de très importants bénéfices en commercialisant du matériel informatique destiné au micro-ordinateur *Apple II*. En effet après qu'elle eut introduit son système d'exploitation à interface graphique multifenêtré *MacOS*

⁴⁷⁰ Dépourvue de toute puce mémoire, la *SoftCard* devait exploiter celle de son micro-ordinateur hôte.

avec le *Macintosh* (en janvier 1984), la société de Steve Jobs et Paul Allen devint l'un des plus féroces concurrents de *Microsoft* sur le terrain de l'édition de logiciels. Enfin, à la suite semble-t-il d'un malentendu, l'existence d'accords commerciaux sur les licences CP/M entre la firme de Bill Gates et celle de Gary Kildall valut indirectement à cette dernière de perdre l'un des marchés financiers les plus extraordinaires de toute l'histoire de la micro-informatique. Le grand bénéficiaire de cette opération qui devait conférer à l'industrie micro-informatique la physionomie que nous lui connaissons encore à ce jour – et conduire la *Digital Research Inc.* à plonger lentement mais sûrement dans ses limbes - fut la *Microsoft Corporation*. Le marché dont il est question ici était celui du futur système d'exploitation de l'I.B.M. *Model 5150 Personal Computer*. En d'autres termes, il s'agissait de l'O.S. destiné à opérer sur le premier P.C. de l'histoire.

Cet épisode mémorable de l'histoire de la micro-informatique a déjà été raconté maintes fois. Comme souvent lorsqu'il s'agit de faits revêtant un caractère à ce point crucial, ses narrateurs, selon le « bord » et l'optique qui étaient les leurs à l'époque, ont eu quelque peu tendance à lui faire subir des déformations. Aussi la vérité concernant le déroulement et les circonstances exacts de ces événements ne peut-elle être absolument garantie. Dans ce qui suit et à fin d'analyse, nous présentons les deux versions les plus souvent relatées de cette histoire. Elles sont aussi les plus plausibles. Dans le courant de l'année 1980, I.B.M. se mit à la recherche d'une entreprise extérieure oeuvrant dans le secteur de la création de logiciels afin de lui confier la sous-traitance de la programmation du système d'exploitation de l'ordinateur domestique qu'elle s'apprêtait à introduire sur le marché, l'année suivante. En raison de sa diffusion massive, de son faible coût, de sa compatibilité avec les microprocesseurs 8 bits *Intel* et *Zilog*, de l'étendue de sa logithèque et de son extrême popularité auprès des possesseurs de micro-ordinateurs, le *Control Program for Microcomputers* constituait alors le standard de facto de l'industrie micro-informatique en matière d'O.S. Pour le géant de New York, le système d'exploitation de la *Digital Research Inc.* paraissait donc constituer le meilleur des choix envisageables. La direction d'I.B.M. était alors en pourparlers avec Bill Gates et Paul Allen pour la fourniture des langages de programmation devant équiper le futur P.C. Le géant de l'informatique savait que la société *Microsoft* travaillait avec la *Digital Research Inc.* et qu'elle commercialisait le système d'exploitation CP/M. Aussi demanda-t-il à Gates si sa société pourrait lui fournir ce programme. Après avoir expliqué aux représentants de la multinationale que si *Microsoft* était effectivement distributrice du système d'exploitation CP/M, c'était la D.R.I. qui en détenait les droits, le jeune patron accepta de mettre en relation les deux compagnies l'une avec l'autre. Gates téléphona alors

immédiatement à Gary Kildall et après avoir insisté sur l'importance du client industriel au nom duquel il appelait, il passa le combiné téléphonique à l'un des négociateurs d'I.B.M. Gary Kildall et ce dernier se mirent aussitôt d'accord et la date d'un rendez-vous pu être arrêtée. C'est à partir de ce point que les récits commencent à diverger concernant la manière dont les négociations entre I.B.M. et la D.R.I. se déroulèrent véritablement...

D'une part certains affirment que des représentants d'I.B.M. rendirent visite à l'improviste à Gary Kildall et son épouse pour leur proposer un partenariat industriel. Lorsqu'ils arrivèrent dans les locaux de la *Digital Corporation Inc.*, le créateur du CP/M n'était pas là. Il s'était soi-disant absenté pour affaires⁴⁷¹. Toutefois sa présence n'était pas réellement requise puisque comme nous l'avons dit, c'était sa femme Dorothy qui se chargeait des affaires administratives, et, éventuellement, des tractations préliminaires avec les industriels désireux d'acheter le système d'exploitation. Les pourparlers débutèrent néanmoins sous de fort mauvais auspices. Le micro-ordinateur *Model 5150 Personal Computer* était un projet secret qu'I.B.M. conduisait sous le nom de code *Acorn* au sein d'un comité spécial nommé *Chess. Big Blue* exigeait donc systématiquement que les firmes pressenties pour y prendre part acceptent de signer une clause de non divulgation. Celle-ci leur interdisait notamment de révéler quoi que ce soit à propos de la future machine⁴⁷². Dorothy Kildall et le conseiller juridique de la *Digital Research Inc.* commencèrent par juger cette requête parfaitement inacceptable. En toute logique, la codirectrice de la D.R.I. refusa ensuite d'apposer son paraphe sur les documents qui la validaient. Or l'exécution de cet acte représentait la condition *sine qua non* pour que des discussions véritablement sérieuses puissent être entamées entre I.B.M. et ses partenaires potentiels. En conséquence et à partir de ce moment, les négociations furent partiellement bloquées. Seules les choses ne tombant pas sous le coup de la confidentialité pouvaient en effet se voir évoquées par les deux parties. Quoiqu'il en soit, le préaccord commercial que les délégués d'I.B.M. présentèrent ensuite à l'épouse de Gary Kildall afin de convenir d'un éventuel achat de licence CP/M reçut le même accueil défavorable que la demande de signature de clause de confidentialité dont il vient d'être question. Une nouvelle fois, Dorothy Kildall exclut de viser ce qu'elle considérait être un document commercial par trop restrictif. Selon certains récits auxquels le professionnalisme légendaire des personnels d'I.B.M. nous incite cependant à ne prêter que peu de foi, les représentants du géant de l'informatique, offusqués par ce comportement à la

⁴⁷¹ D'aucuns – dont Bill Gates lui-même – prétendent que Gary Kildall ne s'était pas absenté pour affaires mais qu'il était parti piloter son monomoteur au moment où les représentant d'I.B.M. arrivèrent au siège de la D.R.I. De son vivant, G. Kildall a toujours affirmé que cette version de l'histoire était totalement inexacte.

⁴⁷² *Microsoft* avait bien entendu signé ce *Non Disclosure Agreement*.

fois désinvolte et défiant, quittèrent la table des négociations et cessèrent tout contact avec la *Digital Research Inc.* A partir de là ils tournèrent leur attention vers la société *Microsoft*. Ses liens commerciaux privilégiés avec la D.R.I., son excellente connaissance du système d'exploitation CP/M, et le fait qu'elle avait déjà confié à *Microsoft* le développement de l'interpréteur BASIC de son futur ordinateur domestique - sans que ses dirigeants n'aient jamais trouvé quoi que ce soit à redire sur les clauses de confidentialité draconiennes que cela les obligeait à respecter - faisaient évidemment de l'entreprise de Bill Gates et Paul Allen un partenaire d'affaires plus qu'intéressant pour la compagnie I.B.M.

Une deuxième version de cette histoire – largement plus plausible celle-là – existe. Gary Kildall était effectivement absent lorsque les mandataires d'I.B.M. se présentèrent au siège de la D.R.I. mais il le rejoignit alors que les négociations n'avaient pas encore pris fin. A l'inverse de ce qu'avait fait sa femme, il accepta de signer la clause de confidentialité imposée par I.B.M., ce qui lui permit de prendre connaissance des plans du constructeur américain. Les difficultés commencèrent à se faire jour lorsque les interlocuteurs abordèrent la question des modalités d'acquisition des droits du *Control Program for Microcomputers*. D'une part, à la façon de ce qu'avait réussi à faire la société IMSAI en 1977 – certes avec le complet « cautionnement » des époux Kildall - I.B.M. voulait que la D.R.I. abandonne le principe de la redevance de 10 dollars perçue sur la vente de chaque exemplaire de CP/M, au profit d'une acquisition globale des droits d'exploitation de l'*Operating System*. D'après le témoignage de Gary Kildall la somme proposée ici par l'industriel s'élevait à 250000 dollars, ce qui, avec le recul, ne peut manquer d'apparaître très faible. Or I.B.M. n'était pas IMSAI, et la *Digital Research Inc.* de 1980 était une entreprise beaucoup plus puissante et populaire que trois ans auparavant. Même si elle devait bien évidemment continuer à œuvrer pour assurer la continuité de son développement industriel et renforcer sa position sur le marché, la *Digital Research Inc.* était désormais une entreprise installée. Elle se trouvait dans une certaine mesure en position de force et pouvait se permettre de ne pas accepter immédiatement n'importe quelle offre marchande, quand bien même celle-ci aurait émané du plus grand constructeur d'ordinateurs de la planète. De plus il est évident que si des dispositions particulièrement arrangeantes avait été prises en faveur d'I.B.M., les autres clients de la *Digital Research Inc.* auraient été en droit de protester auprès de leur éditeur de logiciels. La posture de la D.R.I. serait alors devenue très incertaine...Une autre exigence notable et inadmissible formulée par I.B.M. était la suivante : les dirigeants de la D.R.I. devaient accepter de lever le voile sur certains des secrets de conception du *Control Program for Microcomputers*. A l'inverse, et sous peine d'avoir à tenter une action en justice à son

encontre, *Big Blue* demandait à ce que la société de Gary Kildall s'engage contractuellement à ne jamais rien dire du futur ordinateur personnel *Model 5150*. La D.R.I. devait aussi renoncer à poursuivre la compagnie I.B.M. pour le cas où celle-ci viendrait à faire usage de données confidentielles acquise dans le cadre de sa collaboration avec elle. Ajouté à la demande d'abandon des royalties sur les ventes d'exemplaires du CP/M, cela commençait à faire beaucoup de concessions. Mais le caractère inacceptable de certains aspects de la proposition de contrat d'I.B.M. n'était pas la seule chose qui retenait ici les époux Kildall de signer quoi que ce soit avec ses représentants.

I.B.M. était un groupe industriel proprement gigantesque dont la culture informatique s'était construite pendant plus de 30 ans au sein de l'univers du mainframe. La rigidité organisationnelle de cette entreprise, sa raideur procédurale, et le caractère particulièrement strict de la politique commerciale qu'elle s'était appliquée à mettre en œuvre des décennies durant faisaient que les époux Kildall, à l'instar de beaucoup d'autres, tendaient à douter de sa capacité réelle à concevoir et à commercialiser une machine telle qu'un micro-ordinateur. Quelle qu'ait pu être par ailleurs l'étendue de sa puissance financière et industrielle, I.B.M. et sa philosophie, son obsession du contrôle, représentaient fondamentalement l'antithèse de ce que pouvait être la micro-informatique. En effet comment imaginer qu'une firme qui avait toujours interdit à ses clients de réaliser eux-mêmes la maintenance des ordinateurs qu'elle leur louait pouvait-elle du jour au lendemain envisager d'introduire sur le marché une petite machine informatique destinée à être vendue à des particuliers ? Comment concevoir encore qu'elle puisse tolérer la perspective de voir des personnes férues de micro-informatique et d'électronique déconstruire des machines qui ne lui appartenaient plus afin de les comprendre et éventuellement de les modifier ? On pourrait sans difficulté multiplier les exemples démontrant que la société I.B.M., en raison de tout ce qu'elle était, faisait et avait fait, incarnait littéralement le contraire de l'esprit qui avait donné naissance à la micro-informatique et de l'idéologie qui avait accompagné ses premières phases de développement. Dans ces conditions il était légitime que les dirigeants de la *Digital Research Inc.* émettent quelques réserves quant à la capacité véritable d'I.B.M. à opérer avec succès un changement de cap technologique et philosophique aussi brusque et radical. Les exigences contractuelles inacceptables contenues dans la proposition d'I.B.M. et les doutes tout à fait compréhensibles que nourrissaient les époux Kildall vis-à-vis des possibilités de réussite du projet *Acorn* ne conduisirent pas pour autant à la cessation des discussions entre le géant industriel et la D.R.I. Personne ne partit en claquant la porte et les deux parties convinrent de se rencontrer à nouveau. Avec le temps Gary et Dorothy Kildall espéraient en effet parvenir à convaincre

I.B.M. d'accepter un contrat comportant des termes plus avantageux pour leur société. Or malheureusement pour ces derniers, le temps était précisément ce qui faisait défaut à I.B.M.

L'inconfort certain dans lequel l'avaient placé les hésitations des responsables de la *Digital Research Inc.* amena immédiatement le géant de l'informatique à jouer la carte de la sécurité, c'est-à-dire à prendre contact avec d'autres entreprises de conception de logiciels pour leur proposer de prendre en charge la réalisation du système d'exploitation de son *Personal Computer*. On peut aisément rendre compte de cette attitude par le biais de laquelle I.B.M., finalement, commença à caresser l'idée de renoncer à utiliser le système d'exploitation le plus populaire de l'époque pour équiper son P.C. En effet – et la remarque suivante demeure toujours d'actualité - s'il était toujours possible de différer la livraison d'une quelconque application informatique, il était en revanche totalement inenvisageable de songer à commercialiser un ordinateur dépourvu de système d'exploitation. Or I.B.M. ne pouvait pas se permettre de retarder son entrée en lice dans l'industrie de la micro-informatique. Jusqu'à la fin des années 70, le géant s'était-il est vrai contenté d'observer le phénomène micro-informatique de manière plutôt distanciée. Peu enclin à se hasarder dans ce secteur industriel émergent⁴⁷³, le géant de l'informatique s'était ainsi borné à le considérer tout au plus comme un loisir de hacker ou d'amateur de systèmes électroniques plus ou moins utiles.

