



Anthony Basille

Étude de la présence et modélisation des comportements de collaboration dans un jeu sérieux collaboratif

BASILLE, Anthony. *Étude de la présence et modélisation des comportements de collaboration dans un jeu sérieux collaboratif [en ligne]*. Sous la codirection d'Élise LAVOUÉ et d'Audrey SERNA. Thèse de doctorat : Informatique. Lyon : Université Jean Moulin Lyon 3, 2025.

Disponible sur : <https://www.theses.fr/2025LYO30011>



Document diffusé sous le contrat *Creative Commons* « **Attribution – Pas d'utilisation commerciale - Pas de modification** »

Vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.



N° d'ordre NNT : 2025LYO30011

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ JEAN MOULIN LYON 3

Membre de la ComUE Université de Lyon

École doctorale n° 512 - InfoMaths, Informatique, mathématiques

Discipline : **Informatique**

Soutenue publiquement le 6 mai 2025, par

Anthony BASILLE

Étude de la présence et modélisation des comportements de collaboration dans un jeu sérieux collaboratif

Laboratoire de recherche :

LIRIS, Laboratoire d'informatique en image et systèmes d'information

Codirectrices de thèse : **Mme Élise LAVOUÉ** et **Mme Audrey SERNA**

Devant le jury composé de :

Mme Élise LAVOUÉ

Professeure des universités,
université Jean Moulin Lyon 3. Codirectrice de thèse

Mme Audrey SERNA

Maîtresse de conférences habilitée à diriger des recherches,
institut national des sciences appliquées de Lyon, Villeurbanne. Codirectrice de thèse

M. Christophe KOLSKI

Professeur des universités,
université polytechnique Hauts-de-France, Valenciennes. Président du jury

Mme Céline CLAVEL

Maîtresse de conférences,
université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette. Rapporteure

M. Jean-Pierre JESSEL

Professeur des universités,
université de Toulouse. Rapporteur

M. Geoffrey GORISSE

Maître de conférences,
École nationale supérieure d'arts et métiers, Paris. Examineur

Remerciements

*Je remercie tous ceux qui m'ont aidé,
et je pardonne à ceux qui m'ont
demandé : "Alors, tu la finis quand,
cette thèse ?"*

Un doctorant élément.

Rédiger cette thèse a été un long chemin, semé d'incertitudes, de remises en question et de moments de doute. Mais c'est aussi un parcours qui laissent une empreinte bien au-delà du cadre académique. Positif, négatif, un peu des deux.

Je tiens d'abord à remercier mes directrices de thèse. Même si ça n'a pas toujours été facile, elles ont cru en moi dès le début, bien avant que j'aie moi-même cette conviction. Leur encadrement a mêlé bienveillance et exigence, liberté et structure. Malgré mes difficultés avec le cadre académique et mon fonctionnement parfois (souvent ?) peu conventionnel, elles ont su m'accompagner et me guider avec patience. Cette thèse a été un défi sur bien des plans, et sans leur soutien, elle n'aurait sans doute pas abouti.

Je remercie également les membres du jury d'avoir pris le temps de lire mon travail, d'en avoir discuté avec rigueur et bienveillance, et d'avoir contribué, par leurs remarques et leurs questions, à enrichir cette soutenance et la réflexion autour de cette thèse.

À mes collègues du laboratoire, et en particulier Youri et Enzo, je veux dire un immense merci. Vous êtes devenus bien plus que des collègues - de vrais amis. Votre soutien quotidien, votre bonne humeur et ces moments de légèreté dans un cadre parfois pesant ont été précieux (et nécessaire). Cette thèse aurait été bien différente sans vous, et je suis heureux d'avoir partagé ces années à vos côtés, ainsi que nos week-end et vacances.

Un merci tout particulier à Pauline et Guillaume, dont la présence a compté chaque jour. Toujours là, toujours présents, toujours un mot, une attention, un moment pour me faire souffler et penser à autre chose. Votre amitié a compté plus que je ne saurais l'exprimer ici.

À Lola, qui a su, jour après jour, prendre le temps de m'écouter, me remotiver et m'apporter ce soutien dont j'avais besoin dans les moments de fatigue et de doute, ou quand j'étais complètement perdu (ça a pu m'arriver quelques fois disons...).

À ma famille et mes amis d'enfance, dont la présence, même discrète, m'a apporté un équilibre essentiel. On oublie parfois à quel point ces liens de toujours sont importants dans les épreuves longues comme celle-ci, et je suis content de pouvoir compter sur vous.

Enfin, à tous les groupes d'amis rencontrés à travers mes différentes passions : vous avez

été un espace d'évasion nécessaire. Ces moments où la thèse disparaissait complètement ont été une bouffée d'air essentielle pour tenir jusqu'au bout.

Cette thèse a été un apprentissage à bien des niveaux, et si j'en ressors grandi, c'est en grande partie grâce aux personnes qui ont jalonné ce parcours. Alors, à vous tous : merci.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Motivations personnelles	1
1.1.1	Le numérique comme extension de la société	1
1.1.2	Approche phénoménologique des environnements virtuels	2
1.1.3	Psychologie et cognition : l’incarnation numérique	3
1.1.4	Collaboration et socialisation dans les environnements virtuels	4
1.1.5	Vers une compréhension holistique	5
1.2	Contexte de la thèse : BODEGA	6
1.3	Contexte général de la recherche	7
1.4	Objectif de recherche	7
1.5	Structure du mémoire de thèse	8
2	État de l’art	11
2.1	Les environnements virtuels collaboratifs	12
2.1.1	Caractéristiques des environnements	12
2.1.2	Vers une approche intégrative	12
2.2	La collaboration	13
2.2.1	Processus collaboratif	14
2.2.2	Processus de régulation	16
2.3	La présence	16
2.3.1	Présence spatiale	18
2.3.2	Présence de soi	18
2.3.3	Présence sociale	18
2.4	Le sentiment de présence dans les jeux sérieux	20
2.5	Méthodologie de sélection	20
2.6	Description générale des études	21
2.6.1	Connaissances ciblées	21
2.6.2	Participants	22
2.6.3	Environnements et modalités d’interaction	22
2.7	Méthodes de mesure	23
2.8	Facteurs influençant le sentiment de présence	25
2.8.1	Profil de l’utilisateur	25
2.8.2	Environnement technologique	26
2.8.3	Rôle des utilisateurs	27
2.9	Impacts du sentiment de présence dans les jeux sérieux	27
2.9.1	Dimension cognitive	27
2.9.2	Comportements des apprenants	28

2.9.3	Motivation et émotions	28
2.10	Discussion	29
2.10.1	Approches et mesures	29
2.10.2	Facteurs d'influence	30
2.10.3	Effets et impacts	31
2.10.4	Présence sociale dans les jeux sérieux	32
2.11	Conclusion	33
2.12	Questions de recherche	33
3	Impact du point de vue sur la présence sociale et les processus de collaboration dans un jeu sérieux collaboratif	37
3.1	Introduction	37
3.2	État de l'art	38
3.2.1	Processus collaboratifs	38
3.2.2	Point de vue	39
3.3	Questions de recherche	40
3.4	Description du prototype Sous Pression	40
3.5	Étude	42
3.5.1	Conditions expérimentales	42
3.5.2	Participants	42
3.5.3	Procédure	43
3.5.4	Collecte des données/Enregistrement	43
3.5.5	Analyse vidéo et schémas de codage	43
3.6	Résultats	45
3.6.1	Impact du point de vue sur la présence sociale perçue	45
3.6.2	Analyse des processus collaboratifs	46
3.7	Discussion	47
3.7.1	Point de vue et présence sociale	47
3.7.2	Point de vue et processus collaboratifs	48
3.7.3	Limitations	49
3.8	Proposition d'évolution du jeu sérieux collaboratif	49
3.8.1	Design final	50
3.8.2	Intégration du point de vue à la première personne	51
3.8.3	Ajout de fonctionnalités et de mécaniques de jeu	51
3.8.4	Modification du design	52
3.9	Conclusion	53
4	Impact des modalités de communication sur la présence sociale et les processus de régulation dans un jeu collaboratif	55
4.1	Introduction	55
4.2	État de l'art	56
4.2.1	Environnements d'apprentissage collaboratif	56
4.2.2	Processus de régulation	57
4.2.3	Présence sociale	58
4.3	Questions de recherche	59
4.4	Étude	60
4.4.1	Conditions expérimentales	60

4.4.2	Participants	60
4.4.3	Procédure	60
4.4.4	Données recueillies	60
4.4.5	Indicateurs	61
4.5	Résultats	63
4.5.1	Impact des modalités de communication sur la présence sociale . . .	63
4.5.2	Impact des modalités de communication sur la régulation	65
4.5.3	Corrélation entre la présence sociale et la régulation	68
4.6	Discussion	70
4.6.1	Condition audio	70
4.6.2	Condition vidéo	71
4.6.3	Condition chat	72
4.6.4	Implications pour la conception	74
4.7	Conclusion	75
5	Modélisation des comportements de collaboration à partir des traces d'interaction et de la discussion	77
5.1	Introduction	77
5.2	Méthodologie d'analyse	79
5.2.1	Analyse de fréquence	79
5.2.2	Analyse des réseaux de co-occurrence	79
5.2.3	Analyse des séquences avec les chaînes de Markov	80
5.3	Étude	81
5.3.1	Analyse multimodale	81
5.3.2	Analyse vidéo et schémas de codage	82
5.4	Résultats	83
5.4.1	Analyse de fréquence	83
5.4.2	Analyse des réseaux de co-occurrence	84
5.4.3	Analyse des chaînes de Markov	86
5.4.4	Modélisation visuelle des dynamiques collaboratives	89
5.5	Discussion	94
5.5.1	Analyse de fréquence	94
5.5.2	Réseaux de co-occurrence	94
5.5.3	Chaîne de Markov	95
5.5.4	Modélisation visuelle des dynamiques collaboratives	95
5.6	Conclusion	96
6	Modélisation approfondie de la collaboration : comparaison inter-condition à l'aide de techniques d'apprentissage automatique	99
6.1	Introduction	99
6.2	Méthodologie	100
6.2.1	Reconnaissance et transcription vocales	100
6.2.2	Classification automatique des énoncés	101
6.2.3	Réplication des analyses multi-niveaux	101
6.3	Analyse inter-groupes : comparaison globale des modalités	102
6.3.1	Analyse comparative des fréquences	102
6.3.2	Analyse comparative des réseaux de co-occurrence	103

6.3.3	Analyse des transitions temporelles entre activités avec les chaînes de Markov	106
6.3.4	Modélisation visuelle des dynamiques collaboratives	109
6.4	Discussion	110
6.4.1	Analyse de fréquence	110
6.4.2	Analyse des réseaux de co-occurrence	111
6.4.3	Analyse des chaînes de Markov	112
6.4.4	Modélisation visuelle des dynamiques collaboratives	113
6.5	Analyse intra-groupes : étude détaillée des dynamiques collaboratives . . .	114
6.5.1	Analyse de fréquence intra-modalité	115
6.5.2	Analyse des réseaux de co-occurrence	116
6.5.3	Analyse des chaînes de Markov	118
6.6	Discussion	119
6.6.1	Divergence des patterns collaboratifs entre modalités	120
6.6.2	Structure relationnelle des interactions	120
6.6.3	Dynamique temporelle des interactions	121
6.6.4	Conclusion	121
7	Conclusion	123
7.1	Synthèse et contributions	123
7.2	Implications pratiques	124
7.2.1	Choix du point de vue	124
7.2.2	Modalités de communication	125
7.2.3	Support à la régulation	125
7.2.4	Analyse et feedback des interactions	126
7.2.5	Prise en compte des différents style de collaboration dans la conception	126
7.3	Limites et perspectives futures	127
7.3.1	Limites méthodologiques	127
7.3.2	Limites techniques	129
7.3.3	Perspectives de recherche	130
7.3.4	Conclusion	133
	Bibliographie	135

Introduction

*Le savoir est une arme, chargez-la
avec des jeux sérieux.*

Un doctorant chargé à bloc.

L'avènement du numérique a marqué un tournant décisif dans l'histoire de l'humanité, révolutionnant la manière dont nous interagissons, travaillons, apprenons et nous divertissons. Au cœur de cette transformation, les environnements virtuels ont émergé comme des espaces de convergence entre réalité et virtualité, où les frontières entre le soi physique et le soi numérique commencent à s'estomper. Ces environnements, allant des jeux vidéo au métavers, ne sont pas seulement des extensions de notre réalité mais proposent un nouvel univers parallèle où l'incarnation, la présence et la collaboration prennent une nouvelle dimension.

1.1 Motivations personnelles

1.1.1 Le numérique comme extension de la société

L'émergence d'internet a été un tournant majeur, redéfinissant tout les aspects de la société, de notre environnement, nos interactions sociales, économiques, culturelles, mais aussi de nous même. Cette révolution numérique a débuté par la mise en réseau des informations, permettant un accès instantané à une quantité inimaginable de connaissances. Les bibliothèques du monde entier, autrefois accessible uniquement de façon physique, se sont virtualisées, offrant à chacun la possibilité d'y accéder. L'avènement des réseaux sociaux a marqué la seconde vague de cette révolution numérique, transformant les modes de communication interpersonnelle. Si, traditionnellement, les interactions humaines étaient limitées par la distance géographique, ou bien la synchronicité et une caractéristique physique (la voix, pour les téléphones), les réseaux sociaux ont aboli ces frontières, permettant aux individus de se connecter, de partager et de communiquer indépendamment de leur localisation physique, ou même de leur propre corps. Cette transformation a eu un impact profond sur la structure même des relations sociales, favorisant l'émergence de communautés basées sur des intérêts communs plutôt que sur la proximité géographique. Toutefois, cet élargissement du cercle social a également introduit de nouveaux défis, notamment

en termes de gestion de l'identité numérique, et de cette dualité entre le soi réel et le soi "virtuel". Parallèlement à l'évolution d'internet et des réseaux sociaux, les jeux vidéo ont offert une autre forme d'évasion, similaire à celle que les livres ont proposée pendant des siècles. Tout comme la littérature permet de s'immerger dans des univers différents grâce à notre "imagination" (représentation interne), les films ajoutant la vision et le son, les jeux vidéo offrent une échappatoire de la réalité, mais avec une dimension interactive sur ce monde virtuel, élément qui est au centre de nombreux courant philosophique et amènera de nombreuses réflexions sur l'expérience vécu. Les joueurs ne sont plus de simples observateurs mais deviennent des acteurs au sein de ces mondes alternatifs, explorant des territoires imaginaires, accomplissant des quêtes et interagissant avec d'autres joueurs. Cette quête d'immersion et d'évasion a atteint un nouveau palier avec l'émergence des environnements virtuels avancés, propulsés par les avancées en réalité virtuelle, allant jusqu'au métavers. Ces espaces numériques constituent une évolution naturelle des jeux vidéo, offrant des univers plus vastes, plus riches et plus interactifs. Dans le métavers, les frontières entre le monde réel et le monde virtuel s'estompent, renforcé par la multisensorialité des expérience vécu, et par extension les frontière entre le soi réel et le soi virtuel. De même, la réalité mixte, et les ajouts proposés par l'Apple Vision, permettent une simulation de la matérialisation dans notre propre environnement d'une personne géographiquement éloigné, et une interaction similaire à une vraie interaction (visibilité du corps, des mouvements, voix, ainsi que notre propre environnement), rendant la frontière entre le réel et le virtuel de plus en plus floue, et forçant une remise en question de ce que représente ces notions, dès lors qu'elles peuvent être mélangées (Apple Vision), ou bien qu'il est possible de passer davantage de temps dans le monde "virtuel".