Sur les plans industriel et culturel l'univers du mainframe – qui par tradition et excellence était celui d'I.B.M. - s'était toujours distingué par son caractère foncièrement monolithique. L'irruption des mini-ordinateurs, au début des années 60, avait certes contribué à modifier le paysage informatique mais dans l'ensemble et malgré quelques ratés notoires – par exemple le *time-sharing* - les choses avaient peu évolué pour la compagnie I.B.M. Mobilisant sa formidable puissance pour refaire son retard technologique lorsque cela s'avérait nécessaire, elle n'avait jamais été inquiétée et était toujours parvenue à conserver son rang le numéro un mondial de l'informatique. Mais la micro-informatique commençait à bouleverser cet état de faits. Dans ce nouvel univers situé aux antipodes du monde conservateur du mainframe, les choses évoluaient à une vitesse incroyablement élevée. Les firmes d'équipements et/ou de logiciels apparaissaient comme des champignons et

⁴⁷³ I.B.M. avait certes réalisé deux timides incursions dans le monde des micro-ordinateurs avec le « portable » *Model 5100*, en 1975, et *Desktop Computer Model 5120*, en 1980. Mais seules leurs dimensions étaient susceptibles de faire passer ces systèmes pour des micro-ordinateurs. Tous deux avaient en effet été conçus et fabriqués en respectant les protocoles employés pour le design et la production des mainframes – l'O.S. de l'I.B.M. 5100 était d'ailleurs le même que celui des ordinateurs de la famille *System/370* – et leur coût – entre 8000 et 13000 dollars – les plaçaient de toute façon bien au-delà des possibilités financières habituelles des micro-informaticiens.

disparaissaient parfois tout aussi vite tandis que le marché des micro-ordinateurs, avec ses règles, son rythme, ses standards et son inventivité propres, ne cessait de voir sa taille augmenter de manière quasi exponentielle. L'ampleur prise par le phénomène à la fin des années 70 était telle que la société I.B.M. n'eut désormais plus le choix : il lui fallait impérativement apposer son empreinte sur ce territoire informatique auquel elle était complètement étrangère, sous peine de voir un autre industriel – l'*Apple Computer Company* par exemple - le faire à sa place. Or certains chez I.B.M. avaient commencé à prendre conscience du fait que ce nouvel espace serait peut-être celui où une partie (au moins) de l'avenir de l'industrie informatique se jouerait. Il fallait donc s'efforcer d'être présent tout de suite, et, quitte à s'investir, tenter de faire en sorte que le coup d'essai devienne aussi un coup de maître. Fait sans précédent dans les annales de cette compagnie réputée pour son ultra conservatisme, la direction d'I.B.M. accepta de délaissier ici ses inflexibles protocoles de développement et de production au profit de méthodes de création industrielle réellement adaptées à l'objectif inédit qu'elle s'était assignée, à savoir construire un micro-ordinateur dans des délais extrêmement brefs. Pénétrer le marché des micro-ordinateurs exigeait en effet que l'on fasse preuve d'*adaptation* et de *réactivité*, autrement dit que l'on adopte les attitudes et les modes opératoires spécifiques à ce secteur. Compte tenu des changements qu'il lui avait fallu accepter, il était donc évident que la direction d'I.B.M. ne désirait pas attendre plus que nécessaire pour introduire le P.C. *Model 5150* dans le commerce. Or l'obtention d'un système d'exploitation fiable et performant pour cette machine était l'un des principaux facteurs qui conditionnaient le moment où cette introduction pourrait effectivement avoir lieu.

Il est absolument indispensable de préciser à ce point que si les spécialistes de la *Digital Research Inc.* avaient déjà commencé à élaborer une version 16 bits de CP/M, Gary Kildall était loin de considérer le développement de ce programme comme un projet prioritaire pour son entreprise. L'adoption de cette posture, et aussi le fait que Kildall ne s'était pas montré enclin à répondre tout de suite de manière favorable à son offre, incita la compagnie I.B.M. à entrer en relation avec d'autres éditeurs de logiciels. Parmi les différentes entreprises susceptibles de développer un *Operating System* pour le compte d'I.B.M. figurait bien évidemment en première position la société à laquelle avait déjà été confiée la programmation de l'interpréteur BASIC du micro-ordinateur 5150, c'est-à-dire *Microsoft*. Ainsi qu'il est aisé de l'imaginer, les dirigeants de *Microsoft* saisirent à bras le corps l'opportunité qui leur était offerte d'entrer à nouveau en affaires avec le numéro un mondial de l'informatique. Avant toute chose il s'agissait pour eux d'une occasion inespérée de prendre un ascendant majeur sur la *Digital Research Inc.* Car si *Microsoft* était le plus gros

client de la D.R.I. – à cause des disquettes CP/M commercialisées avec les *SoftCards* - l'entreprise dirigée par Gary Kildall était également devenu son principal concurrent. Au cours des années 1975-78, les deux éditeurs de programmes américains s'étaient ainsi tacitement entendus pour se partager le marché des logiciels de micro-informatique. Tandis que la D.R.I. régnait sur le secteur des systèmes d'exploitation, grâce au CP/M, l'entreprise *Microsoft*, elle, dominait celui des langages de programmation (avec le BASIC, mais aussi le COBOL et le Pascal). Mais en 1979 cet équilibre commença à se rompre. En effet, à compter de cette date, la D.R.I. se mit elle aussi à proposer des langages de programmation. Evidemment les responsables de *Microsoft* interprétèrent ce geste à la manière d'une déclaration de guerre. Leur contre-offensive – s'il est permis ici de filer encore un peu la métaphore martiale - ne fut pas longue à venir. Au mois de février 1980, la firme de Seattle acheta ainsi au groupe *AT&T* une licence pour la version 7 du système d'exploitation UNIX. Partant alors de cette plateforme existante, les programmeurs de *Microsoft* commencèrent à développer XENIX, un UNIX estampillé *Microsoft* qui possédait la particularité d'être adapté aux tout nouveaux microprocesseurs 16 bits *Zilog* et *Intel*. Désormais les choses étaient claires : en dépit de leurs accords commerciaux, les deux entreprises chassaient ouvertement sur leurs territoires respectifs. Les choses prirent une tournure encore plus marquée lorsqu'une rumeur fit état du fait que la *Digital Research Inc.* s'appêtait à acheter un BASIC – qui bien entendu n'était pas celui de *Microsoft* - afin de l'inclure dans la prochaine version de CP/M. Si de 1978 à début 1980 les deux adversaires avaient su faire montre d'une certaine retenue dans leurs assauts, à présent c'en était réellement terminé. Les prochains coups portés seraient et devraient assurément être fatals. Comme tout un chacun le sait, c'est Gates qui frappa le premier.

Avant de démarrer effectivement son projet de micro-ordinateur, I.B.M. avait réalisé plusieurs études de marché qui toutes avaient abouti aux mêmes conclusions. Afin de répondre adéquatement aux attentes des micro-informaticiens, le *Personal Computer* devrait être équipé d'un microprocesseur 8 bits, du système d'exploitation CP/M de la *Digital Research Inc.* et du BASIC de *Microsoft*. Durant l'année 1980, les responsables d'I.B.M. et de *Microsoft* se rencontrèrent à deux reprises. C'est au cours de ces réunions que Bill Gates prit connaissance du fait que les ingénieurs d'I.B.M. avaient prévu de doter leur micro-ordinateur d'un microprocesseur 8 bits. Avec l'enthousiasme que lui conférait sa jeunesse, le jeune président de *Microsoft* s'évertua à convaincre les représentants de la multinationale qu'ils auraient tout à gagner à équiper leur nouvelle machine d'un microprocesseur 16 bits. Bill Gates fit valoir plusieurs arguments pour tenter de convaincre ses interlocuteurs de la

nécessité d'abandonner l'idée d'architecturer leur micro-ordinateur autour de microprocesseurs 8 bits. Le cœur de sa démonstration reposait sur le fait que les microprocesseurs 16 bits qu'*Intel* avait commencé à introduire dans les années 78-79 affichaient des performances largement supérieures à celles de leurs prédécesseurs et donc qu'ils laissaient entrevoir des perspectives extraordinaires en matière d'applications informatiques. Or *Microsoft* avait su accompagner cette montée en puissance. La compagnie s'apprêtait à introduire un BASIC 16 bits et elle entendait bien continuer sur sa lancée, soit en adaptant ses logiciels existants aux caractéristiques de ces puces, soit en en concevant de nouveaux pour tirer parti de leur puissance. Le message était clair : si I.B.M. prenait la décision d'abandonner les puces 8 bits au profit des processeurs 16 bits, *Microsoft* se trouverait tout de suite en mesure de lui fournir des logiciels parfaitement compatibles. Au moment de leur sortie, les microprocesseurs 16 bits étaient coûteux mais l'arrivée de nouvelles variantes de l'*i8086* – comme l'*i8088* qui était certes un peu moins performant que l'*i8086* mais qui était aussi beaucoup moins cher que celui-ci - permettait désormais d'envisager qu'on les emploie sur un micro-ordinateur produit à l'échelle industrielle. Les différents arguments qu'avança ici Bill Gates finirent par convaincre les hauts responsables d'I.B.M. Le *Personal Computer* recevrait donc des microprocesseurs opérant sur 16 bits.

Efforçons-nous maintenant d'apprécier les deux principales conséquences qu'entraîna cette décision d'ordre technique. Tout d'abord, en persuadant les décideurs d'I.B.M. de renoncer à l'emploi de microprocesseurs 8 bits et en leur démontrant que *Microsoft* était le seul éditeur de logiciels en mesure de leur fournir tout de suite des programmes interprétables par des puces 16 bits, Gates réussit à positionner son entreprise comme un interlocuteur commercial incontournable. Ensuite, en faisant cela, il parvint également à porter un coup mortel à la *Digital Research Inc.* Ainsi que nous l'avons dit, en 1980, il n'existait pas de version 16 bits opérationnelle du *Control Program for Microcomputers*. Même si un tel projet avait vu le jour à la D.R.I., Gary Kildall ne semblait pas particulièrement pressé de le voir terminé. Pour ce qui était de l'attribution du marché du système d'exploitation de l'I.B.M. P.C., la D.R.I. se trouvait donc totalement réduite à l'impuissance. Par ailleurs, la totalité des logiciels développés sous et pour CP/M, parce qu'ils avaient été pensés pour opérer dans un environnement 8 bits, ne pourraient pas être utilisés avec le *Personal Computer* d'I.B.M. A supposer que le micro-ordinateur d'I.B.M. se vende de manière satisfaisante - une chose que sa puissance de traitement et la richesse de sa (future) programmable *Microsoft* paraissent a priori rendre possible - alors la D.R.I. se trouverait durablement, voire définitivement mise sur la touche

Lorsque I.B.M. confia officiellement à *Microsoft* la réalisation de ses logiciels système – le contrat scellant l'accord entre les deux firmes fut signé le 6 novembre 1980 – l'entreprise de Bill Gates et de Paul Allen ne disposait d'aucun système d'exploitation opérationnel, et encore moins d'un système d'exploitation qui soit compatible avec le microprocesseur 16 bits *Intel i8088* qui devait équiper l'I.B.M. 5150. La situation était donc pour le moins délicate. I.B.M. n'était pas M.I.T.S. et un retard significatif, voire un échec, seraient susceptibles ici de coûter extrêmement cher à *Microsoft*. C'est alors que le nom de Tim Paterson revint à l'esprit de Paul Allen. Agé de 24 ans, Tim Paterson exerçait la profession de programmeur au sein de la *Seattle Computer Products* (S.C.P.) une petite société basée à Seattle qui s'était spécialisée dans la production de biens informatiques logiciels et matériels. Au mois de novembre 1978 la S.C.P. avait commercialisé un kit d'ordinateur basé sur le microprocesseur 16 bits *i8086* d'*Intel*. Hélas l'absence d'un système d'exploitation pour ce micro-ordinateur à assembler – rappelons une nouvelle fois qu'en 1980 il n'existait pas encore de version 16 bits de CP/M - avait sérieusement contribué à freiner ses ventes auprès des amateurs de micro-ordinateurs. Afin de tenter d'endiguer puis d'inverser ce processus de mévente, la S.C.P. décida d'élaborer en interne le logiciel qui lui faisait si cruellement défaut. Entièrement conçu en assembleur *i8086*, celui-ci fut développé en 4 mois à peine par Tim Paterson. La S.C.P. donna à cette première version (la 0.10) de son système d'exploitation 16 bits l'appellation de SCP-DOS. Dans l'entreprise ce logiciel système était également connu sous le nom (fort à propos) de QDOS - pour *Quick and Dirty Operating System*⁴⁷⁴. Sans pour autant l'égaliser ni reprendre à son compte l'intégralité de ses caractéristiques techniques, QDOS 0.10 s'inspirait de façon si flagrante de CP/M qu'on a souvent affirmé de lui qu'il n'était qu'un clone de l'O.S. de la *Digital Research Inc*. Au mois d'août 1980 la *Seattle Computer Products* commença à vendre ses ensembles prêts-à-monter à base de microprocesseur *i8086* avec le QDOS. Cette première version commerciale de l'*Operating System* de la S.C.P. fut baptisée 86-DOS. Comme prévu la disponibilité de ce logiciel permit de relancer aussitôt les ventes des kits de la petite société de matériel informatique. Dans le but d'entretenir et d'amplifier cette tendance, la *Seattle Computer Products* se rapprocha de *Microsoft* en septembre ou octobre 1980. Il s'agissait pour elle de savoir si, moyennant finances, *Microsoft* serait d'accord pour modifier le code de certaines de ses applications en vue de les rendre compatibles avec le 86-DOS. Sans que cela ne débouche sur quoi que ce soit de concret à ce moment précis, Bill Gates et Paul Allen donnèrent une suite favorable à la sollicitation de la S.C.P.

⁴⁷⁴ Usitée dans le milieu des hackers, l'expression américaine *Quick and Dirty* peut être traduite en français par « conçu rapidement et inélegamment » pour apporter une solution à un problème donné.