1.1.2 Approche phénoménologique des environnements virtuels

La philosophie, en particulier la phénoménologie, offre une perspective unique pour interroger la nature de notre être au sein des environnements virtuels. La phénoménologie, telle que développée par Edmund Husserl et approfondie par Martin Heidegger, Maurice Merleau-Ponty, et d'autres, se concentre sur l'étude des expériences vécues, des phénomènes tels qu'ils se présentent à la conscience. Dans le contexte des environnements virtuels, cette approche invite à une exploration profonde de l'expérience de "présence", c'est-à-dire la sensation d'être dans un monde non physique comme si on y était physiquement. Cette sensation de présence est intensifiée par l'augmentation continue de la qualité et de l'immersion offerte par les technologies de réalité virtuelle, brouillant les frontières entre le réel et le virtuel. À mesure que les environnements virtuels deviennent plus sophistiqués, ils offrent des expériences qui rivalisent avec la richesse sensorielle du monde physique. Cette évolution soulève des questions phénoménologiques cruciales concernant la nature de notre expérience du "monde" et de notre place en tant qu'êtres conscients au sein de celui-ci. La qualité accrue des environnements virtuels enrichit non seulement notre expérience sensorielle mais modifie également notre perception de l'espace, du temps et de nous-mêmes. En investissant de plus en plus de temps dans ces mondes numériques, nous commençons à voir une dilution des distinctions traditionnelles entre ce qui est considéré comme réel et ce qui ne l'est pas, remettant en question la primauté de l'expérience physique dans la constitution de notre sens du réel. La phénoménologie nous encourage à réfléchir sur la manière dont ces expériences virtuelles influencent notre compréhension de

l'identité et du soi. Alors que nous naviguons dans ces espaces numériques à travers des avatars, nous sommes confrontés à la plasticité de l'identité : dans le virtuel, nous pouvons adopter des identités multiples et diverses, expérimenter différentes façons d'être. Cette multiplicité des "moi" virtuels invite à une réflexion plus large sur la construction de l'identité dans un monde de plus en plus numérisé. La possibilité de remodeler continuellement notre avatar interroge la permanence et la continuité du soi, concepts fondamentaux en philosophie de l'identité. En outre, la phénoménologie des environnements virtuels met en lumière la relation entre le corps physique et l'avatar virtuel. Merleau-Ponty, avec sa notion de "corps propre" [1] comme fondement de l'expérience, suggère que notre compréhension du monde est intrinsèquement liée à notre corporalité. Dans un environnement virtuel, cette corporalité est à la fois présente et absente : présente dans la sensation de contrôler un avatar, absente dans la dissociation physique du corps réel. Cette dualité soulève des questions sur la manière dont l'expérience virtuelle affecte notre perception corporelle et notre rapport au monde. La distinction de plus en plus floue entre réel et virtuel, exacerbée par le temps passé dans ces environnements alternatifs, pose la question de l'impact à long terme sur notre conception de la réalité. La phénoménologie nous pousse à examiner comment ces expériences modifient notre rapport au monde, à autrui et à nous-mêmes, remettant en cause les fondements de notre expérience vécue. En fin de compte, l'exploration phénoménologique des environnements virtuels nous invite à repenser notre conception de l'être, de la présence et de la réalité elle-même, dans un monde où les frontières entre le virtuel et le réel deviennent de plus en plus perméables.

1.1.3 Psychologie et cognition : l'incarnation numérique

Dans le domaine de la psychologie et des sciences cognitives, la notion d'incarnation, appréhendée à travers le prisme de la cognition incarnée, offre une fenêtre sur la manière dont nous habitons et interagissons dans les mondes virtuels. La théorie de la cognition incarnée, popularisée par des chercheurs comme George Lakoff et Mark Johnson dans leur ouvrage "Philosophy in the Flesh" [2], suggère que nos processus mentaux sont profondément ancrés dans les interactions du corps avec son environnement. Francisco Varela, Evan Thompson, et Eleanor Rosch [3] ont également exploré cette notion dans "The Embodied Mind", soulignant comment la cognition est inséparable de la corporalité.

Cela signifie que la manière dont nous pensons, ressentons et comprenons le monde est intrinsèquement liée à notre corporalité. Dans les environnements virtuels, cette corporalité est représentée par des avatars, qui deviennent les extensions numériques de notre être. Antonio Damasio, dans ses travaux sur le rôle du corps dans le processus émotionnel et décisionnel, notamment dans "The Feeling of What Happens" [4], renforce cette idée en montrant comment le corps et le cerveau forment une unité indissociable dans la construction de l'expérience consciente. Ces perspectives nous aident à comprendre comment les avatars dans les environnements virtuels permettent aux utilisateurs d'agir, de percevoir et d'interagir au sein de ces espaces numériques, créant une expérience immersive qui modifie notre engagement avec le virtuel. L'incarnation à travers les avatars pose des questions sur l'identité et la perception de soi. En choisissant et en personnalisant nos avatars, nous engageons un processus de projection de soi qui reflète nos désirs, nos aspirations, ou même des aspects de notre identité que nous souhaitons explorer. Cette capacité à remodeler notre représentation numérique nous confronte à une fluidité identitaire, où

les limites entre le soi physique et le soi virtuel deviennent poreuses. Cette expérience d'incarnation enrichit notre compréhension de la cognition incarnée, en démontrant comment l'identité et la conscience de soi peuvent être modelées par les interactions dans un espace virtuel. Néanmoins compte tenu de l'impact de l'incarnation de ces avatars sur notre "moi réel", tel que l'augmentation temporaire du QI pour l'incarnation d'Einstein, connu sous le nom d'effet Proteus, poussent à aller plus loin dans les réflexions compte tenu de l'importance de l'impact [5]. L'anthropomorphisation des avatars dans les environnements virtuels est un autre phénomène qui découle de notre tendance naturelle à attribuer des caractéristiques humaines à des entités non humaines. Cette tendance est particulièrement prononcée dans les interactions avec d'autres joueurs ou avec des agents virtuels. En dotant, dans les interactions se produisant dans les environnements virtuels, les avatars de traits humains, nous facilitons l'établissement de connexions sociales et émotionnelles, même si nous sommes conscients que derrière ces représentations se cachent des algorithmes ou d'autres joueurs interagissant à travers un écran. Cette capacité à établir des relations profondes et significatives dans des environnements où les participants sont physiquement absents souligne la puissance de l'esprit humain à transcender les limites du physique. En fin de compte, l'expérience d'incarnation numérique et l'anthropomorphisation dans les environnements virtuels révèlent une extension de notre cognition incarnée au-delà des frontières du monde physique. Ces phénomènes illustrent comment notre compréhension et notre navigation du monde sont façonnées non seulement par notre présence physique mais également par notre engagement dans des espaces numériques. Les avatars incarnés et les relations que nous formons à travers eux mettent en lumière la complexité de l'identité humaine et la capacité de l'esprit à créer des liens significatifs, même dans un univers composé uniquement de pixels. Cette exploration de l'incarnation numérique et de l'anthropomorphisation enrichit notre compréhension de la cognition humaine, en soulignant la flexibilité et la résilience de notre engagement avec le monde, qu'il soit réel ou virtuel.

1.1.4 Collaboration et socialisation dans les environnements virtuels

Notre nature fondamentalement sociale nous pousse à rechercher des connexions, des interactions et des collaborations, que ce soit dans le monde physique ou au sein des environnements virtuels. De nombreux philosophes et théoriciens ont mis en avant le caractère social de l'être humain comme fondement de notre nature. Aristote, par exemple, dans "La Politique", a décrit l'homme comme un "animal politique", insistant sur le fait que la vie en société est essentielle à notre épanouissement. De même, Jean-Jacques Rousseau, dans "Du contrat social", a exploré comment les individus se rassemblent pour former des sociétés harmonieuses. Cette perspective est enrichie par des penseurs modernes comme Georg Wilhelm Friedrich Hegel, qui voyait la reconnaissance mutuelle comme centrale au développement de la conscience de soi, Emmanuel Levinas, qui mettait l'accent sur l'importance de l'Autre pour la constitution de l'identité individuelle et morale, ainsi que les neurosciences, avec les travaux de Matthew Lieberman qui argue que notre cerveau est conçu pour les interactions sociales et que celles-ci sont cruciales pour notre bien-être psychologique. Les interactions humaines, qu'elles soient dans le monde physique ou virtuel, sont guidées par des processus cognitifs complexes, tels que la théorie de l'esprit et

l'intentionnalité, qui nous permettent de comprendre et de prédire les pensées, les sentiments et les comportements d'autrui. Dans les mondes virtuels, ces capacités cognitives s'étendent pour faciliter la création de liens sociaux profonds, non seulement avec d'autres joueurs mais aussi avec des personnages non joueurs (PNJ) dotés d'une intelligence artificielle avancée. La théorie de l'esprit, notre capacité à attribuer des états mentaux à autrui pour expliquer et prédire leurs actions, joue un rôle crucial dans la manière dont nous interagissons dans les environnements virtuels. Elle nous permet de naviguer dans des situations sociales complexes, d'anticiper les réactions des autres joueurs, et de collaborer de manière efficace, même lorsque nos seuls moyens de communication sont numériques. L'intentionnalité, ou la capacité à agir avec des buts et des desseins, est tout aussi importante, car elle guide nos actions et nos interactions, conférant un sens et une direction à notre engagement dans ces mondes virtuels. Au-delà de l'anthropomorphisation, ces aspects cognitifs enrichissent la profondeur et la complexité des liens que nous forgeons en ligne. Les joueurs ne se contentent pas de projeter des traits humains sur leurs avatars ou ceux des autres ; ils engagent des processus mentaux sophistiqués pour comprendre et interagir avec les autres participants à travers ces représentations virtuelles. L'évolution des technologies de représentation virtuelle et des modalités d'interaction a transformé la manière dont nous nous connectons avec les autres dans ces espaces numériques. Les avatars modernes permettent des expressions, des gestes et des comportements d'une richesse telle que les interactions sociales médiées acquièrent un degré de naturalité proche des échanges en face-à-face. Cette évolution technologique a non seulement amélioré l'immersion et l'expérience collaborative mais a également facilité l'établissement de relations significatives entre les participants. Les joueurs peuvent désormais développer des relations authentiques à travers leurs avatars, caractérisées par des échanges riches et des dynamiques sociales complexes qui reflètent la profondeur des interactions humaines. Cette transformation des relations, du physique au virtuel, souligne une évolution significative de notre compréhension du social. Les environnements virtuels deviennent ainsi des espaces privilégiés pour l'exploration des dynamiques collaboratives, où les frontières entre présence physique et présence virtuelle s'estompent progressivement. La capacité des utilisateurs à établir des liens sociaux significatifs à travers leurs avatars démontre que l'authenticité des relations dépend moins de la matérialité de la présence que de la richesse des interactions et de la perception mutuelle des participants.

1.1.5 Vers une compréhension holistique

Les environnements virtuels représentent bien plus qu'une simple extension de notre réalité : ils constituent un nouveau domaine d'existence, offrant des possibilités inédites d'expériences, d'interactions et d'expressions de soi. À travers le prisme de la philosophie, de la psychologie et de l'informatique, nous commençons à peine à comprendre la portée de leur impact sur l'individu et la société. Pourtant, cette évolution ne cesse de s'accélérer, et il devient difficile d'anticiper l'impact et les conséquences que cela aura. Chercher à comprendre comment cela fonctionne est un premier pas dans l'anticipation et la prédiction de ces technologies, concernant leur utilité et leur impact dans le futur. Ces technologies, bien qu'offrant des possibilités sans précédent, ne sont que des outils dont l'impact dépend fondamentalement de la manière dont nous les concevons et les utilisons. L'enjeu crucial est donc de comprendre comment les façonner pour qu'elles enri-

chissent véritablement l'expérience humaine plutôt que de la dégrader. Cette réflexion sur le potentiel transformatif des environnements virtuels, et particulièrement leur capacité à créer de nouvelles formes d'interactions sociales significatives, constitue la motivation première de ce travail de thèse. Face à l'immensité de ce champ d'investigation, j'ai choisi de concentrer mes recherches sur deux dimensions fondamentales qui structurent l'expérience sociale en environnement virtuel : la présence, qui caractérise le sentiment d'être et d'agir dans ces espaces numériques, et la collaboration, qui capture la façon dont les individus coordonnent leurs actions et construisent du sens ensemble. Ces deux notions, intimement liées, sont essentielles pour comprendre comment concevoir des environnements virtuels qui favorisent des interactions authentiques et productives. Pour explorer ces questions dans un contexte appliqué, les jeux sérieux se sont imposés comme un terrain d'étude privilégié. En combinant les mécaniques engageantes du jeu avec des objectifs pédagogiques, ils offrent un cadre idéal pour étudier et optimiser les interactions sociales médiatisées. Ce choix est d'autant plus pertinent que l'éducation représente un enjeu sociétal majeur, où le potentiel des technologies collaboratives pourrait avoir un impact particulièrement significatif sur le développement des compétences au 21^e siècle.

1.2 Contexte de la thèse : BODEGA

Cette thèse s'inscrit dans un cadre plus large qui est le projet BODEGA, mené par le laboratoire ICAR, le laboratoire Liris, la start-up Skilder, et financé par le laboratoire d'excellence ASLAN. Le projet BODEGA vise à étudier l'influence de l'incarnation sur les interactions sociales et l'engagement des participants dans un jeu collaboratif conçu pour développer les compétences sociales et relationnelles (soft skills). L'impact de l'incarnation est étudié en termes d'interactions sociales et d'importance du langage dans la collaboration. En effet, ce projet aborde la collaboration sous l'angle de corps en interaction, de corps agissant, de corps percevant la présence d'autres corps, en proximité (face à face) ou à distance (à travers le jeu). Dans cette perspective, le jeu (au sens logiciel) est considéré moins comme un système pour induire des comportements (ou des apprentissages) que comme un filtre pour appréhender diverses potentialités d'interactions corporelles, divers exercices de multimodalité, dans un game design identique. L'engagement des participants au cours du jeu est mesuré à travers les interactions avec le système et traité sous toutes ses dimensions : cognitive, comportementale et émotionnelle. Ce cadre expérimental fournit des données empiriques rares sur l'impact des variations de la multimodalité sur les modalités d'action, d'engagement et d'alignement. Ces données sont analysées afin de proposer des modèles d'engagement et d'alignement, dans le but de faire des recommandations pour l'intégration de modalités de jeux sérieux en fonction des compétences socio-relationnelles à développer ou du type d'interactions sociales à favoriser. Le projet BODEGA participe au défi sociétal ASLAN Education et Apprentissage. Les recherches menées dans cette thématique transversale étudient les situations d'enseignement, de formation et/ou d'apprentissage sous l'angle des interactions communicatives entre les acteurs participants. En positionnant le projet dans le champ éducatif de l'enseignement supérieur, nous proposons l'expérience du jeu collaboratif comme outil de sensibilisation aux soft skills (éducation informelle), à la perception de ses propres capacités relationnelles ainsi qu'à la perception de celles des autres.

1.3 Contexte général de la recherche

Les compétences non techniques, également appelées "compétences au 21e siècle", ont été largement reconnues comme essentielles pour l'éducation et le travail [6, 7]. Parmi ces compétences, la collaboration, la communication, la pensée critique et la créativité, souvent appelées les "4C", sont considérées comme cruciales pour réussir dans la société moderne [8]. En particulier, l'importance de la collaboration est de plus en plus reconnue dans l'apprentissage, car celui-ci devient plus social et interactif [9].

Dans ce contexte, les jeux sérieux collaboratifs ont émergé comme des environnements d'apprentissage efficaces pour soutenir le développement des compétences non techniques des apprenants [8, 10]. En combinant les aspects engageants et motivants des jeux vidéo avec des objectifs éducatifs, les jeux sérieux offrent aux apprenants des expériences immersives qui facilitent l'acquisition de connaissances et de compétences [11, 12]. Les jeux sérieux collaboratifs, en particulier, ont montré leur potentiel pour favoriser de véritables interactions entre les apprenants, leur permettant de vivre des situations spécifiques et d'apprendre sur les rôles et les interactions sociales [13].

Cependant, le potentiel de ces environnements dépend étroitement de la capacité à susciter des interactions de qualité entre apprenants. Dès lors, leur conception apparaît comme un enjeu crucial : il s'agit de mettre en place les conditions pour que les joueurs s'engagent dans des dynamiques collaboratives efficaces sur le plan des apprentissages. Plusieurs facteurs semblent ici déterminants comme les mécanismes de collaboration effectivement mis en œuvre (awareness, régulation, partage d'informations, discussion [14]), les processus d'autorégulation, de co-régulation et de régulation partagée [15] et le sentiment de présence sociale [16].

Si de nombreux travaux se sont penchés sur ces différents aspects de manière isolée, peu ont cherché à les considérer conjointement pour en saisir les interrelations. De même, la façon dont les caractéristiques de l'environnement virtuel, telles que le point de vue (point de vue à la première ou à la troisième personne), les modalités de communication (par exemple, texte, audio, vidéo) et le niveau d'immersion, peuvent influencer la manière dont les apprenants interagissent les uns avec les autres et s'engagent dans des activités collaboratives [17, 18] restent à approfondir.

1.4 Objectif de recherche

Dans le contexte des jeux sérieux collaboratifs et des environnements d'apprentissage collaboratif assisté par ordinateur (CSCL), cette thèse vise à mieux comprendre les déterminants de la collaboration en environnements virtuels d'apprentissage à travers une analyse du sentiment de présence sociale, des mécanismes de collaborations et des processus de régulation. Plus précisément, nous cherchons à comprendre comment des caractéristiques spécifiques de l'environnement virtuel, telles que le point de vue (première ou troisième personne) et les modalités de communication (texte, audio, vidéo), influencent la manière dont les apprenants perçoivent la présence des autres, interagissent et régulent leurs activités collectives.

Notre objectif est double. D'une part, nous souhaitons contribuer à enrichir les connaissances théoriques sur les déterminants de la collaboration en environnement numérique d'apprentissage, en examinant les relations entre des variables clés comme la présence

sociale, les comportements collaboratifs et les processus de régulation. D'autre part, nous visons à dégager des implications pratiques pour la conception de jeux sérieux et de dispositifs CSCL favorisant l'engagement social et l'efficacité des activités collaboratives.

Pour cela, nous adoptons une approche intégrative articulant études expérimentales et modélisations computationnelles. En manipulant systématiquement certains paramètres de l'environnement et en recueillant des données à différents niveaux (traces d'interaction, contenu des échanges, perceptions des apprenants), nous cherchons à obtenir une compréhension fine des mécanismes en jeu. Cette démarche nous permettra de dégager des principes de conception pour des expériences collaboratives engageantes et efficaces, notamment à travers la combinaison de techniques d'analyse multivariée et d'algorithmes d'apprentissage automatique pour faire émerger des patterns comportementaux et des configurations d'activité caractéristiques.