En définitive ce sont les responsables de *Microsoft* qui relancèrent la *Seattle Computer Products* avec une nouvelle proposition, peu de temps après qu'ils aient signé avec I.B.M. le contrat portant sur le développement de l'*operating system* du micro-ordinateur *Model 5150*. Les termes de l'arrangement qu'ils soumièrent à la S.C.P. étaient les suivants. Contre la somme de 10000 dollars *Microsoft* se proposait tout d'abord de se porter acquéreur des droits non exclusifs de commercialisation du système d'exploitation 86-DOS. Ensuite, pour chaque client industriel auquel elle parviendrait à vendre le programme 86-DOS, la société *Microsoft* s'engageait à verser des royalties à la S.C.P. Chaque transaction de ce genre opérée par *Microsoft* devait ainsi rapporter 15000 dollars au petit équipementier informatique de Seattle. Les représentants de *Microsoft* informèrent le Directeur de la *Seattle Computer Products* qu'ils étaient disposés à conclure rapidement l'affaire et qu'ils avaient déjà un client pour le 86-DOS. Les règles en vigueur dans le monde du business interdisaient bien entendu qu'ils lui en révélassent le nom – c'était I.B.M. évidemment – mais avec ce contrat, la S.C.P. possédait déjà la garantie de percevoir immédiatement 25000 dollars. Une petite société telle que la S.C.P. ne pouvait raisonnablement pas se permettre de décliner une offre pareillement attrayante. Aussi accepta-t-elle l'offre de *Microsoft*. Le contrat signé au début du mois de novembre 1980 entre I.B.M. et *Microsoft* stipulait que la première version opérationnelle du système d'exploitation commandé par l'industriel à son fournisseur devrait pouvoir lui être présentée dans le courant du mois de janvier 1981. Les délais indiqués pour les autres programmes informatiques – comme le BASIC par exemple – laissaient une marge de manoeuvre un peu plus confortable à l'éditeur de logiciels, mais pour l'O.S. du futur P.C., c'était vraiment peu de chose de dire qu'il y avait urgence. Avant de pouvoir être commercialisé avec le *Personal Computer Model 5150* d'I.B.M., le 86-DOS S.C.P. dont *Microsoft* était désormais le distributeur devait subir de profondes modifications. Afin d'aider *Microsoft* à transformer le 86-DOS en un logiciel de qualité professionnelle, I.B.M. fit parvenir à l'éditeur de logiciels un premier prototype de *Personal Computer*. C'était à la fin du mois de novembre 1980. A partir là, les meilleurs spécialistes en programmation de l'éditeur commencèrent à retravailler le code du 86-DOS pour l'amener au niveau d'excellence qu'exigeait sa destination terminale. Parallèlement à cela, un nouvel arrangement fut passé entre la *Seattle Computer Products* et *Microsoft* pour permettre à Tim Paterson – le créateur du Q-DOS/86-DOS - de participer depuis son bureau de la S.C.P. à la reprogrammation de certaines portions du code du système d'exploitation qu'il avait lui-

même conçu. Notons qu'à ce moment, la direction de la S.C.P. et Tim Paterson ignoraient toujours l'identité du client industriel de *Microsoft*⁴⁷⁵. Travaillant parfois 80 heures par semaine dans des conditions d'exercice extrêmement difficiles⁴⁷⁶, les personnels de *Microsoft* impliqués⁴⁷⁷ dans la réalisation du système d'exploitation du premier micro-ordinateur d'I.B.M. réussirent à respecter les délais de production extrêmement serrés qu'avait imposés l'industriel. En mai-juin 1981, *Microsoft* envoya à I.B.M. des exemplaires de sa version) remaniée et augmentée du système d'exploitation 86-DOS. Celle-ci comprenait environ 4000 lignes de code rédigées dans le langage assembleur du microprocesseur i8088 elle occupait 12 kilooctets en mémoire vive (soit un peu moins de 100000 bits), et elle était capable de gérer des disquettes simple face. Après avoir soumis l'*Operating System* de *Microsoft* à une batterie de tests extrêmement sévères, la direction d'I.B.M., satisfaite, prit la décision de le valider.

Au mois de juillet 1981, I.B.M. annonça la disponibilité prochaine de son micro-ordinateur. Les premiers exemplaires du *Personal Computer Model 5150* devaient être introduits sur le marché le 12 août 1981. De manière fort habile, Paul Allen proposa alors à la direction de la *Seattle Computer Products* d'abandonner le système des royalties que *Microsoft* lui payait pour chaque client auquel il revendait 86-DOS et, en lieu et place de cela, il offrit d'acheter l'intégralité des droits du système d'exploitation 16 bits. En échange la S.C.P. recevrait la somme de 50000 dollars et une licence d'exploitation lui conférant le droit d'intégrer un exemplaire du (futur) système d'exploitation de *Microsoft* dans chacun de ses kits. Encore ignorante de ce qui s'était tramé dans son dos, la direction de la petite société de matériel informatique de Seattle accepta la proposition de Paul Allen. Elle était convaincue de réaliser une bonne opération puisque cela lui permettait de se recentrer sur son activité

⁴⁷⁵ Bill Gates et Paul Allen engagèrent Tim Paterson au mois d'avril 1981. C'est alors que celui apprit qu'I.B.M. était le « gros » client de *Microsoft*.

⁴⁷⁶ Les règles de sécurité draconiennes imposées par I.B.M. afin de préserver la confidentialité du projet *Chess* impliquaient notamment que les personnels de *Microsoft* chargés du développement du système d'exploitation du *Model 5150* travaillent dans une pièce enclose et sans aération. I.B.M. estimait en effet que des précautions de niveau militaire devaient être prises pour qu'aucune information concernant directement ou indirectement le P.C. ne filtre vers l'extérieur. Pour contraindre les gens de *Microsoft* à respecter scrupuleusement les protocoles de sécurité prescrits ici, des inspecteurs d'I.B.M. effectuaient régulièrement des visites impromptues dans les locaux de l'éditeur de logiciel. Ces conditions de travail ne facilitèrent pas la tâche des programmeurs de *Microsoft* : non seulement le confinement auquel ils étaient en permanence soumis les stressait, mais en outre la chaleur dégagée par les trois prototypes de P.C. qu'ils finirent par utiliser occasionnaient régulièrement des pannes système. Le problème était que les programmeurs éprouvaient de grandes difficultés à diagnostiquer l'origine des dysfonctionnements. S'agissait-il de bugs logiciels affectant le 86-DOS – auquel cas il était nécessaire de les détecter et de les corriger - ou bien était-ce la trop grande chaleur qu'elles dégageaient qui influait négativement sur le fonctionnement des machines ? Tout cela, bien sûr, était extrêmement coûteux en temps, et contribuait à mettre à rude épreuve les nerfs déjà tendus des programmeurs de *Microsoft*.

⁴⁷⁷ On estime à 35 le nombre d'employés de *Microsoft* qui participèrent à la conception de l'O.S. de l'I.B.M. P.C. *Model 5150*. Rappelons qu'en 1980-81, les effectifs de l'éditeur de logiciels étaient gros d'une centaine d'individus.

première, le *hardware*. Quant à *Microsoft* le fait de *posséder* 86-DOS – et de ne plus seulement en être un simple revendeur – lui conférait à présent une flexibilité commerciale maximale. C'était en réalité tout ce dont l'éditeur de logiciels avait besoin. Parmi les différentes choses que Bill Gates et Paul Allen avaient réussi à imposer aux responsables d'I.B.M. lors de la signature du contrat des logiciels du P.C., figurait en effet une clause de concession de licence non exclusive. En d'autres termes cela signifiait que non seulement I.B.M. devrait verser une redevance à l'éditeur de Seattle pour chaque logiciel *Microsoft* vendu avec ses ordinateurs personnels, mais qu'en plus, la société *Microsoft* conserverait le droit de commercialiser elle-même son système d'exploitation. N'importe qui – qu'il soit constructeur de machines ou simple utilisateur de micro-ordinateur – serait donc libre de l'acheter.

Deux versions du système d'exploitation 16 bits de *Microsoft* élaboré à partir de l'O.S. 86-DOS de la *Seattle Computer Products* furent introduites sur le marché au mois d'août 1981, en même temps que le *Personal Computer Model 5150*. La version vendue à I.B.M. reçut le nom de PC-DOS. Celle commercialisée directement par *Microsoft* fut appelée MS-DOS 1.0, pour *Microsoft Disk Operating System*. Les prévisionnistes d'I.B.M. avaient conjecturé qu'il se vendrait environ 200000 micro-ordinateurs 5150 sur une période d'une demi décennie. Habitée depuis plusieurs dizaines d'années aux spécificités du marché des gros systèmes informatiques, la compagnie I.B.M. n'était absolument pas habituée à ce genre de volume de vente. Cette estimation représentait donc pour elle l'annonce d'un succès commercial tout juste croyable. Mais en vérité l'appréciation des spécialistes des ventes du géant industrielle était fautive. Ce ne sont pas 200000 P.C. qui se vendirent en 5 ans, mais 750000 – presque un million de micro-ordinateurs ! – qui s'écoulèrent en à peine 2 années...La réussite formidable que connut l'I.B.M. P.C. au début des années 80 fut également celle de PC-DOS/MS-DOS. Porté – et cautionné - par la toute-puissance et l'indéfectible image de sérieux attachée à I.B.M., le *Personal Computer Model 5150* est le système informatique qui permit au micro-ordinateur de sortir de l'univers des hobbystes. Ce faisant, il est aussi celui qui, plus que tout autre, conféra ses lettres de noblesses à la micro-informatique. Touchant un public très large, l'I.B.M. *Model 5150* – ou plutôt son architecture – s'érigea rapidement en standard de l'industrie micro-informatique. Il en alla de même avec le PC-DOS/MS-DOS. Au milieu de l'année 1982 trois systèmes d'exploitation différents étaient disponibles pour le P.C. *Model 5150*: 1°) le PC-DOS/MS-DOS (à de très infimes différences près, comme la dénomination de certains fichiers systèmes, il s'agissait exactement du même programme); 2°) le PC/IX (pour *Personal Computer Interactive*

eXecutive), un clone d'UNIX conçu par la société *Interactive Systems Corporation* et ; 3°) le CP/M 86, la version 16 bits du *Control Program for Microcomputers* introduite au mois de janvier 1982 par la *Digital Research Inc.* Face à ses deux concurrents le PC-DOS/MS-DOS de la *Microsoft Corporation* n'eut guère de difficultés à s'imposer. Le PC/IX était gourmand en ressources machines et il était en outre affecté par une lenteur d'exécution handicapante, aussi les possesseurs de P.C. ne lui accordèrent jamais leur préférence. Quant à la version 16 bits de CP/M, c'est son arrivée « tardive » sur le marché et surtout son prix élevé qui lui furent fatals. La D.R.I. démarra la commercialisation de CP/M 86 au mois de janvier 1982, soit un peu moins de six mois après le lancement de l'I.B.M. P.C. *Model 5150*. Cet intervalle de temps avait certes permis aux programmes PC-DOS/MS-DOS de connaître une diffusion importante, mais CP/M 86 possédait un atout de taille: moyennant quelque adaptation, de nombreuses applications 8 bits originellement développées sous et pour CP/M pourraient être rendues opérationnelles sous CP/M 86. Quiconque opterait pour ce système d'exploitation serait donc assuré de pouvoir jouir d'une des programmathèques les plus denses et les plus diversifiées du marché micro-informatique. En dépit de cela l'usage du CP/M 86 sur I.B.M. P.C. demeura très marginal. Son coût est très largement responsable de cela. Ainsi, tandis qu'I.B.M. et *Microsoft* cédaient les licences de leurs systèmes d'exploitation PC-DOS et MS-DOS pour une soixantaine de dollars, la *Digital Research Inc.*, elle, avait fixé le coût unitaire du CP/M 86 à 250 dollars. Certes le CP/M 86 était plus élaboré que PC/DOS et MS-DOS, mais la différence de coût entre les deux O.S. était telle que dans leur très grande majorité, la sophistication du programme de la D.R.I. échoua à convaincre les acheteurs de P.C. de l'adopter. La plupart préférèrent jouer la double carte de l'économie et de la sécurité et en conséquence, ils se tournèrent vers MS-DOS ou PC-DOS. Ces programmes étaient quatre fois moins onéreux que le CP/M 86, et la communauté des utilisateurs de systèmes 5150, tout comme les fabricants de matériel micro-informatique, les considéraient déjà comme des standards de ce nouveau secteur industriel.

Très largement décriée aujourd'hui en raison du monopole écrasant qu'elle occupe dans le secteur de l'édition de logiciels (et des pratiques anti-concurrentielles dont elle se voit régulièrement accusée), la *Microsoft Corporation* a cessé d'être une petite compagnie spécialisée dans la production d'interpréteurs BASIC en 1981. Ce sont les systèmes d'exploitation PC-DOS et MS-DOS qui ont permis à la firme de Bill Gates et Paul Allen de commencer à devenir ce qu'elle est aujourd'hui, c'est-à-dire une entreprise archi dominante sur le marché de l'édition de programmes pour ordinateurs personnels. On ne saurait bien entendu songer à désolidariser le formidable succès rencontré par MS-DOS de celui que

connu le *Personal Computer Model 5150* d'I.B.M. : comme chacun le sait fort bien, c'est d'abord I.B.M. qui a fait de la *Microsoft Corporation* la multinationale hyper puissante à laquelle nous avons affaire aujourd'hui. Ce qui est en revanche beaucoup moins connu, c'est l'influence considérable que la *Microsoft Corporation*, mais aussi l'*Apple Computer Company*, exercèrent – directement ou indirectement - sur le design du premier micro-ordinateur d'I.B.M.

Ces trois compagnies d'envergure planétaire sont à l'origine des standards matériels et/ou logiciels les plus utilisés à ce jour par les possesseurs de micro-ordinateurs. Les compatibles P.C. et les « Mac » sont ainsi les machines informatiques personnelles les plus répandues dans le monde. Si les micro-ordinateurs produits par *Apple* emploient depuis 1984 un *Operating System* propriétaire (*Mac O.S.*, pour *Macintosh Operating System*), 9 P.C. ou compatibles P.C. sur 10 comportent l'une ou l'autre des différentes versions de *Windows*, l'incontournable système d'exploitation à interface graphique de *Microsoft*. Aujourd'hui la concurrence fait rage entre ces trois entreprises, mais au commencement de la décennie 80, leurs destinées étaient comment nous venons de le voir très fortement entremêlées.

Conclusion.

L'archéologie est une discipline on ne peut plus exigeante et laborieuse. Elle nécessite en effet patience, application et obstination de la part de ceux qui ambitionnent de la pratiquer avec quelque sérieux. Le sondage, le nivellement, le quadrillage, la fouille représentent alors autant de méthodologies de travail caractéristiques de cette voie d'investigation scientifique laquelle, comme chacun le sait, n'a d'autre objectif fondamental que celui consistant à mettre au jour les éléments de valeur enfouis dans les profondeurs de territoires parfois étroitement circonscrits, mais toujours lourds du poids et du sens de leur propre histoire. Conduite scrupuleusement, cette entreprise de prospection et de collecte permettra peut-être à celui qui a choisi de la mettre en œuvre de contribuer à la reconstitution et à l'étude d'un ou de plusieurs pans du passé. Ce faisant et sans jamais perdre de vue son objet premier, le travail effectué par l'archéologue l'autorisera également à jeter un éclairage neuf sur sa propre époque, de même qu'elle lui permettra de comprendre un peu mieux les bouleversements qui la traversent et qui modifient ou déplacent au passage ses centres de gravité, ses équilibres, ses flux, ses densités et ses lignes frontalières.

En considérant l'espace informatique comme nous l'avons fait, en nous appliquant à constituer ce que nous avons choisi de nommer une archéologie de l'informatique, les buts que nous nous étions assignés et que nous entendions bien poursuivre tout au long de notre recherche n'étaient pas différents de ceux qui viennent d'être énoncés. Nous nous sommes néanmoins engagés ici en des régions dont le philosophe est le plus souvent fort peu coutumier. Plus prompt il est vrai à s'intéresser aux êtres relevant de l'esprit pur qu'à s'attacher à la sincère considération de ceux qui l'entourent directement, plus enclin à embrasser des problématiques métaphysiques – quant il ne s'agit pas exclusivement de s'évertuer à tenter d'apporter des solutions hautement hypothétiques à d'improbables questionnements éthérés – qu'à se saisir de ce qui fait urgemment question au sein du monde même dans lequel il vit, le philosophe, gageons-le, ne manquera pas de jeter un œil quelque peu soupçonneux sur notre travail. Pour notre part – mais il s'agit là sans doute d'un coupable et persistant accès de naïveté – nous croyons que la philosophie a tout à gagner à se heurter à la réalité, et plus spécialement aux sphères de la technique et de la science, déterminantes

entre toutes au sein de l'époque de changements rapides et brutaux où il nous est donné de vivre.