1.5 Structure du mémoire de thèse

Pour adresser ces questions de recherche, le manuscrit s'organise en six chapitres qui développent une approche progressive et multidimensionnelle de la collaboration en environnement virtuel.

Le chapitre 2 pose les fondements théoriques de notre travail à travers un état de l'art approfondi sur la présence et la collaboration dans les jeux sérieux. Il propose notamment une revue systématique de la littérature analysant comment différents types de connaissances (conceptuelles, procédurales, transversales) et facteurs de conception influencent le sentiment de présence et l'expérience d'apprentissage. Cette analyse nous permet d'identifier les questions de recherche qui guideront la suite de nos travaux.

Le chapitre 3 présente notre première étude expérimentale examinant l'influence du point de vue (première vs troisième personne) sur le sentiment de présence sociale et les processus collaboratifs dans un jeu sérieux multi-joueurs. Les résultats démontrent que le point de vue à la première personne favorise un meilleur engagement social et un partage d'informations plus important entre les apprenants. La deuxième partie de ce chapitre détaille l'évolution de notre dispositif expérimental sur la base des enseignements de cette première étude. Il expose les modifications apportées au prototype initial pour enrichir les possibilités d'interaction et présente le protocole expérimental élaboré pour étudier l'impact des modalités de communication sur la collaboration.

Le chapitre 4 examine l'influence des modalités de communication (texte, audio, vidéo) sur la présence sociale et les processus de régulation dans le jeu. Cette étude met en évidence des différences significatives selon les conditions et leurs implications pour la conception d'environnements d'apprentissage collaboratif.

Le chapitre 5 propose une approche novatrice pour modéliser les comportements collaboratifs en combinant l'analyse des traces d'interaction et du contenu des échanges (chat). En appliquant successivement des techniques d'analyse de fréquence, de réseaux de co-occurrences et de chaînes de Markov, il révèle des patterns d'interaction caractéristiques selon les modalités de communication.

Enfin, le chapitre 6 étend cette démarche analytique à l'ensemble des modalités en exploitant les avancées récentes en traitement automatique du langage. Les énoncés issus des différentes conditions (texte, audio, vidéo) sont automatiquement classifiés pour permettre une comparaison systématique des dynamiques collaboratives. Cette analyse

intégrée permet de relier les patterns d'interaction observés au sentiment de présence sociale des participants, offrant ainsi une vision globale de l'influence des modalités de communication sur la collaboration en environnement virtuel.

État de l'art

*On est trop souvent imprécis
lorsqu'on fait une citation.*

Quelqu'un, un jour.

Traditionnellement, l'éducation s'est concentrée sur la transmission des connaissances et la formation aux compétences techniques. Cependant, en raison de l'importante évolution technologique, Prensky (2004) [19] a montré que notre façon de socialiser, de rechercher des informations, d'apprendre et d'analyser a changé de manière significative. Trilling et Fadel (2009) [20] montrent l'importance des « compétences au 21e siècle », également appelées compétences non techniques, notamment la collaboration et la communication, qui comptent parmi les compétences les plus importantes pour réussir dans la société moderne [8]. Dans ce contexte, les jeux sérieux ont reçu une attention croissante comme méthode efficace pour développer ces compétences [11, 12]. Grâce à leur combinaison unique de dimensions ludiques et pédagogiques, ils offrent des expériences immersives qui facilitent l'engagement des apprenants et l'acquisition de connaissances [11]. Plusieurs études montrent que ces jeux, conçus avec des objectifs d'apprentissage éducatif spécifiques, améliorent la motivation et l'engagement des apprenants [12]. Les jeux sérieux peuvent facilement immerger les apprenants dans un scénario spécifique, utilisant des méthodes de jeu de rôle, ce qui leur permet de vivre des situations spécifiques avec d'autres (humains ou agents artificiels), apprenant ainsi les rôles sociaux et les interactions [13].

Pour optimiser les bénéfices des jeux sérieux collaboratifs, il est crucial de comprendre les mécanismes sous-jacents qui soutiennent une collaboration efficace. Dans ce contexte, quatre mécanismes sont centraux ; la régulation, l'awareness, le partage d'informations et la discussion. Ces mécanismes collaboratifs sont essentiels pour que les participants puissent non seulement interagir mais aussi co-construire des solutions et partager des connaissances de manière efficace.

Soutenir ces mécanismes collaboratifs et permettre une collaboration efficace nécessite la mise en œuvre de processus de régulation, à la fois individuels et collectifs [15]. L'auto-régulation, la co-régulation et la régulation partagée sont essentielles pour permettre aux apprenants de planifier, surveiller et ajuster leurs activités pour atteindre les objectifs d'apprentissage [21].

Enfin, la présence, notamment la présence sociale, est un facteur déterminant pour

l'efficacité de la collaboration dans les environnements virtuels [22]. La présence, et plus spécifiquement la présence sociale, contribue à la collaboration, à la construction d'une communauté et à la satisfaction des utilisateurs dans les espaces virtuels [23, 24].

2.1 Les environnements virtuels collaboratifs

L'émergence des environnements virtuels collaboratifs (EVC) a ouvert de nouvelles perspectives pour l'apprentissage collaboratif à distance. Ces espaces numériques partagés, où les utilisateurs interagissent entre eux et avec des objets virtuels [25], offrent un terrain propice pour étudier les dynamiques de collaboration et de présence sociale dans un contexte numérique. Cependant, la conception et l'utilisation efficace de ces environnements soulèvent des questions spécifiques quant à l'influence de leurs caractéristiques sur l'expérience des apprenants et la qualité des interactions.

2.1.1 Caractéristiques des environnements

Deux aspects de ces environnements semblent particulièrement cruciaux pour façonner l'expérience individuelle collaborative. Le point de vue : Le point de vue adoptée par l'utilisateur (première ou troisième personne) peut influencer le sentiment de présence [26] et l'immersion [17]. Ces effets pourraient avoir des implications importantes sur la manière dont les apprenants se perçoivent eux-même, perçoivent leurs partenaires et s'engagent dans des activités collaboratives. Les modalités de communication : Le choix entre texte, audio ou vidéo affecte la richesse des interactions [27] et potentiellement le sentiment de présence sociale [28]. Comprendre comment ces modalités impactent les différentes dimensions de la présence sociale et les processus de régulation collective est essentiel pour optimiser les situations d'apprentissage collaboratif.

2.1.2 Vers une approche intégrative

Les environnements virtuels collaboratifs (EVC) offrent un cadre unique pour l'étude approfondie de la présence sociale et des processus collaboratifs. Leur nature numérique permet la collecte d'une richesse de données sans précédent, ouvrant la voie à des approches analytiques variées et complémentaires.

Traces d'interaction : Les EVC enregistrent automatiquement les actions des utilisateurs (déplacements, manipulations d'objets, etc.), fournissant un aperçu détaillé des comportements observables [29]. Contenu des échanges : Les communications textuelles, audio ou vidéo entre apprenants peuvent être capturées et analysées, offrant un éclairage sur les processus cognitifs et sociaux à l'œuvre [30]. Perceptions des apprenants : L'intégration de questionnaires in-situ ou post-expérience permet de saisir l'expérience subjective des utilisateurs [31].

Cette multiplicité des sources de données permet d'aborder la présence et la collaboration sous différents angles, allant des comportements observables aux ressentis subjectifs, en passant par les interactions verbales.

La richesse et la diversité des données générées par les EVC ouvrent la voie à des méthodes d'analyse variées et sophistiquées :

Analyses quantitatives : Les traces d'interaction se prêtent à des analyses statistiques avancées, permettant d'identifier des patterns comportementaux [32]. Analyses qualitatives : Le contenu des échanges peut être soumis à des analyses de discours approfondies, révélant les dynamiques socio-cognitives à l'œuvre [33]. Modélisation computationnelle : Des techniques comme les réseaux de co-occurrences ou les chaînes de Markov peuvent être appliquées pour modéliser la complexité des interactions [34]. Visualisation de données : La nature spatio-temporelle des données se prête à des représentations visuelles innovantes, facilitant l'identification de tendances et de phénomènes émergents [35].

Ces approches, loin d'être mutuellement exclusives, peuvent être combinées pour offrir une compréhension holistique des phénomènes étudiés et examiner comment les caractéristiques des environnements influencent l'expérience de l'utilisateur à travers les processus collaboratifs, les mécanismes de régulation et le sentiment de présence sociale, que nous allons détailler dans les sections suivantes. En effet, la collaboration efficace dans ces environnements repose sur la capacité des apprenants à coordonner leurs actions, réguler leurs activités collectives et développer un sentiment de présence sociale, autant d'aspects qui peuvent être façonnés par les propriétés de l'environnement virtuel. Cette approche nous permettra de mieux cerner les enjeux de la conception d'environnements efficaces pour l'apprentissage ainsi que de justifier les choix méthodologiques adoptés dans ce manuscrit.

2.2 La collaboration

La collaboration peut être définie de diverses manières selon le contexte dans lequel elle est appliquée. De façon générale, la collaboration désigne le processus par lequel deux parties ou plus travaillent ensemble vers un objectif commun, en partageant leurs connaissances, leurs apprentissages et leurs efforts pour atteindre un but partagé. Dans la littérature, il est courant de différencier les concepts de coopération et de collaboration. La coopération se réfère généralement à un mode d'interaction où les participants contribuent ou participent en divisant le travail entre eux. En revanche, la collaboration transcende la simple répartition des tâches. Ce terme désigne un effort concerté et coordonné visant à élaborer conjointement des solutions à des problématiques communes, marquant ainsi une synergie plus profonde entre les individus impliqués. De manière plus précise, Roschelle et Teasley (1995) [36] ont défini la collaboration comme « une activité coordonnée et synchrone qui est le résultat d'une tentative continue de construire et de maintenir une conception commune d'un problème ».

Le modèle 3C, initialement proposé par Ellis et al. (1991) [37], est l'un des cadres conceptuels les plus influents pour comprendre et concevoir des systèmes de collaboration. Ce modèle décompose la collaboration en trois dimensions principales : Communication, Coordination et Coopération (ou Collaboration selon les versions).

- Communication : Dans le modèle original d'Ellis et al. (1991) [37], la communication vise à intégrer les technologies de télécommunication et de traitement informatique pour combler le fossé entre le monde asynchrone (par exemple, le courrier électronique) et le monde synchrone (par exemple, le téléphone). La communication permet l'échange d'informations et de messages entre les participants, facilitant ainsi la construction d'une compréhension commune.
- Coordination : La coordination concerne la gestion des personnes, de leurs activités

et des ressources. Elle peut être considérée comme une activité en soi lorsque les participants effectuent une tâche. Une coordination efficace peut améliorer la communication et la collaboration. Dans le travail coordonné, les participants agissent vers un objectif partagé en gérant les contraintes de temps et d'organisation, mais leurs actions individuelles ne sont que superficiellement liées les unes aux autres.

- Coopération/Collaboration : Dans le modèle original, Ellis et al. (1991) [37] utilisaient le terme "collaboration" pour décrire cette dimension, la considérant comme la pierre angulaire de l'activité de groupe qui exige que les gens partagent des informations. Dans les versions ultérieures du modèle, ce terme a été remplacé par "coopération", caractérisant une opération conjointe dans un espace partagé. Le travail coopératif est accompli par la division du travail entre les participants. Chacun effectue des actions spécifiques et indépendantes pour atteindre une partie de l'objectif global, tout en agissant vers un but commun.

Ces différents modèles partagent l'idée que la collaboration est composée de trois domaines principaux : coordination, coopération et communication. Cette compréhension nous permet de construire un modèle global de la collaboration qui intègre ces trois aspects. Cependant, il est important de noter que ces trois domaines, bien qu'utiles pour comprendre la structure globale de la collaboration, restent à un niveau élevé d'abstraction et sont souvent interconnectés. Pour une analyse plus fine des comportements collaboratifs, il est nécessaire de décomposer ces domaines en mécanismes plus concrets.

Pour comprendre les comportements concrets de collaboration, les chercheurs ont cherché à identifier les mécanismes fondamentaux au cœur de la collaboration. Basé sur une synthèse des modèles existants, les travaux de Tong (2017) [14] approfondissent la discussion qui est un type de communication, en particulier les discussions qui amènent à une prise de décision. Dans ses travaux, Tong (2017) [14] la définit comme suit : « un processus de dialogue entre des personnes pour échanger des idées et atteindre un consensus sur la base des informations disponibles. » Selon elle, la collaboration est constituée de quatre mécanismes qui sont : l'awareness, la régulation, le partage d'informations et la discussion. Ces comportements de collaboration découlent directement des propriétés du jeu, ils sont une réaction à ceux-ci.

2.2.1 Processus collaboratif

L'apprentissage collaboratif est une approche pédagogique de l'enseignement et de l'apprentissage qui implique des groupes d'apprenants travaillant ensemble pour résoudre un problème, accomplir une tâche ou créer un produit [38]. Plusieurs études soulignent l'utilité et les avantages des « équipes coopératives ». Par exemple, ces équipes atteignent des niveaux de réflexion plus élevés et retiennent les informations plus longtemps [39]. Dans ces activités de collaboration, la coordination des actions individuelles au sein de chaque groupe est importante. En effet, puisque les participants ont un objectif commun, ils devront agir en tenant compte de plusieurs contraintes telles que le temps ou l'organisation. Pour cela, plusieurs mécanismes seront utilisés pour la collaboration tels que l'awareness, la régulation, le partage d'informations et la discussion [14].

Awareness

Pour Schmidt [40], l'awareness fait référence aux « pratiques réciproques de surveillance des autres et de conception d'actions afin de rendre visibles certains aspects de l'activité ». En complément, Yuill et Rogers (2012) [41] étendent le concept d'awareness, non seulement aux actions, mais aussi aux situations dans lesquelles les personnes « ont une conscience permanente des actions, des intentions, des émotions et d'autres états mentaux d'autres interlocuteurs ». Dans un jeu collaboratif, cela peut se traduire par :

- Connaissance des actions des autres joueurs.
- Connaissance des intentions d'actions des autres joueurs.
- Connaissance des émotions et états mentaux des autres joueurs.

L'awareness est cruciale dans les jeux collaboratifs car elle permet aux joueurs de coordonner leurs actions et de s'adapter rapidement aux changements de situation dans l'environnement du jeu.

Régulation

La régulation s'appuie sur l'awareness et se rapporte à la capacité des personnes à planifier, contrôler, évaluer et réguler l'activité conjointe [42]. Dans un jeu collaboratif, la régulation peut inclure :

- La planification de stratégies d'équipe et la distribution des rôles.
- Le suivi de la progression de l'équipe, le contrôle d'éléments de jeu, et l'ajustement des tactiques en temps réel.

Partage d'informations

Le partage d'informations implique la construction d'un terrain d'entente, ce qui signifie que les membres collaborent pour assurer la compréhension et fonder leurs connaissances et hypothèses mutuelles [43].

- Transmission d'informations sur l'état du jeu et les ressources disponibles
- Échange de connaissances spécifiques détenues par chaque joueur

La manière dont les informations sont partagées dans un jeu collaboratif peut grandement influencer l'efficacité de la collaboration et la performance de l'équipe.

Discussion

La discussion a lieu lorsque les participants rassemblent et évaluent les arguments pour et contre les options disponibles, et prennent des décisions pour les alternatives sur la voie d'une solution finale [14].

- Analyse collective des différentes options stratégiques et leurs conséquences
- Construction d'un consensus à travers l'échange d'arguments et la négociation

2.2.2 Processus de régulation

Dans une activité collaborative, les membres doivent réguler leur comportement, leurs états cognitifs et émotionnels pour progresser dans le jeu et atteindre les objectifs d'apprentissage [42]. Les recherches indiquent que les individus qui parviennent à optimiser leur apprentissage emploient une combinaison de stratégies cognitives, comportementales et motivationnelles pour s'autoréguler et renforcer leur apprentissage lors de poursuites académiques [44]. Compte tenu de la nature collaborative de l'apprentissage en groupe, des recherches récentes ont mis l'accent sur l'intégration des processus individuels et sociaux dans l'étude de la régulation interpersonnelle, reconnaissant le rôle central du contexte social dans l'apprentissage autorégulé des étudiants [21, 45]. Cette reconnaissance de l'importance du contexte social dans l'apprentissage autorégulé a conduit à l'émergence de théories et de modèles d'autorégulation dans des situations d'apprentissage hautement interactives et dynamiques, à savoir la co-régulation et la régulation partagée [46]. Ces processus de collaboration visent à soutenir les mécanismes de collaboration présentés précédemment.

L'autorégulation, définie par Zimmerman (1990) [47], est un processus individualisé, centré sur l'apprenant, qui implique des pensées, des sentiments et des comportements auto-générés visant à atteindre des objectifs spécifiques. Elle comprend les stratégies d'apprentissage autorégulé des individus qui répondent de manière réflexive aux commentaires, contribuant à la capacité des apprenants à modifier leurs actions, leur motivation et leur compréhension d'un sujet. Ce processus transforme essentiellement les capacités mentales inhérentes en compétences académiques fonctionnelles, les alignant sur les objectifs personnels des apprenants.