Pour tenter de comprendre l'ordinateur, ce qu'il est fondamentalement, pourquoi et comment il est apparu, nous avons estimé opportun d'opérer un vaste mouvement de retour vers le passé. L'homme a semble-t-il presque toujours compté, presque toujours calculé. C'est un fait résolument décisif que les raisonnements de nature logique et mathématique constituent une des modalités d'être les plus singulièrement remarquables et efficaces dont soit capable l'esprit humain. Formalisés adéquatement, ce sont ceux-là même qui, au travers de la science, de la technique et de leurs manifestations artéfactuelles, ont permis à l'homme de maîtriser la nature avec une efficacité toujours grandissante. Dès l'origine, afin de faciliter et de sécuriser les calculs auxquels il était amené à se livrer dans le cours de sa vie quotidienne, mais aussi de pallier à l'insuffisance de systèmes de numération alors souvent bien peu opérationnels, l'homme n'a pas hésité à s'appuyer sur des artéfacts qu'il avait spécialement conçus et réalisés à cet effet. Dotés initialement d'une architecture et d'un mode de fonctionnement fort simples – on songera par exemple aux boules et aux jetons d'argile, à la corde à nœuds, à la table à jetons, au boulier ou à l'abaque – ces derniers n'ont jamais cessé de gagner en complexité structurelle au fur et à mesure que la rationalité étendait et consolidait sa formidable emprise sur le monde. Les opérations de calcul que l'homme était désormais appelé à effectuer – dans le cadre de ses activités commerciales grandissantes et de ses incessants déplacements (transcontinentaux et bientôt transocéaniques), ou bien encore dans celui de l'inéluctable procès de l'appréhension scientifique et technique du monde – devaient se compliquer elles-mêmes formidablement tout en voyant leur volume s'accroître de façon non moins considérable. Grâce à l'emploi d'instruments toujours plus ingénieux, l'homme se trouva ainsi en mesure de prolonger continûment sa capacité de calcul tout en en démultipliant à la fois la puissance et la fiabilité. Graduellement l'implication physique plus ou moins prononcée de l'opérateur qui caractérisait la mise en action et la conduite des premiers systèmes d'aide au calcul s'est allégée. La mécanique d'horlogerie, ses engrenages, ses roues dentées, ses arbres, ses chariots, ses manivelles commenceront alors à être mobilisés, à la fin du premier quart du XVI^e siècle. Wilhelm Schickard montrera la voie avec sa machine à calculer mécanisée. Il sera bientôt suivi, prolongé et perfectionné par Pascal, Descartes, et Leibniz, au passage tous philosophes (et quels philosophes !). Peu à peu l'ensemble des opérations arithmétiques se verra couvert par ces machines et on leur ajoutera notamment des systèmes assurant la propagation automatique des retenues, des totalisateurs à capacité étendue, ainsi que des inscripteurs permettant de réaliser le marquage d'un nombre avant

effectuation d'une addition, etc. Il faudra cependant attendre les années 1820 pour assister à la mise au point d'une machine à calculer mécanisée véritablement efficace, simple et fiable, l'arithmomètre. Inventé et construit en France, mais produit aussi en Suède et en Russie, ce dispositif calculatoire sera le premier de son genre à être commercialisé. A la même époque (1822) Charles Babbage présenta à la *Royal Astronomical Society* un projet d'instrument de calcul inédit – le *Difference Engine* – destiné à calculer mécaniquement des valeurs de fonctions polynômiales en recourant à la méthode des différences. Soutenu financièrement par le gouvernement britannique, ce projet remarquable qui visait à accélérer et à fiabiliser notablement l'exécution de l'ensemble des opérations attachées au calcul des tables de logarithmes ne fut jamais mené à terme pour les raisons que nous avons exposées plus haut. Mais cet échec ne découragea pas Babbage qui commença tout de suite à travailler à la conception d'un nouvel engin, plus perfectionné encore que ne l'avait été le premier : l'*Analytical Engine* (A.E.). Pour nombre d'observateurs (et bien qu'il ait fallu attendre l'année 1991 pour le voir enfin réalisé), ce système, s'il avait été construit au cours de la seconde moitié du XIX^e, n'aurait représenté ni plus ni moins qu'un ordinateur mécanique. Il est vrai que son concept intégrait nombre des attributs fonctionnels qui spécifient (ou spécifiaient) les ordinateurs. Ainsi de la présence de « périphériques » d'entrée/sortie, d'une mémoire interne et d'un centre de commandes, de la réalisation de la programmation par le moyen de cartes perforées (une chose héritée du métier à tisser Jacquard qui permettait d'éviter d'avoir à chaque fois à réécrire les séquences d'instructions destinées à accomplir une tâche donnée et donc qui ouvrait sur la possibilité de constituer des bibliothèques de fonctions), et du fait de pouvoir effectuer des branchements conditionnels ou encore des boucles. C'est également pour l'A.E. que Lady Ada Lovelace rédigea ce qui est en général considéré comme le premier programme informatique de l'histoire. Tout à fait impressionnante par bon nombre de ses caractéristiques, la machine imaginée par Babbage était cependant dépourvue de certaines des propriétés qui, entre toutes, font d'un ordinateur ce qu'il est, à savoir d'une part la possibilité de représenter ses programmes en mémoire – comme on devait le faire ici pour les données devant être calculées - et d'autre part le pouvoir, pour les résultats des calculs, d'influer (de rétroagir donc) sur le cours du programme exécuté (autrement dit sur les instructions elles-mêmes et leur ordre). Cela, Babbage ne l'avait pas envisagé. Conçu pour opérer en base décimale (et non en binaire), l'*Analytical Engine* était certes très proche de ce que nous nommons ordinateur. Sur le plan conceptuel il représente donc incontestablement une avancée cruciale dans l'histoire du calcul mécanisé et c'est une moindre chose que de reconnaître ici qu'il tranchait radicalement avec les calculatrices mécanisées imaginées à la même époque

mais, encore une fois, nous pensons qu'il serait abusif de se laisser aller à l'appeler « ordinateur ».

Les machines à calculer appartenant à la lignée de l'arithmomètre, malgré la diffusion relativement conséquente dont elles firent l'objet tout au long du XIX^e siècle, devaient pourtant rester relativement difficiles à employer du fait de la nécessité, pour leurs opérateurs, de manipuler systématiquement et avec une précision toujours égale les curseurs servant à entrer les opérands en machine. La moindre inattention se soldait donc par l'apparition d'erreurs en cascade dans les calculs. Dans les années 1880, la conception du clavier numérique permit enfin d'éliminer cette très fâcheuse imperfection. A partir de là rien ne s'opposa plus à ce que l'on commercialise à grande échelle ces instruments et de nouvelles compagnies industrielles, telles la *Felt & Tarrant Manufacturing Company* ou la *National Cash Register*, se mirent à rivaliser pour conquérir un marché désormais placé en situation de pleine explosion. En 1884, l'ingénieur américain H. Hollerith conçut une *Data Processing Machine* – une machine à traiter les informations statistiques exploitant des cartes perforées – que le gouvernement américain, après lancement d'une offre de marché, retint pour réaliser son recensement de 1890. Ce premier succès industriel – et tous ceux qu'il entraîna par la suite – assura à la *Tabulating Machine Company* d'Hollerith sa renommée et sa réussite économique. En 1924, cette entreprise fut rebaptisée *International Business Machines Corporation*... Dans les années 1920, la presque totalité des conditions de possibilité théoriques et matérielles de l'apparition de l'ordinateur étaient déjà réunies : les principes régissant l'opération et la programmation des machines à calculer avaient été édictés par C. Babbage et A. Lovelace, l'idée de la programmation par cartes perforées reprise également par les deux mathématiciens britanniques, la théorie de la logique binaire – logique censée porter le fonctionnement des lois de la pensée – avait été fondée par G. Boole, tandis que J. Fleming (diode), L. De Forest (triode), et W. H. Eccles et F.W. Jordan (bascule à triodes) avaient imaginé les composants électroniques nécessaires à l'élaboration des circuits de calcul. Quant au programme de métamathématiques énoncé en 1920 par D. Hilbert, il portait déjà, en négatif, les travaux de K. Gödel sur l'incomplétude des systèmes formels non-contradictaires suffisamment puissants pour intégrer l'arithmétique (1931) et ceux d'A. Turing, regardant le problème de la décision (calculabilité) dans les théories axiomatiques (1936-37). Turing, pour mener à bien sa démonstration, introduira les notions de machine et de machine universelle (de Turing) – autrement dit celles d'algorithme et d'algorithme générique (ou encore d'algorithme à algorithmes). Si la machine universelle de Turing représente par excellence le modèle théorique de l'ordinateur, les travaux des deux hommes,

avec ceux d'A. Church bien entendu, jouèrent plus tard un rôle décisif dans l'essor de l'informatique théorique. Enfin en 1938 C. E. Shannon, le futur fondateur de la théorie de l'information, soutint son mémoire de maîtrise au M.I.T. Dans cette étude il démontra comment il était possible de recourir à l'algèbre booléenne pour définir et optimiser l'arrangement des relais électromécaniques utilisés dans les systèmes de routage téléphoniques et aussi assurer la description de leur état. Inversant en quelque sorte sa proposition initiale, il expliqua également comment on pourrait employer des circuits à relais pour résoudre des problèmes relevant de la même logique booléenne.

La deuxième guerre mondiale surviendra alors, avec son formidable cortège d'exigences en matière de moyens calculatoires. Pour satisfaire aux besoins inédits d'une guerre sans précédents, on imaginera dans les deux camps de puissantes machines électromécaniques et électroniques dans le but de créer de nouvelles armes, d'améliorer le rendement de celles déjà existantes, ou bien alors de renouveler ou de renforcer les moyens des services de renseignement et de contre-espionnage. Au Etats-Unis surtout, on assistera à la mise en place d'un schéma collaboratif tripartite intégrant de manière tout à fait remarquable et efficiente les ressources humaines, matérielles et financières des mondes scientifique, militaire et industriel. On mobilisera sans relâche mathématiciens, logiciens, cryptanalystes, cryptographes et ingénieurs pour construire, modifier et faire fonctionner en des endroits tenus secrets des calculatrices « briseuses » de codes secrets (*Bombes, Colossus*) ou des instruments destinés au calcul de tables numériques (de tir cette fois) complètement nouveaux à la fois dans leur ampleur (qu'on songe aux dimensions de l'E.N.I.A.C.) et dans leur principe (dans le cas de l'E.N.I.A.C. emploi de la représentation numérique binaire, recours massif à la technologie électronique pour la réalisation de la circuiterie et reprogrammabilité par variation des schémas de câblage). La guerre ne verra pas naître l'ordinateur – ce sera tout juste le cas du calculateur électronique géant de la *Moore School of Electrical Engineering* – mais les pères de l'*Electrical Numerical Integrator And Calculator* - J. P Eckert, J. W. Mauchly et J. Von Neumann - avant même que celui-ci ne soit complété, imagineront les plans de son successeur : l'*Electronic Discrete Variable Automatic Computer*. Diffusé dans le monde entier – mais signé de la seule main de Von Neumann – le *First Draft of a Report on the E.D.V.A.C.*, à compter de la fin du mois de juin 1945, contribuera largement à familiariser les savants du monde entier (y compris ceux d'U.R.S.S.) avec l'architecture et les concepts originaux incarnés par la machine à calculer inédite projetée à la *Moore School*. Doté d'une *mémoire interne* offrant accès rapide et capacité d'enregistrement importante, capable de stocker à la fois données et programmes et de modifier le déroulement

de ces derniers grâce aux résultats déjà produits – donc de tout ce qui manquait précisément à l'*Analytical Engine* pour faire de ce dernier un ordinateur – l'E.D.V.A.C. sera le premier ordinateur (en tout cas sur le papier). A l'opposé de la machine universelle de Turing qui représente l'archétype logico-mathématique de l'ordinateur, l'architecture informatique dite de Von Neumann ne constitue certes pas l'unique parangon structurel – plusieurs agencements matériels sont en effet envisageables ici – permettant de bâtir un ordinateur. Mais en dépit de l'existence de solutions architecturales alternatives (architecture Harvard, architecture multiprocesseurs massivement parallèle), et de son défaut intrinsèque majeur (goulet d'étranglement pour le transfert des informations entre le processeur et la mémoire), celle-ci a commencé à s'imposer naturellement dès la période d'après guerre. Tandis que l'ordinateur faisait lentement son entrée au sein de la sphère civile – grâce à l'intuition d'Eckert et Mauchly - les blocs de l'est et de l'ouest amorçaient leur patiente et dangereuse partie d'échec à l'échelle mondiale. Comme nous l'avons montré, les ordinateurs et la technologie informatique seront sans conteste les très grands bénéficiaires de la guerre froide. Pour mettre au point de nouveaux moyens offensifs et se prémunir efficacement contre ceux toujours plus véloces et dévastateurs de l'adversaire – on a ainsi assisté ici à une phase hyper accélérée et hyper dense de la vieille dialectique de l'épée et du bouclier – les deux blocs ont mobilisé des moyens informatiques colossaux tout en s'efforçant incessamment de les perfectionner eux aussi. Après la deuxième guerre mondiale l'essentiel des efforts portera sur un accroissement de la vitesse de calcul des processeurs et sur une amélioration de la fiabilité, des performances et de la capacité de stockage des mémoires internes. Les transistors remplaceront les fragiles lampes à vide tandis que les dispositifs d'enregistrement à accès aléatoires optiques ou magnétiques (de type Selectron ou RAMAC) succéderont aux mémoires à accès sériel (comme les délicates lignes délai au mercure). On cherchera aussi continûment à augmenter les débits de circulation informationnelle occurring entre les différents organes internes et externes des systèmes. Les machines ont ainsi graduellement gagné en capacité de calcul et en sûreté de fonctionnement ce qu'elles ont peu à peu perdu en masse, en volume et en coût. Avec l'avènement des bombardiers stratégiques, des missiles balistiques intercontinentaux et des satellites d'observation, on ne pourra plus se contenter d'ordinateurs opérant au sol. Il faudra désormais des systèmes embarqués – c'est-à-dire des ordinateurs de dimensions réduites puisque la capacité d'emport des vecteurs était par nature limitée - capables de travailler comme les mainframes, mais dans des conditions d'usage extrêmes (température, accélération, chocs mécaniques). De façon tout juste voilée, cette course aux armements effrénée s'est poursuivie dans un milieu encore plus exigeant que la

stratosphère – certainement le plus exigeant qui se puisse imaginer avant les fosses abyssales ou les cratères magmatiques - l'espace. Une fois encore, la multiplicité et l'ampleur des enjeux poursuivis de part et d'autre serviront de catalyseur à la technologie informatique. Celle-ci jouant un rôle de plus en plus central et déterminant dans le cadre de l'effort de guerre (froide), des moyens considérables seront engagés pour assurer à la fois son évolution et son développement. Aux Etats-Unis, universités, armées et industries collaboreront encore plus intensément pour garantir à cette nation sa suprématie face aux forces du Pacte de Varsovie.