La co-régulation, telle que décrite par Hadwin et al. (2011) [21], implique un processus interactif et partagé de résolution de problèmes entre les participants qui peut contribuer au développement de l'apprentissage individuel et des capacités de raisonnement. Dans un environnement collaboratif, chaque membre peut potentiellement influencer le processus de régulation d'un autre, contribuant à la progression individuelle et collective vers un objectif commun. Cette influence interactive se matérialise souvent par des questions ou des commentaires sur les actions, le raisonnement, les objectifs ou les stratégies futures.

Enfin, la régulation sociale partagée, basée sur Hadwin et al. (2011) [21] et Järvelä et al. (2013) [48], cherche à susciter l'autorégulation dans un contexte de groupe. Cette forme de régulation implique une construction collective des objectifs et des règles, en se concentrant spécifiquement sur la définition, le suivi et l'évaluation des objectifs et des interactions du groupe.

2.3 La présence

La présence constitue un concept aux contours mouvants, qui dépasse largement le seul cadre des environnements virtuels. Si l'on s'en tient à son sens littéral, être présent renvoie à une localisation physique : se trouver ici plutôt qu'ailleurs. Pourtant, cette définition minimaliste ne suffit pas à saisir la richesse de l'expérience humaine.

Contrairement aux animaux [49], chez lesquelles la présence semble se limiter à une réalité physique immédiate, les humains peuvent éprouver des degrés variables de présence, influencés par leur attention, leur engagement cognitif et leur perception subjective

de l'environnement. Ce phénomène devient particulièrement perceptible lorsque l'individu interagit avec un environnement artificiel ou numérique, comme c'est le cas dans les mondes virtuels.

Dans ce contexte, la présence ne s'exprime plus uniquement par la coïncidence entre le corps et l'espace physique, mais aussi par la capacité de l'utilisateur à se projeter mentalement dans un espace médiatisé, au point d'en oublier temporairement la réalité environnante. Elle oscille alors entre une réalité physique immédiate, dans laquelle le corps demeure, et une réalité virtuelle construite. C'est précisément cette dynamique, entre ancrage physique et engagement perceptif dans un monde simulé, qui constitue le point de départ de notre exploration de la présence dans les environnements numériques interactifs.

Le concept de présence présente un certain nombre d'approches différentes et, par conséquent, un grand nombre de définitions. Premièrement, il a été défini comme le sentiment subjectif d'"être là" [50, 51], et plus tard comme l'illusion de non-médiation [52]. Différents modèles théoriques, notamment le modèle IPP (Immersion, Présence, Performance) [53], et des études, telles que celles rapportées par Gorisse et al. (2017) [54], soulignent le fait que le sentiment de présence pourrait améliorer la performance de l'utilisateur selon une tâche donnée. En ce qui concerne l'apprentissage, le rôle positif de la présence peut être expliqué par la théorie cognitive-affective de l'apprentissage avec les médias, qui postule que les processus cognitifs et affectifs des apprenants sont influencés par les médias utilisés pour l'enseignement [55]. Dans ce cadre, la présence aurait un impact direct sur l'attention, la motivation et l'engagement émotionnel des apprenants, qui à leur tour influencent la qualité de l'apprentissage [18]. Le sentiment de présence peut également améliorer l'apprentissage de manière indirecte. Compte tenu de ces avantages potentiels, certaines études ont commencé à enquêter sur les facteurs qui peuvent renforcer le sentiment de présence et mesurer les effets de la présence sur les utilisateurs dans les jeux vidéo. Plusieurs facteurs contribuent à renforcer la présence dans un tel contexte, y compris la conception de l'environnement virtuel, la nature des interactions au sein du jeu et les caractéristiques des apprenants eux-mêmes [56]. Par exemple, des graphiques réalistes, un haut degré d'interactivité et l'utilisation d'éléments narratifs peuvent augmenter le sentiment de présence des joueurs dans l'environnement virtuel [57]. Concernant ces effets, la plupart des recherches sur la mesure de la présence perçue par les utilisateurs ont été menées dans le contexte général des environnements virtuels immersifs et dans le domaine des jeux vidéo. Il existe encore relativement peu d'études dans le domaine des jeux sérieux sur le concept de présence en relation avec l'acquisition de connaissances par les apprenants. Il n'y a actuellement aucun consensus sur la définition du sentiment de présence, car le concept a évolué pour tenir compte de nouveaux états psychologiques tels que "être avec" [58]. Cela a conduit à l'émergence de nombreuses dimensions, y compris la présence environnementale [50], la présence spatiale, la présence sociale, l'auto-présence [59] et la présence temporelle [60]. Compte tenu de ces différentes approches, mesurer le sentiment de présence est une entreprise compliquée, résultant en autant de questionnaires que d'approches. Dans ce manuscrit, nous nous baserons sur celle proposée par Lee [59] qui subdivise le concept de présence en 3 dimensions :

- La présence physique/spatiale (physical/spatial presence) ;
- La présence de soi (self-presence) ;
- La présence sociale (social presence).

Cette division nous paraît pertinente car elle permet de regrouper un grand nombre de dimensions qui ont pu être proposées par différents auteurs, tout en permettant de faire ressortir trois catégories auxquelles l'utilisateur est confronté lors de l'utilisation d'un média.

2.3.1 Présence spatiale

La présence spatiale est une des dimensions les plus étudiées parmi les dimensions de la présence. Lee (2004) [59] propose la définition suivante : « État psychologique dans lequel les objets physiques virtuels (para-authentiques ou artificiels) sont vécus comme des objets physiques réels de manière sensorielle ou non sensorielle ». Ici la notion d'objet comprend la constitution générale de l'environnement à l'exception de l'utilisateur et des agents sociaux. La présence spatiale comporte 3 aspects principaux [51] :

- Le sentiment « d'être là »
- La façon selon laquelle l'environnement virtuel devient dominant par rapport au monde réel
- La façon selon laquelle les utilisateurs se rappellent avoir visité un endroit plutôt que vu des images.

La présence spatiale ne sera pas plus développée ici car nous n'allons que peu nous concentrer dessus. Néanmoins il est important de la prendre en compte car elle est souvent présentée comme corrélée à la présence sociale [50, 58].

2.3.2 Présence de soi

La présence de soi a été introduite par Biocca (1997) [58] sous le nom de self-presence. La définition qu'il propose est la suivante : « Modèle mental des utilisateurs à l'intérieur d'un monde virtuel, concernant leurs corps, leurs états physiologiques, émotionnels, les traits perçus et leurs identités. » Une définition plus récente, et étendue aux autres médias et non destiné seulement aux environnements virtuels est proposée par Lee (2004) [59] : « État psychologique quand le soi virtuel est vécu comme le soi réel (corps et ou identité) ». Nous ne développerons pas cette notion davantage car nous n'allons pas l'étudier dans cette étude.

2.3.3 Présence sociale

Cette dimension va être particulièrement importante étant donné qu'il s'agit d'un jeu collaboratif. Short et al. [28] ont développé cette théorie à la base pour expliquer l'effet que les média de télécommunication ont sur la communication. Ils ont défini la présence sociale comme « le degré de saillance entre deux communicateurs utilisant un moyen de communication. » [28]. La présence sociale peut-être définie simplement comme le sentiment « d'être avec les autres » [50] ou bien « Le sentiment d'avoir un certain niveau d'accès ou de compréhension des états intentionnels, cognitifs ou affectifs de l'autre » [61]. Ici, nous proposons de se baser sur une définition très complète introduite par Biocca et Harms (2002) [49] : La présence sociale médiatisée est une propriété des personnes, et non des technologies, mais c'est un état phénoménal momentané facilité par la représentation

technologique d'un autre être. L'état de présence sociale varie au cours d'une interaction médiatisée, allant d'une faible conscience de la coprésence d'un autre être à un sentiment plus intense de l'accessibilité de la modélisation psychologique des états intentionnels de l'autre (c'est-à-dire la modélisation attributionnelle de l'autre esprit médiatisé). Cette définition nous paraît intéressante puisqu'elle divise la présence sociale en trois niveaux qui sont les suivants :

Co-présence

On peut définir simplement la co-présence comme le degré auquel l'observateur pense ne pas être seul et isolé. D'après Biocca et Harms (2002) [49], « Les utilisateurs font l'expérience de l'état phénoménal de coprésence lorsqu'ils détectent et classent automatiquement une forme (c'est-à-dire une représentation) comme une autre (c'est-à-dire possédant une agentivité). » Ici la forme signifie par exemple un avatar, constitué de pixel sur un écran. Classifier automatiquement une représentation comme ayant une agentivité c'est lui attribuer une autonomie apparente, une possible capacité de sensibilité et des états intentionnels. « Le niveau de coprésence est influencé par le degré auquel l'utilisateur et l'agent semblent partager un environnement ensemble, c'est-à-dire le degré de saillance mutuelle et d'accessibilité sensorimotrice de l'utilisateur et de l'autre perçu. » [49].

Accessibilité psycho-comportementale

La co-présence est un élément essentiel mais n'est pas suffisant pour induire un sentiment de présence sociale. Cette dimension de la présence sociale se concentre sur l'accessibilité perçue de l'autre, le sentiment que l'utilisateur a de sa conscience et de son accès à l'autre. En effet, le sentiment « d'être ensemble » n'est pas uniquement question de proximité physique, mais doit être complété avec un niveau minimum de communication sociale. En effet, dans toute communication sociale interviennent des représentations et modélisations des intentions de l'autre, des prédictions d'actions etc. Ce processus n'est pas nouveau, bon nombre de philosophes et chercheurs en sciences cognitives se sont penchés sur le sujet, sous le nom de « lecture de l'esprit » (mind reading) [62, 63] . Ces processus ont pour but de réduire l'incertitude dans les relations [64], et, c'est lorsqu'ils semblent être cohérents, en prédisant le comportement par exemple, que nous avons l'impression d'avoir accès à l'esprit de l'autre. Cet accès peut être caractérisé de plusieurs façons, que cela soit un accès aux états émotionnels, ou à sa perception des choses. Il est possible que la « lecture de l'esprit » soit un des sentiments nécessaires à la présence sociale médiatisée.

Symétrie subjective perçue

La présence sociale n'est pas uniquement basée sur notre vision de l'autre, mais aussi sur notre ressenti de ce que l'autre pense de nous. En effet la présence sociale n'est pas une interaction à sens unique, mais une interaction entre plusieurs interlocuteurs. La symétrie subjective est le degré de symétrie ou de corrélation entre le sentiment de présence sociale de l'utilisateur et sa perception du sentiment de présence sociale de son partenaire [49]. La notion de perception est ici importante étant donné que dans toute relation sociale il nous faut faire des hypothèses sur les pensées de l'autre. Le degré de symétrie ou de

corrélation fait ici référence à la perception par l’individu d’une présence sociale plus ou moins mutuelle entre lui et les autres interagissants. La symétrie subjective va être un élément important au niveau de la construction de l’interaction car c’est ce qui va guider et influencer l’interaction. Si l’autre ne me comprend pas, est-ce que je l’explique d’une manière différente, et de quelle façon ? Le sentiment de présence sociale qui existe entre deux individus interagissant par l’intermédiaire d’un média va donc nécessiter à la fois une attention similaire envers l’autre, mais aussi un niveau d’accès à l’état émotionnel et aux intentions de l’autre.

2.4 Le sentiment de présence dans les jeux sérieux

Dans le cadre de cette thèse, une revue de la littérature a été effectuée sur le concept de présence, que nous présentons ici. Cette revue de littérature vise donc à identifier les études et contributions qui ont été réalisées concernant le sentiment de présence dans le contexte spécifique des jeux sérieux, en répondant aux questions de recherche suivantes :

- Quelles sont les modalités, facteurs et variables qui influencent le sentiment de présence dans les jeux sérieux ?
- Quels sont les impacts du degré de présence sur l’expérience de l’apprenant ? Nous distinguons les dimensions cognitives, émotionnelles et comportementales.

Nous présentons d’abord notre processus de revue de littérature dans la section 2.5. Dans la section 2.6, nous fournissons une description générale des études qui ont été retenues à travers ce processus. Ensuite, nous analysons dans la section 2.8 les facteurs qui influencent le sentiment de présence perçu par les apprenants, et dans la section 2.9 l’impact du sentiment de présence sur les dimensions cognitives, affectives/émotionnelles et comportementales. Nous discutons enfin de nos résultats et fournissons des recommandations pour de futures avenues de recherche dans le domaine.

2.5 Méthodologie de sélection

Notre méthodologie de recherche et de filtrage est basée sur les travaux de Brocke et al. [65] et de Brereton et al. (2007) [66]. Les principales bibliothèques scientifiques numériques, à savoir ACM, IEEE, Sciencedirect et Scopus, ont été interrogées sur les titres et les mots-clés avec la requête suivante, construite à partir des questions de recherche précédemment définies :

(présence) ET (jeux sérieux OU apprentissage basé sur le jeu OU jeu d’apprentissage)*

Nous avons choisi ces mots-clés après une analyse de la littérature existante. Comme le terme *jeux sérieux* ne couvre pas tous les domaines, nous avons choisi d’ajouter les termes *apprentissage basé sur le jeu* et *jeu d’apprentissage*, qui sont également utilisés dans certaines parties de la littérature. Cette requête a été faite en janvier 2023.

La requête a été adaptée selon les spécificités du moteur de recherche des différentes bibliothèques scientifiques. Un total de 250 articles a été identifié (voir Tableau 1). Nous avons ensuite filtré ce premier résultat de la manière suivante :

- Format : les articles rédigés dans une langue autre que l’anglais ainsi que les articles courts (5 pages et moins), les posters et les ateliers ont été supprimés.

- Contenu : après avoir lu le contenu des différents articles, nous avons supprimé :
 - les études sans environnement virtuel,
 - les articles qui ne sont pas des études (articles théoriques, méta-analyses et état de l’art),
 - les études basées sur des patients cliniques / neuroatypiques, étant une population spécifique,
 - les doublons : puisque Scopus permet d’accéder à diverses bases de données, certains articles étaient communs.

	ACM	IEEE	SCIENCEDIRECT	SCOPUS
Requête	5	6	30	193
Format	4	4	25	87
Contenu	1	3	6	21
Doublons	1	2	6	17
Final	1	2	6	9

TABLEAU 2.1 – Nombre d’articles après chaque étape de filtrage.

Nous n’avons défini aucun critère concernant la date de publication. Suite au processus de filtrage, nous avons retenu 18 études que vous pouvez trouver dans le Tableau 2.1.

2.6 Description générale des études

Nous dressons d’abord une description générale des études sur le sentiment de présence dans les jeux sérieux : les connaissances à acquérir (2.6.1), le profil des participants (2.6.2), et enfin l’environnement et les modalités d’interaction proposées (2.6.3).

2.6.1 Connaissances ciblées

Nous avons d’abord catégorisé les études selon le type de connaissances soutenues par les jeux sérieux. Nous avons identifié 3 catégories :

- *Connaissances conceptuelles* : La plupart des jeux sérieux sont proposés pour soutenir l’acquisition de connaissances conceptuelles, c’est-à-dire comprendre les principes et relations qui sous-tendent un domaine. Nous pouvons les distinguer selon la discipline étudiée, par exemple la physique [67], la microbiologie [68], la biologie [69, 70], la neuroanatomie [71], le vocabulaire anglais [72], la fabrication d’huile [73], les connaissances interprofessionnelles [74]. Une étude a utilisé un jeu sérieux qui n’était pas spécifique à une discipline mais se concentrait sur les connaissances de base [75].
- *Connaissances procédurales* : Certains jeux sérieux ont été conçus pour développer des connaissances procédurales, c’est-à-dire savoir comment faire quelque chose, permettant par exemple de reproduire des situations extrêmes, comme pour la formation des pompiers [76], la formation du personnel médical militaire [77], les scénarios post-catastrophe [78], et la simulation sportive ([79], saut en hélicoptère [80] ou cyclisme [81]).

	Article	Nombre de participants		Age			Contexte	
		20 - 50	>50	- 12 ans	12 - 18 ans	Adulte	Académique	Non académique
Connaissances conceptuelles	Apostolellis et Bowman (2016)							
	Chen et al. (2020)							
	Johnson-Glenberg et al. (2021)							
	Martey et al. (2014)							
	Oksanen et Hämäläinen (2013)							
	Rowe et al. (2011)							
	Schrader (2014)							
	Souza et al. (2020)							
	Uz-Bilgin et Thompson (2022)							
Connaissances procédurales	Bachen et al. (2016)							
	Caldas et al. (2020)							
	Corelli et al. (2020)							
	De Leo et al. (2014)							
	Lee et al. (2013)							
	Oliveira et al. (2019)							
Compétences non techniques	Basille et al. (2022)							
	Lane et al. (2010)							
	Zarglayoun et al. (2022)							

FIGURE 2.1 – Description générale des études sélectionnées : nombre de participants, tranche d'âge et contexte.

- *Compétences transversales* : Parmi les jeux sérieux sélectionnés, trois soutiennent le développement de compétences transversales, c'est-à-dire des compétences interpersonnelles. Le premier est lié au raisonnement socio-moral [82], le deuxième à la communication interculturelle [83] et le dernier aux compétences transversales socio-relationnelles [84].

2.6.2 Participants

Le Tableau 2.1 montre pour chaque étude le nombre et la tranche d'âge des participants, ainsi que le contexte de l'étude (académique vs non académique). **Nombre de participants** : Une étude a impliqué moins de 20 participants (18) [84], 6 études ont impliqué entre 20 et 50 participants, et 11 études ont impliqué plus de 50 participants.

Contexte : Les études utilisant des jeux sérieux pour développer des connaissances conceptuelles ont été menées dans un contexte académique. En revanche, les études impliquant des jeux sérieux pour développer des connaissances procédurales se sont principalement concentrées sur des populations non académiques.

Tranche d'âge : Les études sur l'acquisition de connaissances conceptuelles ont impliqué des participants de tous les groupes d'âge, tandis que les études concernant les connaissances procédurales ont uniquement impliqué des participants adultes. Les études utilisant des jeux sérieux pour développer des compétences transversales ont un public majoritairement adulte.

2.6.3 Environnements et modalités d'interaction

Comme souligné dans différents travaux, le degré de réalisme [22], le mode de jeu [85] et la représentation du joueur dans l'environnement immersif peuvent influencer le sentiment

	Article	Environnement				Représentation des joueurs			Mode de jeu	
		Écran	Écran projeté	Rv	Réalité mixte	Pas d'avatar	Main	Avatar	Individuel	Multijoueur
Connaissances conceptuelles	Apostolellis et Bowman (2016)									
	Chen et al. (2020)									
	Johnson-Glenberg et al. (2021)									
	Martey et al. (2014)									
	Oksanen et Hämäläinen (2013)									
	Rowe et al. (2011)									
	Schrader (2014)					Na				
	Souza et al. (2020)									
	Uz-Bilgin et Thompson (2022)									
Connaissances procédurales	Bachen et al. (2016)									
	Caldas et al. (2020)									
	Corelli et al. (2020)									
	De Leo et al. (2014)									
	Lee et al. (2013)									
	Oliveira et al. (2019)									
Compétences non techniques	Basille et al. (2022)									
	Lane et al. (2010)									
	Zarglayoun et al. (2022)									

FIGURE 2.2 – Description générale du jeu sérieux : environnement, représentation du joueur et mode de jeu.

de présence [54,86]. Par conséquent, nous décrivons dans le Tableau 2.2 le dispositif utilisé dans l'environnement immersif, la représentation du joueur dans le jeu (par exemple, la présence d'un avatar) et le mode de jeu (individuel ou multijoueur).

Environnement : Pour l'acquisition de connaissances conceptuelles, les jeux sérieux sont principalement utilisés sur un écran (6 études) et en VR (réalité virtuelle) (3 études). Pour les connaissances procédurales, la VR est plus couramment utilisée (4 études), et pour les compétences transversales, les études ont exclusivement utilisé un écran.

Représentation du joueur : Les études utilisant des jeux sérieux pour développer des connaissances conceptuelles emploient soit une représentation du joueur via un avatar, soit aucune représentation du tout. En revanche, les études concernant les connaissances procédurales n'utilisent principalement aucune représentation. Les études qui utilisent des jeux sérieux pour développer des compétences transversales n'incluent pas de représentations des joueurs dans l'environnement.

Mode de jeu : Les jeux sérieux sont majoritairement individuels (14), seuls quatre sont multijoueurs et collaboratifs [73,74,77,84].

2.7 Méthodes de mesure

Comme expliqué précédemment, il existe diverses approches pour définir le sentiment de présence, et par conséquent, de nombreuses façons de le mesurer. Les méthodes de mesure sont généralement divisées en trois types : mesures collectées par auto-déclaration post-expérience (par questionnaires ou entretiens), mesures physiologiques et mesures comportementales [87] [88]. Les deux dernières catégories ont été introduites pour plus d'objectivité dans l'analyse de la présence.

Le Tableau 2.3 présente les différentes méthodes de mesure utilisées dans les études sélectionnées. Nous avons choisi de distinguer les questionnaires des entretiens semi-structurés pour les données auto-déclarées. La plupart des études se basent sur l'utili-

	Article	Méthode		
		Questionnaire	Capteur physiologique	Observation
Connaissances conceptuelles	Apostolellis et Bowman (2016)	SPGQ		
	Chen et al. (2020)	Ad-hoc		
	Johnson-Glenberg et al. (2021)	Ad-hoc		
	Martey et al. (2014)	TPI		
	Oksanen et Hämäläinen (2013)	GEQ		
	Rowe et al. (2011)	PQ		
	Schrader (2014)	PQ		
	Souza et al. (2020)	SUS		
	Uz-Bilgin et Thompson (2022)	MEC-SPQ		
Connaissances procédurales	Bachen et al. (2016)	TPI		
	Caldas et al. (2020)			
	Corelli et al. (2020)	VRUSE		
	De Leo et al. (2014)	ITC SOPI		
	Lee et al. (2013)	Ad-hoc		
	Oliveira et al. (2019)	Ad-hoc		
Compétences non techniques	Basille et al. (2022)	SPI		
	Lane et al. (2010)	TPI		
	Zarglayoun et al. (2022)	ITC SOPI		

FIGURE 2.3 – Méthodes de mesure : questionnaires, entretiens, capteurs physiologiques et/ou observations.

sation de questionnaires, différant entre eux (ITC-SOPI [89], VRUSE [90], SPGQ [91], TPI [92], PQ [93], GIQ [94], MEC-SPQ [95], SUS [51], GEQ [96]), ainsi que des questionnaires ad-hoc créés pour les besoins spécifiques de l'expérience. Le questionnaire qui se démarque le plus est le TPI [75, 78, 83], mesurant un type de connaissance différent dans chacune des trois études.

Nous observons que les questionnaires sont basés sur différentes théories et approches de la présence, chacun proposant de mesurer différentes dimensions, telles que la présence spatiale, c'est-à-dire la sensation d'y être, la présence sociale, c'est-à-dire la sensation d'être dans l'environnement virtuel avec un autre, ou la crédibilité de l'expérience. La présence spatiale peut être mesurée par l'ITC-SOPI, le TPI, le MEC-SPQ, le SUS, ou le GEQ. La présence sociale est couverte par le SPGQ, le TPI et le GEQ. Enfin, certains questionnaires permettent une approche de la présence liée à la crédibilité de l'expérience, comme le VRUSE, le TPI, le PQ et le MEC-SPQ. Nous soulignons que l'utilisation des questionnaires ne semble pas liée à la catégorie de connaissance soutenue par le jeu sérieux.

Concernant les mesures objectives, une étude utilise des capteurs physiologiques [79], et une autre s'appuie sur des observations pendant le jeu [81]. Dans l'étude menée par [81], ils ont observé, par le biais de visionnages vidéo, les réactions des participants lors d'événements spécifiques pendant le jeu. L'étude menée par [80] n'inclut pas de mesure de la présence, car les différentes conditions d'étude sont créées par des facteurs reconnus a priori comme ayant un impact sur la présence.

Enfin, nous observons qu'aucune étude n'utilise d'entretiens semi-structurés pour recueillir le sentiment de présence des utilisateurs.

		Profil utilisateur			Environnement technologique		Rôle de l'utilisateur
	Article	Connaissances et compétences	Profil motivationnel	Trait de personnalité	Auto-représentation	Système et dispositif	Rôle de l'utilisateur
Connaissances conceptuelles	Apostolellis et Bowman (2016)						
	Chen et al. (2020)						
	Johnson-Glenberg et al. (2021)						
	Martey et al. (2014)						
	Rowe et al. (2011)						
	Souza et al. (2020)						
	Uz-Bilgin et Thompson (2022)						
Connaissances procédurales	Bachen et al. (2016)						
	Corelli et al. (2020)						
	De Leo et al. (2014)						
	Oliveira et al. (2019)						
Compétences non techniques	Basille et al. (2022)						
	Lane et al. (2010)						
	Zarglayoun et al. (2022)						

FIGURE 2.4 – Catégories des différents facteurs influençant le sentiment de présence dans les jeux sérieux. Le gris foncé indique des résultats significatifs tandis que le gris clair indique l'absence de résultats significatifs.

2.8 Facteurs influençant le sentiment de présence

Le Tableau 2.4 présente les facteurs qui sont mesurés et étudiés dans les études comme ayant potentiellement un impact sur le sentiment de présence dans les jeux sérieux. Trois catégories de facteurs émergent de notre analyse : le profil de l'utilisateur, qui rassemble des facteurs intrinsèques aux participants (caractéristiques de l'utilisateur, profil motivationnel et traits de personnalité), l'environnement technologique (représentation du joueur, système et dispositif) et le rôle de l'utilisateur dans le jeu sérieux.

2.8.1 Profil de l'utilisateur

Connaissances et compétences : Cette sous-catégorie comprend des facteurs associés aux caractéristiques spécifiques des utilisateurs, telles que les connaissances préalables, l'expérience de jeu passée et les compétences liées au domaine. Concernant les connaissances des participants dans le domaine, nous observons des résultats mitigés. Dans une première étude, Rowe et al. [68] ont trouvés une corrélation positivement significative entre les connaissances pré-test sur le domaine et le sentiment de présence dans le jeu. Cependant, dans une deuxième étude [69], les connaissances des participants sur le domaine n'ont eu aucun effet significatif sur le sentiment de présence. De Leo et al. (2014) [77] s'est concentré sur l'impact des connaissances sur les environnements virtuels en général, et a montré que cela a un impact positif sur le sentiment de présence dans un jeu sérieux avec un environnement de réalité virtuelle. Oliveira et al. (2019) [81] a examiné les compétences générales en cyclisme des participants et n'a trouvé aucun résultat significatif concernant leur impact sur le sentiment de présence.

L'expérience de jeu passée, c'est-à-dire à quelle fréquence ou combien de temps les participants jouent à des jeux vidéo, a également montré des résultats mitigés. Deux études ont trouvé qu'une plus grande expérience de jeu avait un impact positivement significatif sur le sentiment de présence dans un jeu basé sur un écran [68] et dans un environnement de réalité virtuelle [77]. Inversement, l'étude menée par Chen et al. (2019) [72] a montré que les personnes ayant la plus faible expérience de jeu avaient un sentiment de présence

plus élevé que celles ayant une grande expérience de jeu lorsqu'il est possible de personnaliser son avatar. Il convient de noter que l'impact de la fréquence du jeu était uniquement positivement significatif sur la dimension "conscience" du sentiment de présence. Enfin, deux études n'ont trouvé aucun effet significatif, la première se concentrant sur l'expérience passée des participants dans la réalité virtuelle [81], la seconde sur l'expérience de jeu [69] (en se concentrant sur le sentiment de présence spatiale).

Enfin, concernant les capacités des utilisateurs, Uz-Bilgin et Thompson (2022) [69] a montré que les capacités visuo-spatiales, c'est-à-dire la capacité à représenter, analyser et manipuler mentalement des objets, avaient un impact positivement significatif sur le sentiment de présence.

Profil motivationnel : Cette sous-catégorie concerne des facteurs liés à la motivation des apprenants, comme leur intérêt pour le sujet. Une étude a montré que l'intérêt pour le domaine des jeux sérieux avant de commencer le jeu, dans ce cas la biologie, avait un impact positivement significatif sur le sentiment de présence [69].

Trait de personnalité : Cette sous-catégorie comprend des facteurs liés aux traits de personnalité des apprenants, comme l'empathie ou le style cognitif. Bachen et al. (2016) [78] a montré que l'empathie générale était positivement corrélée au sentiment de présence. En revanche, une deuxième étude a montré que l'empathie générale, l'empathie cognitive et l'empathie affective n'étaient pas corrélées [82]. Enfin, dans l'étude menée par Chen et al. (2019) [72], le style cognitif des joueurs (se référant au modèle holistique et sérialiste de Pask) avait un impact significatif lorsqu'ils avaient la possibilité de personnaliser leur avatar. Les joueurs associés au style cognitif holistique ont ressenti un plus grand sentiment de présence que les sérialistes.

2.8.2 Environnement technologique

Auto-représentation : L'auto-représentation de soi dans les jeux peut prendre diverses formes, par exemple via un avatar. Selon l'étude menée par Martey et al. (2014) [75], permettre aux joueurs de personnaliser leur avatar avait un impact positivement significatif sur le sentiment de présence. Cependant, cet effet n'a pas été trouvé dans l'étude menée par Chen et al. (2019) [72]. Enfin, Oliveira et al. (2019) [81] a montré que la cohérence entre l'avatar d'une personne et l'environnement du jeu améliore leur sentiment de présence.

Système et dispositif : Dans une étude liée à l'impact de l'environnement de jeu, il a été montré qu'un jeu sérieux 3D permet un meilleur sentiment de présence qu'un jeu sérieux 2D [83]. Une autre étude a examiné l'impact du point de vue (première ou troisième personne) et a montré qu'un point de vue à la première personne permet un meilleur sentiment de présence sociale [84]. Enfin, de manière plus générale, Johnson-Glenberg et al. (2021) [70] a montré que le type de plateforme (réalité virtuelle ou écran) avait un impact significatif, avec une plateforme de réalité virtuelle permettant un plus grand sentiment de présence. Également en réalité virtuelle (casque), mais avec différents dispositifs (DVR, VR, KAT VR), Corelli et al. (2020) [76] n'a montré aucun impact. Concernant le dispositif, regarder l'écran davantage (affichage classique) est positivement corrélé à une augmentation de plusieurs types de présence (transport, richesse sociale et immersion mentale) [75].

2.8.3 Rôle des utilisateurs

Cette catégorie regroupe les conditions expérimentales qui diffèrent selon le rôle et le niveau de contrôle que les utilisateurs ont dans le jeu sérieux. Dans une première étude sur l'agentivité, les utilisateurs étaient soit dans un rôle de joueur et pouvaient contrôler directement le jeu, soit dans un rôle de spectateur et avaient peu d'impact sur le jeu. Cette étude a montré un impact positivement significatif sur le sentiment de présence lorsque les utilisateurs contrôlaient directement le jeu [73]. Dans une autre étude, Souza et al. (2020) [71] a examiné le rôle actif ou passif des participants, c'est-à-dire s'ils participaient à l'action ou regardaient l'action être effectuée par quelqu'un d'autre, et n'a trouvé aucun impact significatif. Enfin, Apostolellis et Bowman (2016) [73] a obtenu les mêmes résultats lors de l'étude de l'impact de l'implication des membres du public, c'est-à-dire si les tâches qu'ils devaient effectuer sur leurs dispositifs dans le jeu avaient un impact sur le déroulement du jeu ou non.

Pour résumer, nous avons observé que dans les jeux sérieux développés pour renforcer les *connaissances conceptuelles*, tous les facteurs semblent impacter le sentiment de présence. L'influence du rôle de l'utilisateur n'a été étudiée que pour ce type de jeux sérieux, avec des résultats mitigés. Dans les jeux sérieux qui soutiennent l'acquisition de *connaissances procédurales*, les traits de personnalité et l'auto-représentation semblent impacter le sentiment de présence. Concernant l'impact des connaissances et compétences préalables, les résultats sont mitigés, avec une étude significative et une non significative. Nous ne pouvons pas conclure sur le système et le dispositif, avec seulement une étude non significative. Concernant le développement de *compétences transversales*, il n'y a qu'une étude non significative examinant l'impact des traits de personnalité sur le sentiment de présence. En termes d'environnement technologique, deux études ont montré des impacts significatifs du système et du dispositif utilisé.

2.9 Impacts du sentiment de présence dans les jeux sérieux

Plusieurs études se sont intéressées à la manière dont le degré de présence perçu par les apprenants lors de l'utilisation des jeux sérieux impactait leur expérience (voir Tableau 2.5). Pour caractériser les effets, nous les avons regroupés en trois dimensions de l'expérience d'apprentissage qui sont ressorties de notre analyse : cognitive, comportementale et motivationnelle/émotionnelle.

2.9.1 Dimension cognitive

Les études de cette section concernent l'impact du sentiment de présence sur l'acquisition de connaissances. Quatre études ont mesuré le gain de connaissances des apprenants, le jugement situationnel (capacité à porter des jugements dans un contexte spécifique), l'assimilation culturelle (interprétation de situations dans différents contextes culturels) et les compétences de raisonnement socio-moral à travers l'utilisation du jeu sérieux. Ce gain de connaissances est mesuré en utilisant différentes méthodes. Les connaissances conceptuelles sont principalement mesurées à travers des questionnaires liés aux connaissances

	Article	Cognitive	Comportement	Motivation & Émotions
Connaissances conceptuelles	Johnson-Glenberg et al. (2021)			
	Martey et al. (2014)			
	Oksanen et Hämäläinen (2013)			
	Rowe et al. (2011)			
	Schrader (2014)			
Connaissances procédurales	Bachen et al. (2016)			
	Caldas et al. (2020)			
	Lee et al. (2013)			
Compétences non techniques	Lane et al. (2010)			
	Zarglayoun et al. (2022)			

FIGURE 2.5 – Les différentes dimensions de l'expérience d'apprentissage impactées par le sentiment de présence. Le gris foncé indique des résultats significatifs tandis que le gris clair indique l'absence de résultats significatifs.

du domaine (en pré-test et post-test) [67, 68], tandis que les compétences transversales sont mesurées par des tâches de jugement situationnel et de raisonnement [82, 83].