Dans la sphère industrielle et commerciale, l'ordinateur trouvera peu à peu sa place et finira pas s'imposer. Sa diffusion croissante dans ces milieux contribuera à en abaisser les coûts de production et de vente, de la même façon qu'elle donnera naissance à l'industrie du logiciel. Relayée par la presse, exploitée par les consortiums informatiques, décuplée par les annonces tonitruantes faites par les ambitieux thaumaturges de la toute jeune intelligence artificielle, l'image du cerveau électronique (au demeurant déjà présente dans le *First Draft* de Von Neumann), s'imposera durablement dans l'esprit du grand public et cela au moins jusqu'au début des années 1970. Même civil, l'ordinateur n'en sera pas pour autant civilisé. Cloîtré dans le secret de pièces en permanence refroidies, visible, accessible et compréhensible seulement par les membres du clergé autorisé – les scientifiques, programmeurs et techniciens en charge de son utilisation et de son entretien – l'ordinateur suscitera simultanément admiration, fascination, incrédulité, soulagement (mis en réseau il devient en effet le garant omniscient et infatigable de la sécurité nationale), mais aussi inquiétude. Plus puissant que l'homme, il semblait à terme capable de le remplacer dans certains secteurs. De toute façon c'était une entité technique si incroyablement puissante, si difficilement pénétrable et si remarquablement versatile (générique), qu'entre les mains de personnes peu enclines au respect des libertés individuelles elle ne pouvait devenir qu'un instrument de contrôle et donc une menace potentielle pour les individus dans leur ensemble (même si les personnes aux commandes des ordinateurs œuvraient pour le compte du gouvernement et dans l'intérêt de la sécurité nationale). Sur fond d'opposition croissante à la guerre du Vietnam et alors qu'apparaissaient les premiers mini-ordinateurs ainsi que des langages de programmation réellement proches de la langue naturelle, cette peur née du spectre d'un outil informatique gouvernemental centralisé, fermé et capable de tout « savoir » sur tout le monde a commencé à engendrer un mouvement protestataire composé notamment de jeunes gens hautement qualifiés sur le plan technique, dans les centres universitaires de pointe où l'informatique, comme on dit, se faisait. Hackers, nerds, rêveurs, idéalistes, moins

souvent activistes politiques réellement engagés, ces jeunes gens par ailleurs remarquablement compétents ont quelquefois détourné l'ordinateur de l'usage qui en était couramment fait dans les grands centres de calcul ou les laboratoires de recherche pour en explorer les limites ou encore – fait impensable à peine une décennie auparavant ! - *s'amuser* avec. Le partage des informations techniques et des logiciels (grâce à la mise en place de groupes d'utilisateurs), la mise en réseau de machines (d'abord militaires puis civiles) de moins en moins coûteuses, ajoutés au phénomène d'émancipation des usagers informatiques, ont commencé à transformer la représentation que l'on avait de l'ordinateur. Quant l'ordinateur était financièrement inaccessible, physiquement protégé, caché à la vue, manipulable par ceux-là seuls qui comprenaient et maîtrisaient ses sibyllins langages alphanumériques et ses inextricables entrailles toujours surchauffées, il pouvait constituer une menace. A compter du moment où il est devenu accessible, c'est-à-dire compréhensible et utilisable, il a partiellement cessé de l'être. Placé entre les mains d'individus sans liens directs avec ceux exerçant l'autorité, affranchi de sa dimension purement étatique, de ses impératifs de contrôle sociétaux, il a pu, d'abord par le biais de la mini-informatique puis grâce à la micro-informatique, non seulement devenir un instrument de contre-pouvoir, mais aussi et surtout un outil capable de favoriser l'épanouissement personnel. Internet et le taux aujourd'hui à peine croyable de pénétration des ordinateurs personnels dans les foyers ont parachevé ce processus – pour le meilleur *et* le pire sans doute – en conférant une dimension électro-numérique au village planétaire envisagé jadis par McLuhan.

En ces temps où le concept d'insécurité – à tort ou à raison – fait plus que jamais recette, l'ordinateur, une fois de plus, est pointé du doigt. Réduite à des dimensions ridicules, couplée à des technologies intégrant son, image, communication et localisation (on songera aux Smartphones et aux P.D.A. informatisés possédant un module G.P.S.), la machine informatique est regardée à la fois comme le plus précieux allié du citoyen (encore une notion en vogue !) – n'importe qui peut par exemple filmer n'importe quoi et ainsi prouver, incriminer, voire monnayer ce n'importe quoi – en même temps que son pire ennemi. Car l'ordinateur désormais réduit à presque rien peut tout ou presque, y compris se retourner contre son porteur... L'utiliser – même indirectement avec une carte de crédit - c'est ainsi nécessairement se signaler, donc laisser d'infimes traces numériques dans les mailles des invisibles réseaux informatiques qui maillent aujourd'hui la planète en fondant notre incroyable puissance communicationnelle. On pourra retrouver ces traces, remonter la piste de celui qui les a laissées et savoir où il était précisément, dans les intervalles de temps enregistrés par la machine. Transparence, traçabilité semblent être devenus les maîtres mots

de nos sociétés régulées par l'ordinateur. Certes ce dernier continue à effrayer. Son passé lourdement militaire n'est d'ailleurs certainement pas étranger à ce sentiment de défiance plus ou moins affirmé. Pour notre part, nous ne voyons pas dans l'ordinateur ce cerbère numérique aux ordres d'un fascisme technologique mou que certains se plaisent parfois à annoncer (ou à décrire). Condamnera-t-on la caméra en raison des systèmes de vidéosurveillance qui fleurissent aujourd'hui dans nos villes ? Doit-on proscrire l'automobile sous prétexte qu'elle constitue un des moyens de transport les plus accidentogènes qui soit ? La machine univers, étant donné sa généralité, peut tout (ou presque). Aussi ne devons-nous pas nous étonner de la retrouver dans tous les secteurs de l'activité humaine. Quant à son pouvoir de nuisance, sa soi-disant capacité à diminuer les libertés personnelles, à réduire la sphère de l'intime, à violer le secret des individualités, nous admettons bien volontiers qu'il s'agit d'une potentialité. L'ordinateur, spécialement lorsqu'il est couplé à des logiciels et des capteurs biométriques a de quoi inquiéter. Ceci étant, en disant cela, nous n'oublions pas les leçons des hackers d'hier et d'aujourd'hui : la machine même qui est susceptible d'asservir est celle-là même qui peut libérer et se retourner contre celui qui l'utilise de manière condamnable.

En ce qui nous concerne nous n'avons eu de cesse - et ce depuis toujours - de nous émerveiller des prouesses toujours plus impressionnantes dont est capable l'ordinateur. Depuis près de soixante ans, il seconde l'homme dans son inlassable entreprise de rationalisation/compréhension du monde. Il calcule là où l'intellect de l'homme est pris en défaut, là où une vie humaine dans son entièreté ne permettrait jamais de parvenir à un quelconque résultat probant. Couplé à des appareillages adéquats qu'il a en général très souvent contribué à mettre au point et à construire, il lui permet encore de voir et d'entendre ce que ses sens imparfaits ne lui permettraient jamais d'appréhender directement. Véritable prothèse calculatoire il est présent partout, autorisant des avancées souvent spectaculaires dans des domaines où l'homme, sans lui, se serait certainement perdu depuis longtemps en d'interminables piétinements ou errements. Avec lui on sonde les tréfonds de l'univers, des sous-sols et on décode le génome, on réalise des simulations aérodynamiques et météorologiques, on détecte les signes d'une éventuelle activité extra-terrestre et on télécommande encore des robots envoyés sur Mars ! A-t-on réellement perdu de vue ce qu'était fondamentalement l'ordinateur pour oublier tout cela ? Nous sommes-nous si vite habitués à sa présence (indispensable), que nous ayons déjà oublié quelle merveille produite par l'esprit humain il représentait (même si son identité avec ce dernier a été proclamée un peu vite). L'ordinateur démultiplie de manière tout juste croyable la capacité que possède l'homme à comprendre l'univers dans lequel il vit. Au fur et à mesure que sa puissance

s'accroît, c'est le pouvoir d'intelligence et d'intervention que l'homme a sur le monde qui augmente. De nouvelles révolutions informatiques sont d'ores-et-déjà en cours : l'ordinateur quantique, les systèmes optiques ou à ADN (plus spécialisés il est vrai) et les bio-ordinateurs neuronaux sont déjà des réalités. La mise au point d'ordinateurs de ce genre qui soient réellement opérationnels se heurte encore à d'importants problèmes techniques.. A supposer qu'il soit possible de les surmonter – mais avec l'assistance de l'ordinateur cela le sera très certainement – il est permis d'espérer que ces difficultés ne perdureront pas trop longtemps. Quant ces machines seront enfin disponibles, les capacités de calcul dont disposera l'humanité n'auront jamais été si élevées. Dépassant la logique booléenne (qubit), couplant en des modalités inédites le technologique et le biologique, celles-ci autoriseront à n'en point douter la résolution de problèmes jusqu'ici hors de portée (pour des raisons techniques, des questions de temps de calcul), et/ou accéléreront formidablement la vitesse d'exécution des calculs

Bibliographie

[Aleksander, 1996] ALEKSANDER, I., *Impossible Minds: My Neurons, My Consciousness*, Londres, Imperial College Press, 1966.

[Alliot et Schiex, 1993] ALLIOT, J.-M., SCHIEX, T., *Intelligence Artificielle et Informatique Théorique*, Toulouse, Cépaduès Editions, 1993.

[Amat et Yahiaoui, 1997] AMAT, J.-L., YAHIAOUI, G., *Techniques Avancées pour le Traitement de l'Information*, Toulouse, Cépaduès Editions, 1997.

[Anderson et al., 1964] ANDERSON, A. R., *Minds and Machine*, New York, Prentice-Hall Inc., 1964; trad. Fr. par P. Blanchard, *Pensée et Machine*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 1983.

[Augarten, 1984] AUGARTEN, S., *An Illustrated History of Computers*, New York, Ticknor & Fields, 1984.

[Babbage, 1994] BABBAGE, C., *Passages from the Life of a Philosopher*, Trowbridge, Rutgers University Press & I.E.E.E. Press, 1994.

[Balakrishnan, Honovar, Patel et al., 2001] BALAKRISHNAN, K., HONOVAR, V., PATEL, M. J., *Advances in the Evolutionary Synthesis of Intelligent Agents*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 2001.

[Baum, 1981] BAUM, C., *The System Builders: the Story of System Development Corporation*, S.D.C. Editions, Santa Monica (Cal.), 1981.

[Beaune, 1980] BEAUNE, J.-C., *L'Automate et ses Mobiles*, Paris, Flammarion, 1980.

[Bergin et Gibson, 1996] BERGIN, Th. J., GIBSON R.G., *History of Programming Languages-II*, New York, ACM Press, 1996.

[Birrien, 1992] BIRRIEN, J.-Y., *Histoire de l'Informatique*, Coll. « Que sais-je ? », n°2510, Paris, P.U.F., 1992.

[Blanc et al., 1988] BLANC, M., ADRIEN, J., BOCKAERT, J., CARDO, B., DEHAY, C., HECAEN, H., HINDE, R.A., HÖKFELT, T., IMBERT, M., JOUVET, M., KARLI, P., KENNEDY, H., LECOCQ, A. L., LE MAGNEN, J., STEVENSON, J.G., TAXI, J., *La Recherche en Neurobiologie*, Coll. « Point Sciences », n° S57, Paris, Editions du Seuil, 1988.

[Blanché, 1968] BLANCHE, R., *Introduction à la logique contemporaine*, Coll. « U2 », Paris, Armand Colin, 1968.

[Blayo et Verleysen, 1996] BLAYO, F., VERLEYSSEN, M., *Les réseaux de neurones artificiels*, Coll. « Que sais-je ? », n°3042, Paris, P.U.F., 1996.

Bibliographie

- [Borges, 1956] BORGES, J. L., *Ficciones*, Buenos Aires, Emecé Editores S.A., 1956 et 1960 ; trad. Fr. par P. Verdevoye, I. et R. Caillois, *Fictions*, Coll. « Folio », n°614, 1999.
- [Bouveresse, 1971] BOUVERESSE, J., *La Parole Malheureuse*, Paris, Les Editions de Minuit, 1971.
- [Brand, 1988], BRAND, S., *The Media Lab., Inventing the Future at MIT*, New York, Penguin Books, 1988.
- [Breton, 1990] BRETON, P., *Une Histoire de l'Informatique*, Coll. « Points Sciences », n° S65, Paris, Editions du Seuil, 1990.
- [Breton, Rieu et Tinland, 1990] BRETON, P., RIEU, A.-M., TINLAND, F., *La Techno-Science en Question : Eléments pour une Archéologie du 20^{ème} Siècle*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 1990.
- [Breton, 1995] BRETON, P., *A l'Image de l'Homme : du Golem aux Créatures Virtuelles*, Coll. « Science ouverte », Paris, Ed. du Seuil, 1995.
- [Brooks, 1999] BROOKS, R. A., *Cambrian Intelligence: the Early History of the new AI*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1999.
- [Campbell-Kelly et Aspray, 1996] CAMPBELL-KELLY, M., ASPRAY W., *Computer, A History of the Information Machine*, New York, Basic Books, 1996.
- [Campbell-Kelly, 2003] CAMPBELL-KELLY, M., *From Airline Reservations to Sonic the Hedgehog: A History of Software Industry*, Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 2003.
- [Cardon, 2000], CARDON, A., *Conscience Artificielle et Systèmes Adaptatifs*, Paris, Eyrolles, 2000.
- [Carroll, 1990] CARROLL, L., *Alice au pays des merveilles, De l'autre côté du miroir*, Coll. « Folio Classique », n°2657, Paris, Gallimard, 1994.
- [Carroll, 1894] CARROLL, L., «What the Tortoise said to Achilles », in *Mind*, n°14, avril 1895, pp. 278-280; trad. Fr. par J. Gattégno et E. Coumet, in *Logique sans peine*, « Ce que se dirent Achille et la tortue », 6^{ème} Ed., Coll. « L'esprit et la main », Paris, Hermann, 1992
- [Carroll, 1896] CARROLL, L., *Symbolic Logic, Part I : Elementary*, Londres, Macmillan, 1896 ; trad. Fr. par J. Gattégno et E. Coumet, in *Logique sans peine*, 6^{ème} Ed., Coll. « L'esprit et la main », Paris, Hermann, 1992.
- [Cerruzi et Kidwell, 1994], CERRUZI, P. E., KIDWELL, P. A., *Landmarks in Digital Computing*, Washington, Smithsonian Institution Press, 1994.
- [Ceruzzi, 1998] CERUZZI, P. E., *A History of Modern Computing*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1998.