Concernant l'acquisition de connaissances, une étude a montré que le sentiment de présence avait un impact positif significatif sur la rétention et la compréhension des connaissances en physique, mais pas sur le transfert [67]. L'impact positif sur la rétention et la compréhension est expliqué par l'effet de la présence sur la motivation. Les études mesurant l'impact de la présence sur les compétences transversales n'ont pas observé de résultats significatifs. Lane et al. (2010) [83] a montré qu'un plus grand sentiment de présence n'entraînait pas une meilleure amélioration du jugement situationnel et de l'assimilation culturelle. De même, Zarglayoun et al. (2022) [82] n'a pas identifié de meilleur développement des compétences de raisonnement socio-moral.

2.9.2 Comportements des apprenants

Concernant la dimension comportementale, Johnson-Glenberg et al. (2021) [70] a montré que le sentiment de présence avait un effet positif direct sur l'engagement. En lien avec l'engagement et l'exploration visuelle du jeu avec la souris, Martey et al. (2014) [75] a identifié une relation entre l'utilisation de la souris et le sentiment de présence. Plus le sentiment de présence est fort, plus l'utilisation de la souris est active. En revanche, aucune corrélation n'a été trouvée entre le sentiment de présence et les clics de souris, qui sont associés aux actions effectuées pendant le jeu.

2.9.3 Motivation et émotions

Concernant la motivation des utilisateurs, deux études ont rapporté des effets plutôt positifs du sentiment de présence. Dans l'étude menée par Schrader (2014) [67], le sentiment de présence a eu un impact positif significatif sur la motivation des apprenants. De même, dans l'étude rapportée par Bachen et al. (2016) [78], le sentiment de présence a eu

un impact sur l'intérêt pour le sujet traité par le jeu sérieux, mais indirectement. En effet, le sentiment de présence a eu un impact sur l'empathie, qui à son tour a eu un impact sur l'intérêt des utilisateurs.

Concernant la dimension émotionnelle, Caldas et al. (2020) [80] a étudié l'impact du sentiment de présence sur l'activation physiologique liée aux émotions (l'éveil) et a identifié qu'ils étaient corrélés. Une diminution du sentiment de coexistence (présence sociale) a permis une plus grande activation physiologique, mais une diminution de la qualité du réalisme du scénario (présence physique) a conduit à une diminution de l'activation physiologique. Une deuxième étude a montré un impact positif significatif du sentiment de présence sur le plaisir perçu [79]. Plus spécifiquement, la présence sociale était un bon prédicteur de ces variables, contrairement à la présence spatiale pour laquelle les résultats n'étaient pas significatifs.

Lee et al. [79] a identifié un impact positif significatif du sentiment de présence sur la valeur perçue. De même, le sentiment de présence a un impact positif significatif sur la sociabilité perçue permise par le jeu [74]. Bachen et al. (2016) [78] a également montré des impacts positifs significatifs du sentiment de présence sur le flow, l'identification et l'empathie ressentie envers les personnages non-joueurs (NPC).

Pour résumer, les études portant sur les jeux sérieux développés pour renforcer les *connaissances conceptuelles* enquêtent sur les effets de la présence sur tous les résultats possibles (cognitifs, comportementaux ou motivationnels). Pour les *connaissances procédurales*, les études se sont exclusivement concentrées sur l'impact du sentiment de présence sur la motivation et les émotions. Toutes ces études ont trouvé un effet significatif du sentiment de présence sur les variables mesurées. Enfin, pour le développement de *compétences transversales*, les études se sont exclusivement concentrées sur l'impact du sentiment de présence sur les états cognitifs. Dans les deux études, les résultats n'étaient pas significatifs.

2.10 Discussion

La plupart des recherches sur la présence ont été menées dans le contexte général des environnements virtuels immersifs et dans le domaine des jeux vidéo. Ce concept, fortement dépendant du contexte, n'a pas été largement étudié dans le contexte des jeux sérieux, qui ont un but d'apprentissage spécifique. Dans les sections précédentes, nous avons décrit l'état actuel de la recherche sur le sentiment de présence dans ce contexte spécifique : les types d'acquisition de connaissances soutenus par les jeux sérieux, les contextes des études, les facteurs ayant un effet sur le sentiment de présence et réciproquement les dimensions impactées par le degré de présence perçu par les apprenants.

2.10.1 Approches et mesures

Comme nous l'avons montré, le sentiment de présence est un concept largement étudié dans les jeux vidéo ainsi que dans la réalité virtuelle. Cependant, c'est un concept complexe, étant donné ses différentes définitions, dimensions et modèles, rendant la création d'un cadre de recherche unifié difficile. Nous observons le même constat dans le domaine des jeux sérieux puisque différents modèles et méthodes de mesure sont utilisés sans consensus sur aucun en particulier. Comme illustré dans le Tableau 2.3, le

sentiment de présence est mesuré à travers trois méthodes différentes : données auto-déclarées post-expérience (questionnaires ou entretiens), mesures physiologiques et mesures comportementales. Dans les études présentées dans cet article, nous constatons que les questionnaires sont prédominamment favorisés. Seule une étude a utilisé des mesures physiologiques et deux ont utilisé des mesures comportementales.

Dans les jeux vidéo et la réalité virtuelle, les mesures physiologiques sont largement utilisées, telles que le rythme cardiaque, l’électroencéphalogramme (EEG) [97], ou même l’imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) [98]. Ainsi, il semble important que les recherches futures dans le domaine des jeux sérieux explorent des méthodes de mesure plus objectives que les données auto-déclarées, ou même combinent les deux approches. Les mesures physiologiques utilisées dans d’autres domaines constituent un point de départ pour la recherche. Nous suggérons également d’explorer l’utilisation de mesures comportementales. En particulier, l’engagement comportemental [99, 100] est un concept largement étudié dans les travaux éducatifs. Les méthodes d’analyse basées sur les traces d’interaction et l’analyse de l’apprentissage [29] peuvent fournir des indicateurs comportementaux intéressants à croiser avec d’autres types de mesures.

Une conséquence des différents modèles et méthodes de mesure est la difficulté d’évaluer et de généraliser les résultats à travers différentes études. Cette difficulté apparaît lors de l’examen de l’impact de différents facteurs sur les sentiments de présence et d’incarnation. Dans certains cas, un facteur donné peut produire un résultat positivement significatif dans une étude, tandis qu’une autre étude peut observer aucun effet. Cela s’applique à deux études examinant les connaissances préalables concernant le domaine du jeu sérieux [68, 69]. En particulier, la variété des questionnaires rend difficile la généralisation des résultats en raison des différences dans leur sensibilité. Par sensibilité, nous entendons la capacité de détection du questionnaire, qui peut présenter différents niveaux de détail [88]. La notion de présence, et par extension sa mesure, n’est pas nécessairement un élément central dans certaines études. Selon cela, le choix d’utiliser un questionnaire court et moins sensible, ou de créer son propre questionnaire, peut être fait. Bien qu’intéressants, les résultats qui en émergent doivent être interprétés avec prudence.

2.10.2 Facteurs d’influence

Les facteurs étudiés dans les jeux sérieux correspondent assez bien aux facteurs généralement étudiés dans d’autres domaines, en particulier les aspects technologiques liés à l’environnement. Les influences positives dues au degré de réalisme ou à la représentation du joueur renforcent l’importance de considérer ces aspects dans la conception des jeux sérieux. Nous avons également observé une majorité d’influences positives concernant le profil des apprenants, principalement pour les jeux sérieux soutenant l’acquisition de connaissances conceptuelles et procédurales.

Cependant, certaines études n’ont pas observé d’influences significatives de plusieurs facteurs sur la présence, soulignant la complexité de cette relation dans le contexte des jeux sérieux. Des résultats divergents, tels que la corrélation entre l’empathie générale et la présence, avec des effets significatifs dans l’étude de Bachen et al. (2016) [78] contre l’absence d’un effet significatif dans l’étude de Zarglayoun et al. (2022) [82], peuvent potentiellement être expliqués par le type de connaissance développée par le jeu sérieux. Plus spécifiquement, l’interaction nuancée entre différents types de connaissances (procé-

duales vs compétences transversales) et les environnements virtuels dans lesquels elles sont cultivées peut contribuer à ces résultats incohérents. À mesure que le type de connaissance développée par le jeu sérieux varie, sa conception dépendra inévitablement de la connaissance spécifique en cours de développement. Par conséquent, les résultats peuvent également varier.

Un deuxième aspect qui semble nécessaire à considérer est le contexte des études. Pour illustrer cette idée, nous examinerons deux études qui évaluent l'influence des connaissances et des compétences sur le sentiment de présence dans un jeu sérieux lié à la connaissance conceptuelle [68,69]. Comme illustré par l'effet positivement significatif dans l'une des deux études [68] et l'effet non significatif dans l'autre [69], le type de dispositif (VR versus un écran conventionnel) utilisé dans l'acquisition de connaissances conceptuelles pourrait moduler l'influence de facteurs spécifiques sur le sentiment de présence. Cela souligne la nécessité de méthodologies plus raffinées qui reconnaissent et prennent en compte ces interconnexions complexes, ainsi qu'un cadre plus complet pour analyser le rôle de ces facteurs dans les jeux sérieux. Pour cela, standardiser la manière dont certains éléments contextuels sont pris en compte (c'est-à-dire type de système, profil des apprenants, environnement, mode de jeu) pourrait être une solution pertinente.

2.10.3 Effets et impacts

Comme développé dans la section 2.6, plusieurs types de connaissances peuvent être évalués dans les jeux sérieux, y compris les connaissances conceptuelles, procédurales et les compétences transversales. Notre analyse met en évidence le nombre limité d'études mesurant l'acquisition de connaissances, qui est l'un des objectifs d'un jeu sérieux. Dans les études qui examinent l'impact de la présence sur l'acquisition de connaissances (associée à la dimension cognitive), la recherche a été limitée aux connaissances conceptuelles et aux compétences transversales. Aucune étude n'a été trouvée qui enquête sur l'impact de la présence sur l'acquisition de connaissances procédurales. Bien que les connaissances conceptuelles soient généralement plus faciles à évaluer, de nombreuses études dans la littérature se sont concentrées sur l'évaluation des connaissances procédurales, par exemple en utilisant des méthodes telles que raconter verbalement les étapes d'une procédure [101] ou décrire comment appliquer les étapes d'une procédure à une nouvelle situation [102]. Nous pensons donc qu'il existe un domaine de recherche potentiel pour enquêter sur l'impact de la présence sur ce type de connaissances.

Notre analyse de la littérature montre des résultats mitigés lorsqu'examinés globalement, mais ils sont cohérents lorsqu'examinés par type de connaissance. Par exemple, Schrader (2014) [67] et Rowe et al. [68] ont trouvé une corrélation positive entre la présence et la dimension cognitive dans un jeu sérieux conçu pour développer l'acquisition de connaissances, tandis que Lane et al. [83] et Zarglayoun et al. (2022) [82] ont rapporté aucun effet significatif de la présence dans un jeu sérieux conçu pour développer l'acquisition de compétences transversales. Cette disparité de résultats peut être attribuée au type spécifique de connaissance ciblé dans chaque jeu sérieux, suggérant que l'influence de la présence sur les processus cognitifs peut dépendre de ce facteur, ainsi que des tâches et objectifs associés à chacune des connaissances à acquérir.

Une première explication pourrait être la différence dans l'acquisition et le développement des connaissances conceptuelles et des compétences transversales. Les connaissances

conceptuelles font référence à la compréhension des concepts, principes et théories et sont basées sur la création de connexions, la généralisation et la catégorisation des informations [103]. Les compétences transversales, également connues sous le nom de compétences interpersonnelles ou sociales, sont un ensemble de capacités non techniques qui permettent aux individus d'interagir efficacement avec les autres, de travailler en équipe et de s'adapter à différentes situations. Elles sont plus liées aux attributs personnels, tels que la communication, la résolution de problèmes, le leadership, l'intelligence émotionnelle et la gestion du temps [104]. Étant donné ces différences, la conception et le contenu du jeu sérieux prennent des approches différentes. Tenter de mesurer l'impact de la présence sur la dimension cognitive est affecté par la conception divergente du jeu sérieux, qui sont orientés par des buts distincts.

Une deuxième explication pourrait être liée au contexte des études. Notre analyse indique que le type de connaissance ciblé par les jeux sérieux peut influencer les caractéristiques de l'étude et de ses participants. Par exemple, les études sur les jeux sérieux conçus pour développer des connaissances conceptuelles sont menées dans des contextes académiques, avec des adultes et des participants de moins de 18 ans, avec un environnement qui utilise une représentation du joueur. En revanche, les études axées sur les compétences transversales sont plus souvent associées à des populations non académiques, des apprenants adultes et aucune représentation du joueur. Étant donné cette constatation, il semble nécessaire d'explorer l'impact du contexte (c'est-à-dire l'âge, académique/non académique, environnement, mode de jeu...) sur l'efficacité des jeux sérieux, en particulier en relation avec le type d'acquisition de connaissances soutenu par le jeu.

Enfin, notre analyse a révélé uniquement des impacts positifs de la présence sur les résultats comportementaux, motivationnels et émotionnels. De nombreuses études soulignent l'importance de l'engagement et de la motivation dans les résultats d'apprentissage, comme celle menée par Zainuddin et al. (2020) [105] qui observe que les valeurs d'engagement et de motivation sont toujours positivement corrélées avec la performance académique. Étant donné que seules deux études ont concentré l'analyse des résultats comportementaux, nous pensons qu'il existe une voie de recherche dans l'investigation plus approfondie de la relation entre la présence et l'engagement.

2.10.4 Présence sociale dans les jeux sérieux

Un aspect crucial à souligner dans le contexte de notre étude est la rareté des recherches sur les jeux sérieux multijoueurs. La présence comprend plusieurs dimensions, dont la présence sociale, qui fait référence à la sensation d'être avec d'autres dans un environnement médiatisé. Notre revue de littérature indique que cette dimension reste largement sous-explorée, car la majorité des études se sont concentrées sur des jeux sérieux à joueur unique et ne permettent donc pas l'analyse de cette dimension.

Étendre les efforts de recherche pour inclure davantage de jeux sérieux multijoueurs fournirait des informations précieuses sur le rôle de la présence sociale dans ces contextes. En enquêtant sur l'impact de la présence sociale sur l'engagement des joueurs, la motivation et les résultats d'apprentissage, les chercheurs pourraient mieux comprendre les avantages potentiels de l'incorporation de mécanismes multijoueurs dans la conception des jeux sérieux.

2.11 Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un panorama des connaissances actuelles sur la collaboration dans les environnements d'apprentissage médiatisés, en articulant plusieurs dimensions clés. Notre analyse des environnements virtuels collaboratifs a souligné l'importance des caractéristiques de l'interface, notamment le point de vue et les modalités de communication, dans la structuration des interactions. L'examen des processus collaboratifs a mis en évidence le rôle central des mécanismes d'awareness, de régulation, de partage d'informations et de discussion dans la coordination des activités collectives. Notre exploration des différentes formes de régulation (autorégulation, co-régulation, régulation partagée) a révélé la complexité des processus d'ajustement mutuel dans les situations d'apprentissage collaboratif.

La revue systématique de la littérature sur la présence dans les jeux sérieux a complété ce tableau en identifiant les facteurs influençant le sentiment de présence et ses impacts sur l'expérience d'apprentissage. Cette analyse a notamment révélé le manque de travaux sur les liens entre présence sociale et comportements collaboratifs, ainsi que sur l'influence des caractéristiques de l'environnement virtuel sur ces dimensions.

Plusieurs axes de recherche émergent de cette synthèse théorique. Tout d'abord, la nécessité d'approfondir notre compréhension de l'influence des paramètres de l'interface sur les dynamiques collaboratives. Ensuite, l'importance d'explorer les relations entre présence sociale et processus de régulation dans les environnements d'apprentissage médiatisés. Enfin, le besoin de développer des approches méthodologiques permettant d'appréhender la complexité des interactions collaboratives à différentes échelles d'analyse.

2.12 Questions de recherche

Cette analyse théorique, a mis en évidence plusieurs pistes de recherche inexplorées dans notre compréhension actuelle des dynamiques collaboratives en environnement virtuel d'apprentissage. Premièrement, bien que l'importance du sentiment de présence dans les jeux sérieux ait été largement reconnue, nous avons constaté un manque d'études systématiques sur l'influence des paramètres spécifiques de l'interface, tels que le point de vue et les modalités de communication. Cette lacune est particulièrement problématique car ces paramètres constituent des leviers fondamentaux de conception, susceptibles d'influencer profondément l'expérience des utilisateurs. Comme l'ont souligné Slater et al. (2010) [26] et Denisova Cairns (2015) [17], le point de vue peut modifier significativement le sentiment de présence, mais son impact spécifique sur la présence sociale et les comportements collaboratifs reste largement inexploré. Deuxièmement, notre analyse a révélé que si les concepts de présence sociale et de processus collaboratifs ont été étudiés séparément, leurs interrelations demeurent peu comprises. Cette déconnexion entre ces deux dimensions pourtant intrinsèquement liées limite notre capacité à concevoir des environnements d'apprentissage véritablement efficaces. Les travaux de Garrison et al. (2010) [106] suggèrent des liens entre présence sociale et collaboration, mais les mécanismes précis de cette relation et la façon dont elle est modulée par les caractéristiques de l'environnement restent à clarifier. Troisièmement, nous avons identifié un besoin d'approfondissement méthodologique : la plupart des études existantes se concentrent sur des analyses unidimensionnelles des interactions collaboratives, ne capturant pas la complexité

multifacette de ces processus. Comme le soulignent Järvelä et al. (2016) [15] et Suthers et al. (2010) [32], une compréhension holistique des phénomènes collaboratifs nécessite des approches analytiques intégrées, combinant différents niveaux d'observation. Sur la base de ces limites, nous formulons les questions de recherche suivantes :

- Quel est l'impact des technologies sur le sentiment de présence et sur les comportements collaboratifs ? Cette question vise à combler la première lacune identifiée en examinant spécifiquement comment les caractéristiques de l'environnement virtuel (point de vue, modalités de communication) façonnent l'expérience collaborative des apprenants.
- Existe-t-il un lien entre le sentiment de présence sociale et les comportements de collaboration ? Comment ce lien est-il affecté par les choix de conception ? Cette question répond directement à la deuxième lacune en interrogeant les relations entre présence sociale et processus collaboratifs, ainsi que l'influence des paramètres de l'environnement sur ces relations.
- Comment modéliser les dynamiques collaboratives de manière intégrée en combinant différentes sources de données ? Cette question méthodologique, répondant à la troisième lacune, vise à développer des approches d'analyse permettant de capturer la complexité des interactions collaboratives.

Pour répondre à ces questions, nous avons adopté une approche méthodologique progressive structurée en quatre études complémentaires, chacune s'appuyant sur les résultats de la précédente :

Notre première étude (Chapitre 3) examine l'impact du point de vue (première vs troisième personne) sur la présence sociale et les comportements collaboratifs dans un jeu sérieux multi-joueurs. En ciblant spécifiquement cette variable de conception fondamentale, nous établissons une base de compréhension des mécanismes par lesquels les caractéristiques de l'interface peuvent influencer l'expérience collaborative. Les résultats de cette étude, qui démontrent l'influence positive du point de vue à la première personne sur le partage d'informations et certaines dimensions de la présence sociale, ont directement guidé l'évolution de notre dispositif expérimental pour les études suivantes.

Dans notre deuxième étude (Chapitre 4), nous approfondissons notre investigation en nous concentrant sur l'influence des modalités de communication (texte, audio, vidéo) sur la présence sociale et les processus de régulation. En nous appuyant sur les connaissances acquises dans la première étude concernant l'importance de la perception de l'environnement, nous élargissons notre questionnement aux modalités d'interaction entre participants. Cette étude révèle des différences significatives dans la mise en œuvre des processus collaboratifs selon les modalités, notamment dans l'efficacité de la co-régulation et dans l'évolution temporelle des comportements.

Les deux études suivantes (Chapitres 5 et 6) constituent une progression méthodologique, s'appuyant sur les observations empiriques des deux premières pour développer des approches analytiques plus sophistiquées. Le Chapitre 5 propose une modélisation des comportements collaboratifs en combinant l'analyse des traces d'interaction et du contenu des échanges (chat). Cette approche multi-niveaux, intégrant analyses de fréquence, réseaux de co-occurrence et chaînes de Markov, permet d'identifier des patterns spécifiques dans la structuration des activités collaboratives.

Enfin, le Chapitre 6 étend cette démarche analytique à la modalité audio en exploitant

les avancées récentes en traitement automatique du langage. Cette extension permet une comparaison systématique des dynamiques collaboratives selon les modalités, enrichissant ainsi notre compréhension des spécificités de chaque canal de communication dans le soutien aux processus collaboratifs.

Cette progression logique, de l'étude isolée des variables de conception à leur intégration dans des modèles analytiques complexes, nous permet d'aborder de manière systématique et complémentaire les différentes facettes de notre problématique de recherche.

Impact du point de vue sur la présence sociale et les processus de collaboration dans un jeu sérieux collaboratif

Le point de vue, c'est comme choisir entre être Batman ou regarder Batman. Dans les deux cas, c'est génial.

Un doctorant-masqué.

3.1 Introduction

Dans les environnements d'apprentissage collaboratifs médiatisés par les technologies numériques, comprendre les facteurs qui influencent l'engagement et la qualité des interactions entre apprenants est un enjeu crucial. Le chapitre précédent a souligné l'importance du sentiment de présence comme déterminant clé de l'efficacité des situations d'apprentissage collaboratif. Cependant, la manière dont les caractéristiques de l'environnement virtuel façonnent ce sentiment de présence et, par extension, les comportements collaboratifs, reste à approfondir. Un paramètre de conception particulièrement important, mais peu étudié dans ce contexte, est le point de vue adopté par les utilisateurs dans l'environnement virtuel (première ou troisième personne). Si son impact sur l'immersion et la présence spatiale a été largement documenté dans le domaine des jeux vidéo, ses effets sur la présence sociale et les processus collaboratifs dans un cadre d'apprentissage demeurent méconnus. Cette lacune est d'autant plus problématique que le choix du point de vue pourrait avoir des implications significatives sur la conception des environnements d'apprentissage collaboratif et, in fine, sur leur efficacité pédagogique. Ce chapitre vise donc à répondre à la problématique suivante : dans quelle mesure et par quels mécanismes le point de vue dans un environnement virtuel collaboratif influence-t-il le sentiment de présence sociale des apprenants et leurs comportements de collaboration ? Pour aborder cette question, nous avons conçu une étude expérimentale comparant les effets du point

de vue à la première et à la troisième personne dans un jeu sérieux multi-joueurs. Notre hypothèse principale est que la vue à la première personne, en offrant une expérience plus immersive et incarnée, favorisera un sentiment de présence sociale accru et stimulera certains processus collaboratifs clés, notamment le partage d'informations. Cette hypothèse s'appuie sur les théories de la cognition incarnée qui soulignent l'importance de l'expérience corporelle dans les processus cognitifs et sociaux. Pour tester cette hypothèse, nous avons mené une expérimentation auprès de 18 participants, en manipulant le point de vue dans le jeu et en mesurant ses effets sur différentes dimensions de la présence sociale (co-présence, accessibilité psycho-comportementale, symétrie perçue) ainsi que sur les comportements collaboratifs observables. Les résultats de cette étude ont des implications potentielles importantes, tant sur le plan théorique que pratique. Ils permettront d'enrichir notre compréhension des mécanismes qui sous-tendent la collaboration en environnement virtuel et de proposer des recommandations pour la conception de dispositifs d'apprentissage collaboratif plus efficaces. Dans les sections suivantes, nous détaillons le protocole expérimental mis en place, présentons les résultats obtenus et les discutons au regard de la littérature existante. Nous concluons en présentant les évolutions apportées au jeu sérieux, compte tenu des résultats de l'étude.

3.2 État de l'art

Après avoir présenté le contexte général de notre étude et ses enjeux, il convient maintenant d'approfondir les concepts clés qui sous-tendent notre problématique et de préciser nos questions de recherche. Dans la section suivante, nous allons d'abord examiner plus en détail la notion de compétences non techniques et de processus collaboratifs, qui sont au cœur de notre investigation. Nous aborderons ensuite la question spécifique du point de vue dans les environnements virtuels, en rapport avec le sentiment de présence, en soulignant les lacunes actuelles de la littérature concernant son impact sur la présence sociale et la collaboration. Cette analyse nous permettra de formuler des questions de recherche précises, guidant ainsi notre démarche expérimentale.

3.2.1 Processus collaboratifs

L'apprentissage collaboratif est une approche pédagogique de l'enseignement et de l'apprentissage qui implique des groupes d'apprenants travaillant ensemble pour résoudre un problème, accomplir une tâche ou créer un produit [38]. Plusieurs études soulignent l'utilité et les avantages des « équipes coopératives ». Par exemple, ces équipes atteignent des niveaux de réflexion plus élevés et retiennent les informations plus longtemps [39]. Dans ces activités de collaboration, la coordination des actions individuelles au sein de chaque groupe est importante. En effet, puisque les participants ont un objectif commun, ils devront agir en tenant compte de plusieurs contraintes telles que le temps ou l'organisation. Pour cela, plusieurs processus seront utilisés pour la collaboration tels que la sensibilisation, la régulation, le partage d'informations et la discussion [14]. Pour Schmidt (2002) [40], l'awareness fait référence aux « pratiques réciproques de surveillance des autres et de conception d'actions afin de rendre visibles certains aspects de l'activité ». En complément, Yuill et Rogers (2012) [41] étendent le concept d'awareness, non seulement aux actions, mais aussi aux situations dans lesquelles les personnes « ont une

conscience permanente des actions, des intentions, des émotions et d'autres états mentaux d'autres interlocuteurs ». La régulation s'appuie sur l'awareness et se rapporte à la capacité des personnes à planifier, contrôler, évaluer et réguler l'activité conjointe [42]. Le partage d'informations implique la construction d'un terrain d'entente, ce qui signifie que les membres collaborent pour assurer la compréhension et fonder leurs connaissances et hypothèses mutuelles [43]. La discussion a lieu lorsque les participants rassemblent et évaluent les arguments pour et contre les options disponibles, et prennent des décisions pour les alternatives sur la voie d'une solution finale [14].

3.2.2 Point de vue

Plusieurs travaux ont souligné l'impact des caractéristiques de l'environnement sur le sentiment de présence sociale. Ainsi, la richesse des indices sociaux véhiculés par les modalités de communication [107] ou encore les possibilités de personnalisation des avatars [108] sont susceptibles de renforcer l'impression de présence des partenaires. Dans cette étude, nous nous intéressons plus spécifiquement à l'influence du point de vue (première ou troisième personne) sur les différentes dimensions de la présence sociale identifiées par Biocca et Harms (2002) [49] : la co-présence, l'accessibilité psycho-comportementale et la symétrie perçue des perceptions. L'enjeu est de mieux comprendre comment cette variable de l'environnement façonne à la fois le vécu subjectif et la dynamique collaborative entre les apprenants. Le point de vue dans les jeux vidéo est un des éléments clés de celui-ci. En effet, le bon choix de ce dernier est primordial étant donné son impact sur bon nombre d'éléments. Ce choix va même jusqu'à catégoriser le jeu en lui-même, un jeu de tir à la première personne sera un « FPS », ce qui signifie « First Person Shooter », alors qu'un jeu de tir à la troisième personne sera un TPS « Third Person Shooter ». Dans notre étude nous nous concentrerons sur les points de vue à la première personne et à la troisième personne qui sont les plus populaires et les plus couramment utilisés. Plusieurs études concernant les jeux vidéo tendent à montrer que le point de vue à la troisième personne augmenterait la conscience de l'espace virtuel, ainsi qu'une meilleure perception de l'avatar au sein de son environnement mais avec un impact négatif sur l'immersion [109, 110]. Plus récemment, des travaux sont allés dans ce sens permettant d'appuyer ces résultats [17]. Certaines études montrent que le point de vue à la première personne est la condition la plus appropriée pour induire un sens élevé de l'incarnation (lié à la présence de soi) [26, 111], tandis que d'autres études n'ont pas trouvé de différence significative [86]. Une étude menée par Gorisse et al. (2017) [54] montre plusieurs résultats significatifs. Il n'y aurait pas de différence concernant le sentiment de présence spatiale entre la première et la troisième personne, et un impact sur l'incarnation concernant les dimensions « self location » et « ownership » en faveur de la première personne. L'étude souligne également qu'à la première personne les interactions sont plus précises, à l'inverse à la troisième personne les joueurs ont une meilleure connaissance de l'espace. On peut voir que les études concernant les points de vue sont à l'heure actuelle assez divergentes et qu'il n'y a pas de consensus, or le point de vue est un élément important dans l'élaboration d'un jeu, comme le démontrent ses divers effets, ainsi que les objectifs variés qu'il peut servir. En effet, le point de vue est souvent réfléchi pour être en accord avec les finalités que souhaitent proposer les créateurs du jeu aux joueurs. De plus, bien que l'influence du point de vue sur la présence sociale est peu documenté, son impact sur les processus collaboratifs est aussi peu exploré.

Cependant, il existe des raisons théoriques de penser que le point de vue pourrait affecter la collaboration. En effet, le point de vue adoptée par l'utilisateur peut influencer sa perception de l'environnement partagé et des autres participants, ce qui pourrait à son tour affecter les dynamiques d'interaction et de coordination. Par exemple, une vue à la première personne pourrait favoriser une immersion plus profonde et un sentiment accru de présence dans l'environnement virtuel [26], ce qui pourrait potentiellement améliorer l'engagement dans les tâches collaboratives. D'autre part, une vue à la troisième personne offre une perspective plus large de l'environnement et des autres avatars [109], ce qui pourrait faciliter la conscience spatiale et la coordination des actions entre les participants. Ainsi, les différents point de vue offertes par les vues à la première et à la troisième personne pourraient affecter la façon dont les participants conceptualisent et abordent les tâches collaboratives. Compte tenu de ces considérations, il apparaît pertinent d'examiner non seulement l'impact du point de vue sur la présence sociale, mais aussi sur les processus collaboratifs spécifiques.

3.3 Questions de recherche

À partir des travaux précédents, nous pouvons supposer que pour engager les utilisateurs dans des activités collaboratives, l'environnement immersif devrait favoriser une bonne expérience de présence sociale. Comme le montre la revue de littérature, le sentiment de présence semble être lié aux actions dans l'environnement virtuel. Nous sommes donc particulièrement intéressés à étudier l'impact des affordances de l'environnement immersif sur l'expérience de présence sociale et les processus collaboratifs. Plus précisément, d'après les travaux présentés précédemment, nous analyserons l'impact du point de vue (première ou troisième personne) sur le sentiment de présence sociale et les processus collaboratifs.

RQ1 : Le point de vue a-t-il un impact sur la présence sociale ?

RQ2 : Le point de vue a-t-il un impact sur les processus collaboratifs ?

3.4 Description du prototype Sous Pression

Nous avons utilisé un jeu sérieux collaboratif, développé par la start-up Skilder, conçu pour mesurer et développer les compétences non techniques, dans le but d'observer les comportements collaboratifs. Le jeu repose sur une collaboration entre trois joueurs dont l'objectif est de réparer les quatre pannes d'un sous-marin. À chaque tour, le niveau d'eau monte progressivement. Le jeu est perdu lorsque le niveau d'eau atteint un certain niveau. Le sous-marin doit donc être réparé avant qu'il ne soit complètement rempli d'eau. Pour ce faire, chaque joueur à son tour peut effectuer plusieurs actions. Chaque joueur a un point de mouvement et deux points de baillement par tour (pour se déplacer, écopier ou réparer une panne). Pour réparer une panne, il doit y avoir au moins deux joueurs dans la salle. Chaque joueur a un pouvoir spécifique qui lui permet d'effectuer une action spéciale. Le Plongeur a un point de mouvement supplémentaire par tour. L'Océanographe peut écopier les salles adjacentes à la sienne. L'Informaticien est capable de déplacer une quantité d'eau d'une salle à une autre par tour.

Les joueurs peuvent interagir entre eux à tout moment, via un flux vidéo et audio. Selon

les conditions expérimentales, les joueurs peuvent jouer soit en première soit en troisième personne. En troisième personne, toutes les actions sont effectuées sur la carte lorsqu'ils jouent leur tour. En première personne, ils doivent effectuer leurs actions directement dans la salle. Le niveau d'eau de chaque salle, le plan du sous-marin et le niveau total d'eau dans le sous-marin ne sont pas accessibles au joueur. Ils reviennent ensuite à un point de vue à la troisième personne. Les actions possibles et les moyens de communication restent les mêmes avec un point de vue à la première ou à la troisième personne.

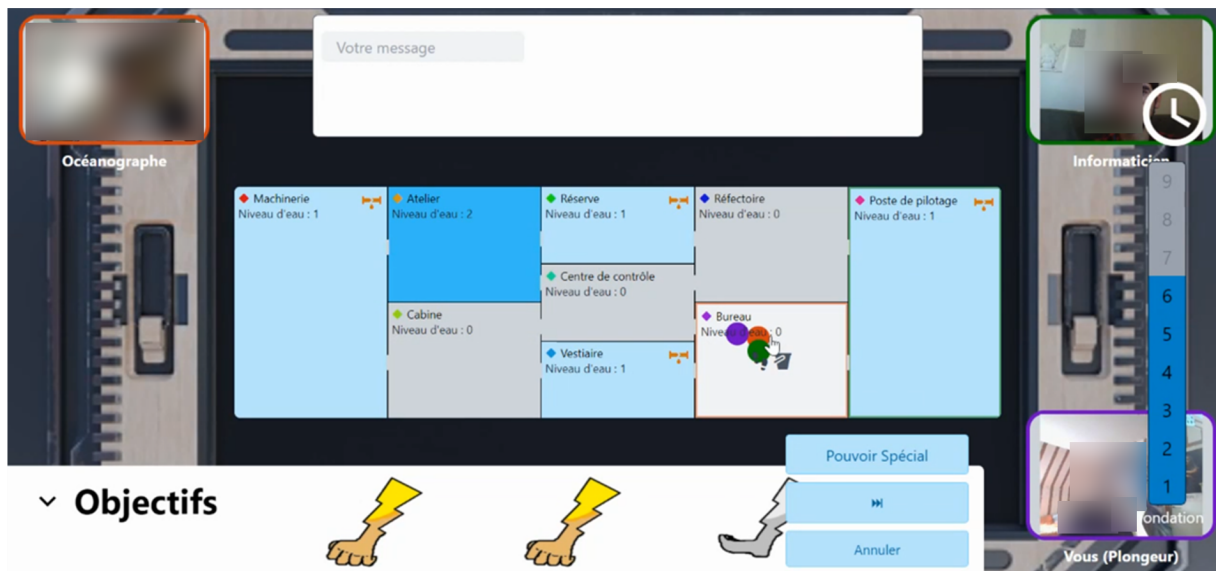


FIGURE 3.1 – Interface du jeu utilisée dans l'étude, point de vue à la troisième personne. 1) Webcam des joueurs pour la communication vidéo, 2) Fenêtre de chat pour la communication entre les joueurs, 3) Plan de la salle du sous-marin, 4) Indicateur des niveaux actuels de l'eau, 5) Minuterie cliquable affichant le temps restant, 6) Menu du jeu avec objectif principal et sous-objectif.