Bibliographie

- [Changeux, 1983] CHANGEUX, J.-P., *L'homme neuronal*, 7^{ème} Ed., Coll. « Pluriel », Fayard, Paris, 1983.
- [Changeux et Ricoeur, 1998] CHANGEUX, J.-P., RICOEUR, P., *Ce Qui Nous Fait Penser, La Nature et la Règle*, Coll. « Poches Odile Jacob », Paris, Odile Jacob, 1998.
- [Charles, 1995], CHARLES, S., *Le Langage de l'Intelligence Artificielle*, Poitiers, Ed. Méthodes et Stratégies, 1995.
- [Chaudet et Pellegrin, 1998] CHAUDET, H., PELLEGRIN, L., *Intelligence Artificielle et Psychologie Cognitive*, Paris, Dunod, 1998.
- [Chazal, 1995] CHAZAL, G., *Le Miroir Automate: Introduction à une Philosophie de l'Informatique*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 1995.
- [Chazal, 1996] CHAZAL, G., *Eléments de Logique Formelle*, Paris, Hermès, 1996.
- [Chazal, 2000] CHAZAL, G., *Les Réseaux du Sens: de l'Informatique aux Neurosciences*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 2000.
- [Chevalier et Gheerbrant, 1982] CHEVALIER J., GHEERBRANT A., *Dictionnaire des symboles*, Coll. « Bouquins », Paris, Editions Laffont et Editions Jupiter, 1982.
- [Churchland, 1993] CHURCHLAND, P. M.; *Matter and Consciousness*, Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1993; trad. Fr. par G. Chazal,, *Matière et Conscience*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 1999.
- [Clarke, 1968] CLARKE, A. C., *2001, A Space Odyssey*, New York, Arthur C. Clarke and Polaris Publications Inc., 1968; trad. Fr. par M. Demuth, *2001, l'odyssée de l'espace*, Coll. « S-F », n°349, Paris, Editions J'ai Lu, 1995.
- [Copeland, 2004] COPELAND, J. B., *The Essential Turing*, New York, Oxford University Press Inc., 2004.
- [Cortada, 1993] CORTADA, J. W., *Before the Computer: I.B.M. , Burroughs, & Remington Rand & the Industry They Created 1865 – 1956*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1993.
- [Crevier, 1993] CREVIER, D., *The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*, New York, Basic Books, 1993; trad. Fr. par N. Bucsek, *A la Recherche de l'Intelligence Artificielle*, Paris, Flammarion, 1997.
- [Dagognet, 1979] DAGOGNET, F., *Mémoire pour l'avenir, vers une méthodologie de l'informatique*, Paris, Vrin, 1979.
- [Dauvin, Olliver et Coulon, 1995] DAUVIN, J.-M., OLLIVER, J., COULON, D., *Les composants électroniques et leur industrie*, coll. « Que sais-je ? », n°1080 , Paris, P.U.F., 1995.
- [Davis, 2000] DAVIS, M., *The Universal Computer : the Road from Leibniz to Turing*, New York, W.W. Norton & Compagny, Inc., 2000.

[Dawkins, 1976] DAWKINS, R., *The Selfish Gene*, Oxford, Oxford University Press, 1976; trad. Fr. par L. Ovion, *Le Gène Egoïste*, Odile Jacob, 1996.

[Dawkins, 1986] DAWKINS, R., *The Blind Watchmaker*, ED ?, 1986; trad. Fr. par B. Sigaud, *L'Horloger Aveugle*, Paris, Robert Laffont, 1989.

[Dawkins, 1995] DAWKINS, R., *River Out of Eden, A Darwinian View of Life*, Oxford, Oxford University Press, 1995 ; trad. Fr. par T. N. Lê, *Qu'est ce que l'Evolution, Le fleuve de la Vie*, Coll. « Pluriel », n°954, Paris, Hachette Littératures, 1997.

[De Rosnay, 1995], DE ROSNAY, J., *L'homme symbiotique, regards sur le nouveau millénaire*, Coll. « Points », n°P357, Paris, Seuil, 1995.

[Demarne et Rouquerol, 1985] DEMARNE, P., ROUQUEROL, M., *Les Ordinateurs*, 9^{ème} Ed., coll. « Que sais-je ? », n°832 , Paris, P.U.F., 1985.

[Delahaye, 1997], DELAHAYE, J.-P., *Le fascinant nombre π* , Paris, Belin/Pour la Science, 1997.

[Dennett, 1978] DENNETT, D. C., *Brainstorms: Philosophical Essays on Mind and Psychology*, New York, Penguin Books, 1978.

[Dennett et Hofstadter, 1981] DENNETT, D. C., HOFSTADTER, D. R., *The Mind's I: Fantasies and Reflections on Self and Soul*, New York, Penguin Books, 1981.

[Dennett, 1991] DENNETT, D. C., *Consciousness Explained*, New York, Little, Brown and Compagny, 1991; trad. Fr. par P. Engel, *La Conscience Expliquée*, Paris, Ed. Odile Jacob, 1993.

[Dennett, 1996] DENNETT, D. C., *Kinds of Minds*, New York , Brockman, Inc., 1996; trad. Fr. par A. Abensour, *La Diversité des Esprits : une Approche de la Conscience*, Paris, Ed. Hachette Littératures, 1998.

[Denton, 1993], DENTON, D., *The Pinnacle of Life, Consciousness and Self-Awareness in Humans and Animals*, St. Leonard, Australias, Allen and Unwin, 1993 ; trad. Fr. par M. Jouvét, *L'émergence de la conscience de l'animal à l'homme*, Coll. « Champs », n°397, Paris, Flammarion, 1998.

[Descartes, 1966], DESCARTES, R., *Discours de la méthode*, Coll. « GF », n°109, Flammarion, Paris, 1966.

[Dick, 1968] DICK, P. K., *Do Androids Dream of Electric Sheeps ?*, New York, Polaris Publications Inc., 1968 ; trad Fr. par S. Quadruppani, *Blade Runner*, Coll. « Science-fiction », n°1768, Paris, Editions J'ai Lu, 1985.

[Dion, 1997] DION, E., *Invitation à la théorie de l'information*, Coll. « Points Sciences », n° S118, Paris, Editions du Seuil, 1997.

[Dreyfus, 1979] DREYFUS, H. L., *What Computers Can't Do ? The Limits of Artificial Intelligence*, New York, Harper & Row Publishers, 1979; trad. Fr. par R.-M. Vassallo-Villaneau, *Intelligence Artificielle : Mythes et Limites*, Paris, Flammarion, 1984.

[Dreyfus, 1997] DREYFUS, H. L., *What Computers Still Can't Do ? : A Critique of Artificial Reason*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1997.

[Dupuy, 1999] DUPUY, J.-P., *Aux Origines des Sciences Cognitives*, Nouv. Ed., Paris, La Découverte, 1999.

[Edelman, 1992] EDELMAN, G. M., *Bright Air, Brilliant Fire: On The Matter of Mind*, New York, Basic Books, 1992 ; trad. Fr. par A. Gerschenfeld, *Biologie de la Conscience*, Paris, Odile Jacob, 1992.

[Edelman et Tononi, 2000] EDELMAN G. M., TONONI G., *A Universe of Consciousness. How Matter Becomes Imagination*, New York, Basic Books, 2000 ; trad. Fr. par J.-L. Fidel, *Comment la Matière devient Conscience*, Paris, Odile Jacob, 2000.

[Franklin, 1997] FRANKLIN, S., *Artificial Minds*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1997.

[Freiberger et Swayne, 2000] FREIBERGER P., SWAYNE M., *Fire in the Valley, The Making Of the Personal Computer*, New-York, McGraw-Hill, 2000.

[Ganascia, 1993] GANASCIA J.-G., *L'Intelligence Artificielle*, Coll. « Dominos », n°4, Paris, Flammarion, 1993.

[Ganascia, 1996] GANASCIA J.-G., *Les Sciences Cognitives*, Coll. « Dominos », n°82, Paris, Flammarion, 1996.

[Ganascia, 1999] GANASCIA J.-G., *2001, l'Odyssée de l'Esprit*, Paris, Flammarion, 1999.

[Gardner, 1985] GARDNER, H., *The Mind's New Science: A History of The Cognitive Revolution*, New York, Basic Book, 1985; trad. Fr. par J.-L. Peytavin, *Histoire de la Révolution Cognitive : La Nouvelle Science de l'Esprit*, Paris, Payot, 1993.

[Garfinkel, 1999], GARFINKEL, S., *Architects of the Information Society, Thirty-Five Years of the Laboratory for Computer Science at MIT*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1999.

[Gates, 1995] GATES, B., *The Road Ahead*, New York, Penguin Books, 1995 ; trad. Fr. par Y. Coleman, G. Fargette, M. Garène et L. Mercadet, *La route du futur*, Paris, Robert Laffont, 1995.

[Gell-Mann, 1994] GELL-MANN, M., *The Quark and the Jaguar, Adventures in the Simple and the Complex*, ED ?, 1994 ; trad. Fr. par G. Minot, *Le Quark et le Jaguar. Voyage au cœur du simple et du complexe*, Coll. « Champs », n°350, Paris, Flammarion, 1997.

[Gibson, 1984] GIBSON, W. *Neuromancien*, Coll. « Science-fiction », n°2325, Paris, Editions J'ai Lu, 1989.

Bibliographie

[Goldstine, 1972] GOLDSTINE, H., *The Computer from Pascal to von Neumann*, Princeton, Princeton University Press, 1972.

[Good, 1948] GOOD, I. J., Correspondance privée avec A.M. Turing, une lettre typographiée en date du 25 juillet 1948, une lettre typographiée en date du 31 juillet 1948, une lettre typographiée en date du 18 septembre 1948.

[Greenberger et Al., 1962], GREENBERGER M., *Computers and the World of the Future*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1962.

[Hafner, Lyon, 1998] HAFNER K., LYON M., *Where Wizards Stay Up Late, the Origins of the Internet*, New York, Touchstone Book/Simon & Schuster Ed. 1998.

[Haton, Haton, 1993] HATON, J.-P., HATON, M.-C., *L'Intelligence Artificielle*, 3^{ème} Ed., Coll. « Que sais-je ? », n°2444, Paris, P.U.F., 1993.

[Hayden, 1999] HAYDEN, M., *Teach Yourself Networking in 24 hours*, Indianapolis, Sams Publishing, 1998 ; Trad. Fr. par Eric Tyberghien, *Les réseaux*, Paris, CampusPress France, 1999.

[Hillis, 1985] HILLIS, D., *The Connection Machine*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1985.

[Hiltzik, 1999], HILTZIK, M., *Dealers of Lightning: XEROX PARC and the Dawn of the Computer Age*, New York, HarperBusiness, 1999.

[Hinsley, Stripp et al., 1993] HINSLEY, F.H., STRIPP, A., *Code Breakers: the Inside History of Bletchley Park*, Oxford, Oxford University Press, 1993.

[Hodges, 1983] HODGES, A., *Alan Turing: the Enigma of Intelligence*, New York, Burnett Books Limited, 1983; trad. Fr. par N. Zimmerman, *Alan Turing ou l'Enigme de l'Intelligence*, Coll. « Bibliothèque scientifique Payot », Paris, Ed. Payot, 1988.

[Hofstadter, 1979] HOFSTADTER, D., *Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid*, New York, Basic Books Inc., 1979 ; trad. Fr. par J. Henry et R. French, *Gödel, Escher, Bach : les Brins d'une Guirlande Eternelle*, Nouveau tirage, Paris, InterEditions, 1993.

[Hofstadter, 1985] HOFSTADTER, D., *Matemagical Themas: Questing for the Essence of Mind and Pattern*, New York, Basic Books Inc., 1985; trad. Fr. par J.-B. Berthelin, J.-L. Bonnetain et L. Rosebaum, *Ma Thémagie : en quête de l'essence de l'esprit et du sens*, Paris, InterEditions, 1988.

[Hughes et Al., 1999], HUGHES, T., *Funding a Revolution : Government Support for Computing Research*, Washington D.C., National Academy Press, 1999.

[Jeannerod, 1998] JEANNEROD, M., *Le Cerveau-Machine*, Paris, Diderot Multimédia, 1998.

[Jodouin, 1994] JODOUIN, J.-F., *Les réseaux de neurones*, Paris, Hermès, 1994.

Bibliographie

[Johnson-Laird, 1993] JOHNSON-LAIRD, P. N., *The Computer and the Mind*, New York, Fontana Press, 1993; trad. Fr. par J. Henry, *L'Ordinateur et l'Esprit*, Paris, Odile Jacob, 1994.

[Khun, 1970] KHUN, T. S., *The Structure of Scientific Revolution*, Second Edition (enlarged), Chicago, Illinois, The University of Chicago Press, 1970 ; trad. Fr. par L. Meyer, *La structure des révolutions scientifiques*, Coll. « Champs », n°115, Paris, Flammarion, 1993.

[Lassègue, 1998] LASSEGUE, J., *Turing*, Paris, Coll. «Figures du savoir », Les Belles Lettres, 1998.

[Leibniz, 1995] LEIBNIZ, G.W.L., *Discours de métaphysique suivi de Monadologie*, Coll. « TEL », n°262, Paris, Gallimard, 1995.

[Lévy, 1990] LEVY, P., *Les Technologies de l'Intelligence*, Coll. « Points Sciences », n° S90 Paris, Editions du Seuil, 1990.

[Lévy, 1992] LEVY, P., *La machine univers, création, cognition et culture informatique*, Coll. « Points Sciences », n° S79, Paris, Editions du Seuil, 1992.

[Lilen, 2003], LILEN, H., *La saga du micro-ordinateur*, Paris, Vuibert, 2003.

[Lévy, 1994], LEVY, S., *Hackers, Heroes of the Computer Revolution*, New York, Delta Book/Bantam Doubleday Dell Publishing Group Inc., 1994.

[Linzmayr, 2004], LINZMAYER, O., *Apple Confidential 2.0: The Definitive History of the Most Colorful Company*, San Francisco, No Starch Press, 2004.

[Kurzweil, 1999] KURZWEIL, R., *The Age of Spiritual Machines : When Computers Exceed Human Intelligence*, New York, Penguin Book, 1999.

[Markoff, 2005], MARKOV, J., *What the Dormouse Said: How the Sixties Counterculture Shaped the Personal Computer Industry*, New York, Penguin Books, 2005.

[McCartney, 1999] McCARTNEY, S., *ENIAC: the Triumphs and Tragedies of the World's First Computer*, New York, Walker and Compagny, 1999.

[McLuhan, 1962] McLUHAN, M., *The Gutenberg Galaxy*, Toronto, University of Toronto Press, 1962; trad. Fr. par J. Paré, *La galaxie Gutenberg*, tomes 1 et 2, n° 372 et n° 373, Coll. « Idées », Paris, Gallimard, 1977.

[Michaud et al., 2002] MICHAUD, Y., BALIAN, R., BALIBAR, S., FINK, M., GODFRIN, H., GRATIAS, D., GUYON, E., LESIEUR, M., LEWINER, J., PETROFF, Y., PIECUCH, M., RODITCHEV, D., WEISBUCH, C., *Les États de la matière*, Coll. « Université de tous les savoirs », Paris, Odile Jacob, 2002.

[Minsky, 1985] MINSKY, M., *The Society of Mind*, New York, Simon and Schuster, 1985; trad. Fr. par J. Henry, *La société de l'esprit*, Paris, InterEditions, 1988.

[Miquel, 1986] MIQUEL, P., *La seconde guerre mondiale*, Paris, Fayard, 1986.

Bibliographie

- [Mitchell, 1997] MITCHELL T. M., *Machine Learning*, New York, McGraw-Hill International Editions, Computer Science Series, 1997.
- [Mumford, 1970], MUMFORD, L., *The Pentagon of Power: The Myth of the Machine*, New York, Harvest/HBJ Books, 1970.
- [Nagel, Newman, 1958] NAGEL, E., NEWMAN, J. R., *Gödel's Proof*, New York, New York University Press, 1958; trad. Fr. par J.-B. Scherrer, *Le théorème de Gödel*, Ed. Fr. augmentée d'un texte de J.-Y. Girard, Coll. « Points Sciences », n°S122, Paris, Editions du Seuil, 1989.
- [Negroponte, 1995], NEGROPONTE, N., *L'Homme Numérique*, Paris, Robert Laffont, 1995.
- [Odiar, Zennaki, 1992], ODIER, A., ZENNAKI, M., *Dictionnaire des Télécommunications*, Allier (Belgique), Marabout, 1992.
- [Papert, 1980] PAPERT, S., *Mindstorms, Children, Computers, and Powerful Ideas*, New York, Basic Books, 1980 ; trad. Fr. par R.-M. Vassalo-Villaneau, *Jaillissement de l'esprit*, Coll. « Champs », n°210, Paris, Flammarion, 1989.
- [Parrochia, 1992], PARROCHIA, D., *Qu'est-ce que penser / calculer ? Hobbes, Leibniz et Boole*, Coll. « Pré-textes », Paris, Vrin, 1992.
- [Parrochia, 1993], PARROCHIA, D., *Philosophie des Réseaux*, Paris, P.U.F., 1993.
- [Pautrat, 2002], PAUTRAT, J.-L., *Demain le nanomonde, voyage au cœur du minuscule*, Coll. « Le temps des sciences », Paris, Fayard, 2002.
- [Pélessier et Tête, 1995] PELISSIER, A., TÊTE, A., *Science Cognitives, Textes Fondateurs (1943 – 1950)*, Coll. « Psychologie et sciences de la pensée », Paris, P.U.F., 1995.
- [Penrose, 1994] PENROSE, R., *Shadows of the Mind. A search for the Missing Science of Consciousness*, Oxford, Oxford University Press, 1994; trad. Fr. par C. Jeanmougin, *Les ombres de l'esprit. A la recherche d'une science de la conscience*, Paris, InterEditions, 1995.
- [Pfeifer et Scheier, 1999] PFEIFER, R., SCHEIER, C., *Understanding Intelligence*, Cambridge, Massachusetts, The M.I.T. Press, 1999.
- [Pinkas, 1995] PINKAS, D., *La matérialité de l'esprit: un examen critique des théories contemporaines de l'esprit*, Coll. « Texte à l'appui / Série sciences cognitives », Paris, Editions La Découverte, 1995.
- [Platel, 1992], PLATEL, R., *Principes fondamentaux de Neurologie, de Neuroanatomie et de Neurophysiologie comparées et humaines*, Paris, SEDES, 1992.
- [Poundstone, 1992], POUNDSTONE, W., *Prisoner's Dilemma : John von Neumann, Game Theory and the Puzzle of the Bomb*, New York, Doubleday 1992 ; trad. Fr. par O. Bonis, *Le dilemme du prisonnier, von Neumann, la théorie des jeux et la bombe*, Coll. « Le Sel et le Fer », Paris, Cassini, 2003.

Bibliographie

[Pugh, 1995] PUGH, E. W., *Building I.B.M.: Shaping an Industry and Its Technology*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1995.

[Ramunni, 1989] RAMUNNI, J., *La physique du calcul, histoire de l'ordinateur*, Coll. « Histoire et Philosophie des Sciences », Paris, Hachette, 1989.

[Reyraud, 1996] REYRAUD, C., «Quelques donneurs d'idées premières», *Les Cahiers de Science et Vie : Qui a inventé l'ordinateur*, décembre 1996, n°36, pp.22-27.

[Rheingold, 2000] RHEINGOLD, H., *Tools for Thought, the History and Future of Mind-Expanded Technology*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 2000.

[Rhodes, 1996], RHODES, R., *Dark Sun, The Making of the Hydrogen Bomb*, New York, Touchstone Edition, 1996.

[Riordan et Hoddeson, 1997] RIORDAN, M., HODDESON, L., *Crystal Fire : the Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age*, New York, W. W. Norton & Company, 1997.

[Rival, 2002], RIVAL, M. *Robert Oppenheimer*, Coll. « Points Sciences », n° S149, Paris, Editions du Seuil, 2002.

[Robert, 1982] ROBERT, J-M., *Comprendre notre Cerveau*, Coll. « Points Sciences », n° S41, Paris, Editions du Seuil, 1982.

[Rojas, Hashagen et al., 2000] ROJAS, R., HASHAGEN, U., *The First Computers: History and Architectures*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 2000.

[Rose, 1984] ROSE, F., *Into the Heart of Mind*, New York, Harper & Row Publisher, 1984; trad. Fr. par J.-L. Peytavin, *L'intelligence Artificielle : Histoire d'une Recherche Scientifique*, Paris, Payot, 1986.

[Rosenblueth, Wiener et Bigelow, 1943] ROSENBLUETH, A., WIENER, N., BIGELOW, J., «Behavior, Teleology and Purpose», *Philosophy of Science*, n°10, pp. 18-24, 1943 ; trad. Fr. par J. Piquemal, « Comportement, intention et téléologie », *Les études philosophiques*, n°2, Paris, P.U.F., 1961.

[Rossi, 1989] ROSSI, J.-G., *La philosophie analytique*, Coll. « Que sais-je ? », n°2450, Paris, P.U.F., 1989.

[Russell et Norvig, 1995], RUSSEL, S. J., NORVIG, P., *Artificial Intelligence : a Modern Approach*, Englewoods Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall Inc., 1995.

[Ruyer, 1954] RUYER, R., *La Cybernétique et l'Origine de l'Information*, Coll. « Sciences de la nature », Paris, Flammarion, 1954.

[Schrödinger, 1967] SCHRÖDINGER, E., *What Is Life ?*, Cambridge, Cambridge University Press, 1967; trad. Fr. par L. Keffler, *Qu'est-ce que la vie ? De la physique à la biologie.*, Coll. « Points Sciences », n° S94, Paris, Editions du Seuil, 1993.

Bibliographie

[Searle, 1992] SEARLE, J. R., *The Rediscovery of Mind*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1992 ; trad. Fr. par C. Tiercelin, *La Redécouverte de l'Esprit*, Paris, N.R.F., 1995.

[Séris, 1994] SERIS, J.-P., *La Technique*, Paris, P.U.F., 1994.

[Serres, Farouki et al., 1997] SERRES, M., FAROUKI, N., AUFRAY, C., DOWEK, G., GANASCIA, J.-G., HOUZEL, C., JACQUARD, A., KLEIN, E., LASZLO, P., LENA, P., POIRIER, J.-P., *Le Trésor, Dictionnaire des Sciences*, Paris, Flammarion, 1997.

[Shurkin, 1996], SHURKIN, J., *Engines of the Mind, The Evolution of the Computer from Mainframes to Microprocessors*, New York, W. W. Norton & Company, 1996.

[Simon, 1981] SIMON, H.-A., *The Sciences of the Artificial*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1981 ; trad. par J.-L. Le Moigne, *Sciences des Systèmes, Sciences de l'Artificiel*, Paris, Bordas, 1991.

[Simondon, 1958] SIMONDON, G., *Du mode d'existence des objets techniques*, Coll. « L'invention philosophique », Paris, Aubier, 1958. Réédité en 1969 et 1989.

[Singh, 1999] SINGH, S., *The Code Book*, Londres, Fourth Estate Limited, 1999; trad. Fr. par C. Coqueret, *Histoire des Codes Secrets : de l'Egypte des Pharaons à l'Ordinateur Quantique*, Paris, JC Lattès, 1999.

[Spencer, 1999], SPENCER, D.D., *The Timetable of Computers. A Chronology of the Most Important People and Events in the History of Computers*, Ormond Beach, Florida, Camelot Publishing Company, 1999.

[Swokowski et Cole, 1997] SWOKOWSKI, E.W., COLE J.A., *Algebra and Trigonometry with Analytic Geometry*, Anoka-Ramsey Community College, PWS Publishing Company, 1997; trad. Fr. sous la direction de Conchita Neet-Sarqueda, *Algèbre*, Paris/Bruxelles, De Boeck Université, 1998.

[Tanenbaum, 2001] TANENBAUM, A., *Structured Computer Organization*, fourth edition, Englewood Cliff, N.J., Prentice-Hall International Inc., 1999 ; trad. Fr. par J.-A. Hernandez et R. Joly, *Architecture de l'ordinateur, Cours et exercices*, 4^{ème} Edition, Paris, Dunod, 2001.

[Taurisson, 1991] TAURISSON, A., *Du boulier à l'informatique*, Coll. « Explora », Paris, Presses Pocket, 1991.

[Tinland et al., 1994] TINLAND, F., *Ordre Biologique, Ordre Technologique*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 1994.

[Tisseau, 1996] TISSEAU, G., *Intelligence Artificielle : Problèmes et Méthodes*, Paris, P.U.F., 1996.

[Tomayko, 1998] TOMAYKO, J. E., *Computers in Spaceflight, The NASA Experience, National Aeronautics and Space Administration Office of Policy and Plans*, Contrat NASW-3714, Mars 1988. Ce document peut être consulté dans son intégralité à l'adresse Internet suivante: <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/computers/CompSPACE.html>.

[Trogemann, Nitussov et Ernst, 2001], TROGEMANN, G., NITUSSOV, A.Y., ERNST, W., *Computing in Russia: the History of Computer Devices and Information Technology Revealed*, Braunschweig/Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2001.

[Turing, 1936] TURING, A. M., « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungs-Problem », *Proceedings of the London Mathematical Society*, Series 2, 42, 230-65.

[Turing, 1948] TURING, A. M., Correspondance privée avec I. J. Good, deux lettres en date du 28 juillet 1948 (la première est manuscrite et porte l'annotation « *About 28 July 1948* », la seconde est typographiée), une lettre manuscrite en date du 18 septembre 1948.

[Turing, 1950] TURING, A. M., « Computing Machinery and Intelligence », *Mind*, Vol. LIX, n°236, 1950.

[Turing, 1951] TURING, A. M., « Can Digital Computers Think ? », discours prononcé par A. M. Turing le 15 mai 1951 sur BBC Third Program.

[Turing, 1953] TURING, A. M., « Digital Computers Applied to Games », in *Faster than thought*, Londres, Editions B.V. Bowden, 1953.

[U.S. Departement of the Army, 1994], *Field Manual No. 23-10*, Headquarters, Department of the Army, Washington D.C., Août 1994. Edition civile par Paladin Press, Boulder, Colorado, 1994.

[Van Hogg, 1999], VAN HOGG, I., *German Secret Weapons of the Second World War*, Londres, Greenhill Books Lionel Leventhal Limited, 1999.

[Vandeginste et al. 1987] VANDEGINSTE, P., BELAÏD, A., BRIOT, M., CHATILA, R., COLMERAUER, A., CORDIER, M.-O., FALLER, B., GALLAIRE, H., GANASCIA, J.-G., HATON, J.-P., KAYSER, D., KODRATOFF, Y., LAUMOND, J.-P., MARIANI, J., PITRAT, J., PRAJOUX, R., ROBERT de SAINT VINCENT, A., SANSONNET, J.-P., *La Recherche en Intelligence Artificielle*, Coll. « Points Sciences », n° S52, Paris, Editions du Seuil, 1987.

[Varela, 1988] VARELA F. J., *Invitation aux Sciences Cognitives*, Coll. « Points Science », n° S111, Paris, Editions du Seuil, 1996.

[Von Neumann, 1945] VON NEUMANN, J., « First Draft of a Report on the EDVAC », Document non publié, Moore School of Electrical Engineering, Université de Pennsylvanie, Philadelphie, 30 juin 1945.

[Von Neumann, 1951] VON NEUMANN, J., « The General and Logical Theory of Automata » in *Cerebral Mechanisms in Behavior*, New York, Lloyd A. Jeffries ed., 1951; trad. Fr. par J.-P. Auffrand, *Théorie Générale et Logique des Automates*, Seyssel, Editions Champ Vallon, 1996.

[Von Neumann, 1958] VON NEUMANN, J., *The Computer and the Brain*, New Haven, Yale University Press, 1958 ; trad. Fr. par P. Engel, *L'ordinateur et le cerveau*, Coll. « Champs », Paris, Flammarion, 1996.

Bibliographie

[Wagner, 1998] WAGNER, P., *La machine en Logique*, Paris, P.U.F., 1998.

[Waldrop, 2001], WALDROP, M., *The Dream Machine : J.C.R. Licklider and the Revolution that Made Computing Personal*, New York, Viking Penguin, 2001.

[Watson et Petre, 1990] WATSON, TH. J., PETRE, P., *Father, Son & Co.*, New York, Bentam Press, 1990, pp. 11-13.

[Weizenbaum, 1976] WEIZENBAUM, J., *Computer Power and Human Reason*, New York, W.H. Freeman and Compagny, 1976.

[Wiener, 1948], WIENER, N., *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, Ninth printing, 1999.

[Williams, 1997] WILLIAMS, M. R., *History of Computing Technology*, Los Alamitos, Cal., I.E.E.E. Computer Society Press, 1997.

[Wurster, 2002], WURSTER, C., *Computers, l'histoire illustrée des ordinateurs*, Köln, Taschen, 2002.

Liste des articles

Abramson N., « Development of the ALOHANET », in *I.E.E.E. Transactions on Information Theory*, vol. IT-31, n°2, pp. 119-123, mars 1985.

Armer P., «SHARE-A Eulogy to Cooperative Effort », in *I.E.E.E. Annals of the History of Computing*, vol. 2, n°2, pp. 122-129, avril 1980.

Backus J. W. et Al., « The FORTRAN Automatic Coding System », in *Proceedings of the Western Joint Computer Conference*, Los Angeles, février 1957.

Backus J. W., « Automatic Programming: Properties and Performance of FORTRAN Systems I and II », in *Proceedings of the Symposium on the Mechanisation of Thought Processes*, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, U.K., novembre 1958.

Backus J. W., « The history of FORTRAN I, II and III. », in *Proceedings of the First ACM SIGPLAN Conference on History of Programming Languages*, Los Angeles, 1981, (Section 1.1. Attitudes about Automatic Programming in the 1950s). Une version numérique de ce document peut être directement consultée en ligne à cette U.R.L.: <http://www.stanford.edu/group/mmdd/SiliconValley/Backus/backus.html>. Indiquons que les pages de cet article ne sont pas numérotées.

Bardeen, J., Brattain, W. H., « Physical Principles involved in Transistor Action », in *Physical Review*, vol. 75, n° 8, pp. 1208-1225, avril 1949.

Brand S., « S P A C E W A R, Fanatic Life and Symbolic Death Among the Computer Bums », in *Rolling Stone*, n°123, 7 décembre 1972.

Bush V., Hazen H., « *The Differential Analyser, A new Machine for Solving Differential Equations* », in *Journal of the Franklin Institute*, vol. 212, n°4, pp. 447-488, octobre 1931.

Campbell-Kelly M., « The Development of Computer Programming in Britain (1945-1955) », in *Annals of the History of Computing*, vol. 4, n°2, pp. 121-139, 1982.

Cerf V. G., Kahn R. E., « A Protocol for Packet Network Intercommunication », in *I.E.E.E. Transactions on Communication*, vol. Com. 22, n° 5, mai 1974. Article consultable et téléchargeable au format PDF à l'adresse suivante : <http://www.ics.uci.edu/~xwy/ics243c-s06/papers/ck74.pdf>.

Cerf V. G., « A Partial Specification of an International Transmission Protocol », *First Pass Draft of International Transmission Protocol*, Article non publié, 1973. Ce document est consultable sur le site de l'Université du Texas à Austin : http://www.cs.utexas.edu/users/chris/DIGITAL_ARCHIVE/TCPIP/Cerf.pdf

Chiou S., Music C., Sprague K, Wahba R, « A Marriage of Convenience : the Founding of the MIT Artificial Intelligence Laboratory », *Structure of Engineering Revolutions, Project History Rough Draft*, M.I.T. A.I. Lab., 5 décembre 2001.

Colebrook F. M., « Computer Resurrection », in *The Bulletin of the Computer Conservation Society*, n°9, pp. 11-14, 1994.

Cohen, B. I., « Howard Aiken and the Dawn of the Computer Age », in [Rojas, Hashagen et al., 2000], pp. 107-120.

Comrie L.J., « The Application of Commercial Calculating Machines to Scientific Computation », in *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, vol.2, n°16, pp.149-159, 1946.

Connick J., « ...And Then There Was Apple », in *Call-A.P.P.L.E.*, n°24, octobre 1986.

Corbató F. J., Merwin-Daggett M., Daley R., « An Experimental Time-Sharing System », in *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference*, San Francisco, *American Federation of Information Processing Societies*, vol. 21, pp. 335-344, 1962.

Courant R., Friedrichs K., Lewy H., « Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik », in *Mathematische Annalen*, vol. 100, n° 1, pp. 32–74, 1928.

Davies D. W., « Early Thoughts on Computer Communications », in *The Computer Communication Revolution Multi-Disciplinary Retrospective and Prospective*, édité par S. Ramani et Pramode K. Verma, I.C.C.C. Press, pp. 189-193.

Delahaye J.-P., « Jusqu'où l'ordinateur calculera-t-il ? », in *Pour la Science*, n°283, pp. 100-105, mai 2001.

Dennard R. H., Gaensslen F. H., Hua-Nien Yu H. , Rideout V. L., Bassous E., LeBlanc A. R., « Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions », in *I.E.E.E. Journal of Solid-State Circuits*, vol. SC-9, pp. 256-268, octobre 1974.

Faggin F., « *The Birth of the Microprocessor - My Recollections* », article présenté lors du *Microprocessor Forum* de San José, Californie, 15 octobre 2001. Une retranscription de l'intégralité de la conférence prononcée par F. Faggin est disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://www.intel4004.com/speech.htm>.

Felker J. H., « Performance of TRADIC Transistor Digital Computer », in *Computers and Automation*, vol. 4, n°1, p. 16, 1955.

Finney J. W., « Senators Shocked by Resumption of Raids in North Vietnam », in *New York Times*, 3 mai 1970.

Ford K. W., « *Working (and Not Working) o Weapons* », in *Radiations*, pp. 5-7, printemps 2005. Ce texte est directement disponible en ligne à l'adresse suivante : http://www.sigmapisigma.org/radiations/2005/ken_ford_spring05.pdf

Forrester J. W. et Al., « A Plan for Digital Information-Handling Equipment in the Military Establishment », in *Project DIC 6345*, M.I.T. *Servomechanisms Laboratory*, 14 septembre 1948.

Fuller C. S., J. A. Ditzenberger, « Diffusion of Donor and Acceptor Element into Germanium », in *Physical Review*, vol. 86, *Second Series*, pp. 136-137, avril 1952.

Gates W. H., « An Open Letter to Hobbyists », in *Computer Notes*, 3 février 1976.

Gernelle F., « La naissance du premier micro-ordinateur, le MICRAL-N », in *2ème Colloque de l'Histoire de l'Informatique*, C.N.A.M., p. 1, Paris, 24 avril 1990.

Goetz M., « *Memoirs of a Software Pioneer* », in *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 24, n°1, pp. 43-56, janvier-mars 2002.

Gruenberger F. J., « A Short History of Digital Computing in Southern California », in *I.E.E.E. Annals of the History of Computing*, vol. 2, n°3, pp. 246-250, juillet-septembre 1980.

Gustafson J. L., « An FPS Forerunner ; The Atanasoff-Berry Computer », in *FPS Technical Journal Checkpoint*, novembre 1985 ; document disponible en ligne à l'U.R.L. suivante : <http://www.scl.ameslab.gov>.

Gustafson J. L., « The Reconstruction of the Atanasoff-Berry Computer. », in [Rojas, Hashagen et al., 2000], pp. 91-106.

Harris J. R., « The Earliest Solid-State Digital Computers », in *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 21, n°4, pp.49-54, octobre 1999.

Hartree D. R., « U.S. Development in Calculating Machines », document disponible en ligne au http://www.alanturing.net/turing_archive/archive/1/138/L38-001.html.

Hartree D. R., « The ENIAC, an Electronic Calculating Machine », in *Nature*, vol. 158, n°4015, pp. 500- 506, octobre 1946.

Hartree D. R., « Calculating Machines: Recent and Prospective Developments and Their Impacts on Mathematical Physics », in *Calculating Instruments and Machines, Charles Babbage Institute Reprint Series for the History of Computing*, vol. 6, M.I.T. Press and Tomash Publishing, 1984. Ce texte est consultable en ligne sur le site de la *School of Mathematics and Statistics* de l'Université Ecosaise de St Andrews : <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Mathematicians/Hartree.html>

Heart F., Kahn R., Ornstein S., Crowther W., Walden D., « The Interface Message Processor for the ARPA Computer Network », in *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference, American Federation of Information Processing Societies*, pp.551-567, 1970.

Hoerni J. A., « Planar Silicon Transistors and Diodes », in *Fairchild Semiconductor Corporation Technical Articles and Papers*, TP-14, 1961.

Knight K. E., « Changes in Computer Performance », in *Datamation*, vol. 12, n°9, pp. 40-54, septembre 1966.

Knight K. E., « Evolving Computer Performance 1963-1967 », in *Datamation*, vol. 14, n°1, pp. 31-35, janvier 1968.

Knuth D. E., Trabb Pardo L. I., « The Early Development of Programming Languages. », in *Encyclopedia of Computer Science and Technology*, Marcel Dekker, New York, pp.419-96, 1977.

Lee J.A.N., « About This Issue », in *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 14, n° 1, pp. 3-4, janvier-mars 1992.

Licklider J.C.R., « Man-Computer Symbiosis », in *I.R.E. Transactions on Human Factors in Electronics*, vol. HFE-1, p. 4-11, mars 1960.

Licklider J.C.R., Clark W. A., « Online Man-Computer Communication », in *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference*, San Francisco, vol. 21, pp. 113-128, mai 1962.

Lieber C., « Puces lilliputiennes », in *Pour la Science*, n°290, pp. 60-65, décembre 2001.

Markoff J., Taylor R., « An Internet Pioneer Ponders the Next Revolution », in *The New York Times on the Web*, 20 décembre 1999.

McCarthy J., « Reminiscences on the History of Time-Sharing », in *I.E.E.E. Annals of the History of Computing*, vol. 14, n° 1, pp. 19-24, janvier-mars 1992.

McCulloch W.S., Pitts W., « A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity », in *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Oxford, Elsevier Sciences, vol. 5, pp. 115-133, 1943; trad. Fr in [Pélissier et Tête, 1995], pp. 57-91.

Moore G. E., « Cramming More Components Onto Integrated Circuits », in *Electronics Magazine*, volume 38, n°8, p. 115, 19 avril 1965.

Newman T., « Computer Resurrection », in *Bulletin of the Computer Conservation Society*, n°9, pp. 11-14, printemps 1994.

Noyce R. N., « Microelectronics : Introducing an Issue on the Microelectronic Revolution, in which Putting Large Numbers of Electronic Elements on Silicon "Chips" has Profoundly Increased the Capabilities of Electronic Devices », in *Scientific American*, vol. 23, n°3, pp. 63-69, septembre 1977.

Ornstein S. M., Heart F. E., Crowther W.R., Russell S.B., Rising H.K. et Michel A., « The Terminal IMP for the ARPA Computer Network », in *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference, American Federation of Information Processing Societies*, vol. 40, pp. 243-254, 1972.

Owens L., « Where Are We Going, Phil Morse ? Changing Agendas and the Rhetoric of Obviousness in the Transformation of Computing at MIT, 1939-1957. », in *I.E.E.E. Annals of the History of Computing*, vol. 18, n° 4, p. 35, 1996.

Pitrat J., in « La naissance de l'intelligence artificielle », in [Vandeginste et al. 1987], pp. 19-49.

Pouzin L., « Cyclades, ou comment perdre un marché », in *La Recherche*, n°328, pp. 32-37, février 2000.

Regitz W., Karper J., « A Three Transistor Cell, 1024 bits, 500NS MOS RAM », in *I.E.E.E. Journal of Solid-State Circuits*, vol. 5, n°5, pp. 181 – 186, octobre 1970.

Riordan M., Hoddeson L., Herring C., « The Invention of the Transistor », in *Reviews of Modern Physics*, vol. 70, n° 2, avril 1998.

Ritchie D. M., « The Evolution of the Unix Time-sharing System », in *AT&T Bell Laboratories Technical Journal*, vol. 63, n° 8, (partie 2), pp. 1577-1594, octobre 1984.

Robert E. H., Yates W., « Altair 8800 Computer Part I. The most powerful minicomputer project ever presented – can be built for under \$400 », in *Popular Electronics*, vol. 7, n°1, pp. 33-38, janvier 1975.

Roberts L. G., Marill T., « Toward A Cooperative Network Of Time-Shared Computers », in *Proceedings of the American Federation of Information Processing Societies (A.F.I.P.S.)*, novembre 1966. Ce document peut être consulté en ligne à l'adresse suivante: <http://www.packet.cc/files/toward-coop-net.html>

Rosenblueth A., Wiener N., Bigelow J., « Behavior, Purpose and Teleology », in *Philosophy of Science*, Baltimore, Williams & Wilkins, vol. X, pp. 18-24, 1943; trad. Fr. par J. Piquemal, « Comportement, intention et téléologie », in *Les études philosophiques*, n°2, avril-juin 1961.

Ross I. M., « The Foundation of the Silicon Age », in *Bell Labs Technical Journal*, vol. 2, n°4, pp. 3-14, automne 1997

Ryder R., « The "Friendly Effect" In Early Transistors », in *Southwest Museum Of Electricity And Communications Journal*, vol. 2, n°1, décembre 1990.

Salsberg A. P., « The Home Computer is Here », in *Popular Electronics*, Editorial, p. 4, janvier 1975.

Shallet S., « Electronic to Aid Weather Figuring : Scientists Tell Weather Bureau, Army and Navy of Calculator Having Vast Possibilities », in *The New York Times*, p. 12, 11 janvier 1946.

Shannon, C. E., « A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits », in *The Journal of Symbolic Logic*, vol. 4, n° 2, p. 103, juin 1939.

Shannon, C. E. « *Mathematical Theory of the Differential Analyser* », *Journal of Mathematics and Physics*, n° 20, pp. 337-354, 1941.

Shannon, C. E. « A Mathematical Theory of Communication », in *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, n°3 et 4, pp. 379-423 et 623-656, juillet et octobre 1948.

Stibitz G. R., « A Statement Concerning the Future Availability of a New Computing Device », in *Applied Mathematics Panel*, N.D.R.C., 12 novembre 1943; cité in [Goldstine, 1972], p. 184.

Strachey C., « Time Sharing in Large Fast Computers », in *Proceedings of the International Conference on Information Processing*, UNESCO, pp. 336-341, juin 1959.

Taylor R., « An Internet Pioneer Ponders the Next Revolution », *The New York Times on the Web*, 20 décembre 1999.

Titus J., « The Mark-8 Minicomputer... being some memories of the machine from its designer, Jon Titus », document en trois parties (*Part 1: The Beginning; Part 2: The Design; Part 3: The After Effect*), consultable à l'adresse suivante: <http://www.his.com/~jlewczyk/adavie/mark8b.html>.

Tukey J. W., « The Teaching of Concrete Mathematics », in *American Mathematical Monthly*, vol. 65, n°1, pp 1-9, janvier 1958.

Turing, A. M., « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungs-Problem », in *Proceedings of the London Mathematical Society*, Series 2, vol. 42, pp. 230-265, 1936-1937.

Turing A. M., « A method for the calculation of the zeta-function », in *Proceedings of the London Mathematical Society*, ser. 2, vol. 48, 1943.

Turing, A. M., « Computing Machinery and Intelligence », in *Mind*, vol. LIX, n°236, pp.433-460, 1950.

Wheelon A. D., « Corona: The First Reconnaissance Satellites. Based on remarkable scientific and technical achievements, a series of 145 American spy satellites provided strategic information that helped stabilize East-West relations during the cold war. », in *Physics Today*, pp. 24-30, février 1997.

Williams F. C., Kilburn T., « A Storage System for Use with Binary-Digital Computing Machines », in *Proceedings of I.E.E.E.*, vol. 96, part. 2, n°30, pp. 81-100, mars 1949.

Williams F. C., Kilburn T., « The University of Manchester Computing Machine », in *Review of Electronic Digital Computers, Joint A.I.E.E.-I.R.E. Computer Conference*, pp. 57-61, 1953.

Williams F. C., « Early Computers at Manchester University », in *The Radio and Electronic Engineer*, vol. 7, n°45, pp. 237-331, juillet 1975.

Zuse, K., « Der Plankalkül », in *Berichte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung*, n°63, Sankt Augustin, 1972.