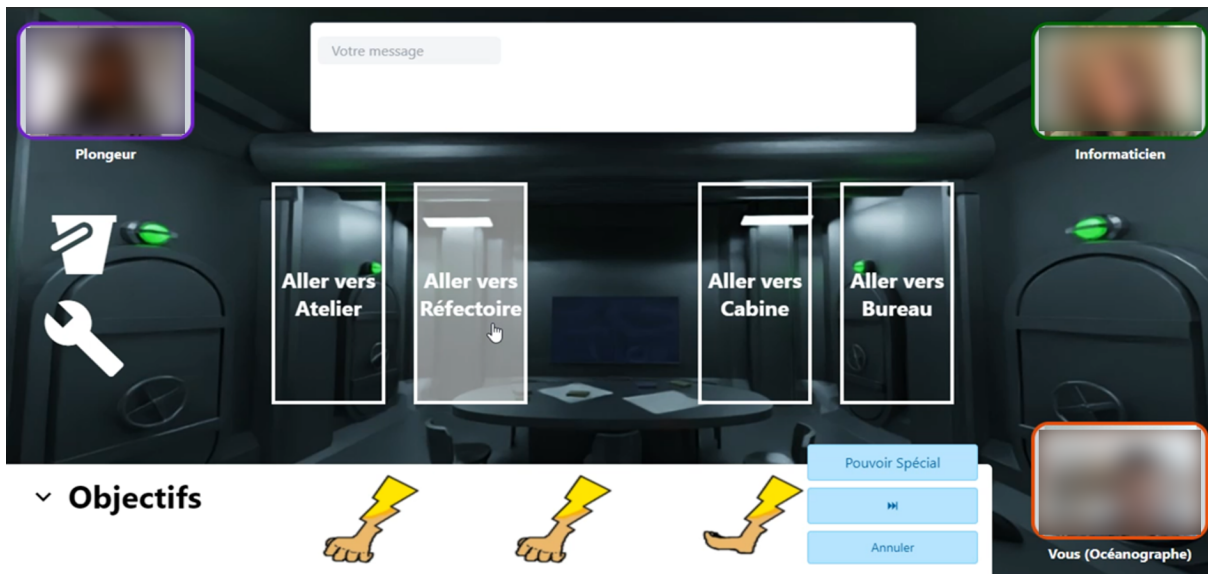


FIGURE 3.2 – Interface du jeu utilisée dans l'étude, point de vue à la première personne. 1) Webcam des joueurs pour la communication vidéo, 2) Fenêtre de chat pour la communication entre les joueurs, 3) Lampe torche cliquable pour l'exploration de l'environnement et la découverte d'objets, 4) Menu du jeu avec objectif, sous-objectif et options d'action, 5) Chemin mis en évidence indiquant le mouvement possible dans la pièce, 6) Brèche dans le sous-marin nécessitant une réparation.

3.5 Étude

3.5.1 Conditions expérimentales

Condition 1 : Les participants n'étaient pas dans la même salle et pouvaient communiquer via webcam et audio. Le jeu était en troisième personne lorsqu'ils ne jouaient pas leur tour et en première personne lorsqu'ils jouaient leur tour (Point de vue à la Première Personne : 1PP). **Condition 2 :** Les participants n'étaient pas dans la même salle et pouvaient communiquer via webcam et audio. Le jeu était uniquement en troisième personne (Point de vue à la Troisième Personne : 3PP). Les résultats tirés de ce travail exploratoire ont vocation à être réinvestis dans la conception d'une version optimisée du jeu sérieux.

3.5.2 Participants

Nous avons recruté 30 participants. En raison de problèmes techniques pendant l'expérience ainsi que de la pandémie, nous n'avons pu utiliser les données que de 18 participants. Ils étaient divisés en 6 groupes (G1, G2, G3, G4, G5, G6) de 3 participants (P1, P2, P3) selon leur disponibilité. Les groupes G1, G2 et G3 étaient associés à la condition 1, et les groupes G4, G5 et G6 étaient associés à la condition 2. Les participants ont été recrutés via la liste de diffusion de l'Université de Lyon. L'âge moyen était de 23,5 ans ($SD = 2,5$) et il y avait une répartition égale de neuf hommes et neuf femmes.

3.5.3 Procédure

Étant donné les conditions sanitaires pendant l'expérience, les sessions de jeu ont été menées à distance. Les joueurs utilisaient leur propre équipement, à savoir un ordinateur, une webcam, un microphone et un casque (ou des écouteurs). Les participants étaient invités à s'asseoir devant leur écran d'ordinateur. Tout d'abord, ils devaient passer par le tutoriel du jeu. Ils ont ensuite commencé à jouer au jeu sérieux, en collaboration avec deux autres participants. Après la fin du premier jeu, ils devaient faire un deuxième jeu avec un rôle différent (mais la même condition). À la fin, un entretien semi-directif était organisé avec les trois participants et les deux expérimentateurs.

3.5.4 Collecte des données/Enregistrement

Nous avons collecté les enregistrements d'écran et de webcam de chaque participant. Après l'expérience, les étudiants étaient invités à remplir un questionnaire : l'Inventaire de la présence sociale en contexte collaboratif (networked minds social presence inventory, 34 éléments) [112]. Nous avons choisi ce questionnaire en raison de son approche de la présence sociale. Les questions se concentrent sur les dimensions de co-présence et d'accessibilité psycho-comportementale. Toutes les questions dans ces dimensions traitent à la fois de la "perception de soi" (par exemple, j'ai prêté une attention particulière à mes partenaires), mais chacune de ces questions est suivie d'une question sur la "perception des autres" (par exemple, mes partenaires ont prêté une attention particulière à moi). La symétrie subjective perçue est calculée comme une corrélation entre les évaluations de la présence sociale de soi "Perception de soi" et de l'autre "Perception de mon partenaire", pour chaque dimension (co-présence et accessibilité psycho-comportementale). À la fin de l'expérience, nous avons mené des entretiens semi-directifs avec les participants pour collecter leurs perceptions et leurs sentiments sur l'expérience vécue.

3.5.5 Analyse vidéo et schémas de codage

L'objectif de cette analyse était de fournir un aperçu quantitatif de la manière dont les participants ont collaboré dans le jeu. Nous nous sommes concentrés sur les quatre processus collaboratifs identifiés dans la section 3.2 (awareness, régulation, partage d'informations et discussion) pour comprendre comment ils étaient impactés par le changement de point de vue (en réponse à la RQ2). Nous avons défini un schéma de codage pour l'analyse vidéo défini ci-après et en détail dans le Tableau 3.1. Deux codeurs ont analysé indépendamment des échantillons vidéo représentant 10 du total des vidéos (et 131 énoncés). Ils ont effectué un test de fiabilité inter-juges avec un résultat de 85 d'accord. Le Kappa de Cohen, qui mesure l'accord entre les deux observateurs, est : $\kappa = 0,899$. Il y avait au total 6 vidéos, pour une durée de 3 heures 33 minutes et 31 secondes. Il y a en moyenne 182 énoncés par jeu dans la condition à la première personne et 159 dans la condition à la troisième personne.

- Awareness : "La mesure dans laquelle la conscience des actions, intentions et état d'esprit actuels des utilisateurs est présente ou rendue visible à tout moment" [41].
"Je vais à la salle des machines"

- Régulation : "Représente les processus que les membres utilisent pour planifier, surveiller, évaluer et contrôler l'activité conjointe" [42]. *"Va à la salle des machines pour épuiser, puis utilise ton pouvoir"*
- Partage d'informations : "Collaboration des membres pour assurer la compréhension et pour s'appuyer sur les connaissances et hypothèses de chacun" [43]. *"Les vestiaires sont à droite de la cabine"*
- Discussion : "Elle a lieu lorsque les participants rassemblent et évaluent les arguments pour et contre les options disponibles, et prennent des décisions concernant les alternatives menant à une solution finale" [14]. *"Je ne suis pas d'accord avec ton idée, je pense qu'il vaut mieux aller à la salle des machines maintenant"*

TABLEAU 3.1 – Catégories, sous-catégories et indicateurs utilisés pour les analyses vidéo des différents processus collaboratifs

Catégorie	Sous-catégorie	Indicateur
Awareness	Conscience de l'action	Dit ce qu'il fait
	Conscience de l'intention	Dit ce qu'il va faire
	Conscience de l'état d'esprit	Partage ce qu'il ressent
Régulation	Planification	Suggère ce qui devrait être fait
		Attribue une tâche
		Demande s'il devrait faire cette action
		Pose une question sur les possibilités de l'autre
	Contrôle	Surveillance
		Donne la parole
Partage d'informations		Pose une question sur la carte/l'objet qu'il ne possède pas
		Donne une indication sur la carte/l'objet
Discussion	Compréhension du jeu	Pose une question sur le jeu
		Donne une explication sur le jeu
	Échange d'idées	Échange des idées pour atteindre une solution
	Construction du consensus	Accepte/rejette la proposition, propose une nouvelle solution

3.6 Résultats

3.6.1 Impact du point de vue sur la présence sociale perçue

Le coefficient alpha de Cronbach a été utilisé pour évaluer la cohérence interne du questionnaire et donc sa fiabilité. Ils se sont avérés très fiables, puisque $\alpha > 0.8$ pour les deux dimensions (voir tableau 3.2). Étant donné la quantité plutôt faible de données que nous avons recueillies auprès de 18 participants, nous avons effectué un test U de Mann-Whitney sur les 2 dimensions de la présence sociale entre les conditions à la première et à la troisième personne (les résultats sont considérés comme significatifs lorsque $\rho < 0.05$), ainsi que la moyenne et l'écart type (voir tableau 3.2). Concernant la symétrie subjective perçue, le test de corrélation de Spearman a été effectué pour chaque questionnaire entre les dimensions "soi" et "autres", puis nous avons calculé la moyenne de ces coefficients pour les 2 conditions (point de vue à la première et à la troisième personne).

TABLEAU 3.2 – Moyenne, écart type, alpha de Cronbach et p-valeur pour les différentes dimensions de la présence sociale

Dimension	Première Personne		Troisième personne		α	ρ
	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ		
Co-présence	5.60	0.717	5.35	1.066	0.929	0.779
Accessibilité psycho-comportementale	6.07	0.357	5.23	1.008	0.934	0.018

TABLEAU 3.3 – Moyenne des coefficients de corrélation de Spearman pour la symétrie subjective perçue entre les questions "soi" et "autres" du questionnaire SPI

Dimension	Première personne	Troisième personne
Co-présence	0.876	0.707
Psychocomportemental	0.839	0.671

Co-présence : En ce qui concerne la dimension de co-présence du SPI, la valeur p $\rho = 0.779$ étant bien au-dessus de 0.05, cela signifie que les résultats ne sont pas significatifs (première personne : moyenne = 5.60, ÉT = 0.717 ; troisième personne : moyenne = 5.35, ÉT = 1.066). Ainsi, le point de vue ne semble pas avoir d'impact sur la co-présence.

Accessibilité Psychocomportementale : En ce qui concerne la dimension psychocomportementale du SPI, la valeur p $\rho = .018$ est inférieure au seuil $\alpha = 0.05$, donc les résultats sont significatifs. Ces résultats suggèrent que le point de vue à la première personne permet une plus grande accessibilité psychocomportementale ($M = 6.07$; ÉT = 0.357) que le point de vue à la troisième personne ($M = 5.23$; ÉT = 1.008).

Symétrie subjective perçue : La moyenne des coefficients de corrélation est plus grande en première personne pour les deux dimensions, à savoir la co-présence (première personne : $\rho = 0.876$; troisième personne : $\rho = 0.707$) et l'accessibilité psychocomportementale perçue (première personne : $\rho = 0.839$; troisième personne : $\rho = 0.671$). Cela semble montrer une symétrie subjective perçue plus forte pour le groupe à la première personne que pour le groupe à la troisième personne. Cela signifie que dans la condition à la pre-

mière personne, les participants ont une meilleure perception de ce que les autres pensent d’eux que ceux dans la condition à la troisième personne.

3.6.2 Analyse des processus collaboratifs

TABLEAU 3.4 – Nombre d’énoncés pour chaque catégorie par groupe et par point de vue

Catégorie	Première personne			Troisième personne		
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Awareness	49	15	49	26	59	32
Régulation	103	109	99	59	124	81
Partage d’informations	76	27	39	5	13	18
Discussion	206	176	143	94	247	198

TABLEAU 3.5 – Nombre moyen d’énoncés dans chaque processus de collaboration pour chaque joueur pendant un jeu dans les conditions à la première et à la troisième personne

Catégories	Première Personne		Troisième Personne		ρ
	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	
Awareness	6.27	3.261	6.50	3.426	0.983
Régulation	17.28	6.215	14.67	6.722	0.424
Partage d’informations	7.89	4.053	2.00	1.369	0.00037
Discussion	29.17	6.704	29.94	14.525	0.776

TABLEAU 3.6 – Pourcentage d’énoncés dans chaque processus de collaboration pour chaque joueur pendant un jeu dans les conditions à la première et à la troisième personne

Catégories	Première Personne		Troisième Personne		ρ
	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	
Awareness	3.49	1.730	4.03	1.559	0.730
Régulation	9.57	3.920	9.99	4.020	0.562
Partage d’informations	4.20	1.652	1.20	0.916	0.0005
Discussion	16.07	3.655	18.11	6.657	0.387

En réponse à la RQ2, nous avons observé les différents indicateurs (décrits dans la section 5.3.2) pour analyser les processus d’awareness, de régulation, de partage d’informations et de discussion. Pour chaque jeu, nous avons compté le nombre d’énoncés dans chaque catégorie pour chaque participant. Le tableau 3.4 présente la somme des énoncés pour chaque groupe (somme des énoncés des deux jeux et des trois joueurs).

Le tableau 3.6 présente le nombre moyen d'énoncés dans chaque processus de collaboration par joueur et par jeu. Nous avons effectué un test U de Mann-Whitney sur la moyenne des deux jeux (par groupe) de chaque joueur concernant chaque catégorie pour les deux points de vue. Nous avons observé une différence significative pour le processus de partage d'informations pendant un jeu selon le point de vue ($\rho = .00037$). Ces résultats suggèrent que le point de vue a un impact sur le processus de partage d'informations, avec un partage d'informations plus important en première personne ($M = 7.89$; $ÉT = 4.053$) qu'en troisième personne ($M = 2.00$; $ÉT = 1.369$). Nous n'avons observé aucune différence significative concernant les autres processus collaboratifs (Awareness, régulation, discussion) entre les conditions à la première et à la troisième personne. Étant donné que le nombre d'énoncés était différent pour chaque jeu, nous avons également calculé la moyenne des énoncés par jeu, mais divisé pour chaque jeu le nombre d'énoncés par catégories sur le nombre total d'énoncés (voir tableau ??). Nous obtenons également des résultats significatifs ($\rho = .0005$), ce qui confirme que le point de vue a un impact sur le partage d'informations, avec un partage d'informations plus important en première personne ($M = 4.20$; $ÉT = 1.652$) qu'en troisième personne ($M = 1.20$; $ÉT = 0.916$). Cependant, nous n'avons observé aucune différence significative concernant les autres processus collaboratifs (Awareness, régulation, discussion) entre le point de vue à la première et à la troisième personne.

3.7 Discussion

3.7.1 Point de vue et présence sociale

Nos résultats montrent que la co-présence n'est pas significativement impactée par le point de vue. La co-présence repose principalement sur la perception des autres en utilisant la classification automatique de la représentation de l'autre. En conséquence, ce résultat peut s'expliquer par le fait que la représentation virtuelle des autres joueurs dans le jeu est la même quel que soit le point de vue (webcam et voix). La perception du corps des autres joueurs ne change donc pas. Cela aurait certainement été différent avec des représentations supplémentaires telles que des ombres ou des avatars lorsque les deux joueurs sont dans la même pièce, comme le soulignent [113], qui ont montré que voir l'avatar de leur partenaire augmentait la co-présence.

Les résultats concernant l'accessibilité psychocomportementale révèlent un impact significatif du point de vue à la première personne, qui semble permettre une plus grande accessibilité psychocomportementale que le point de vue à la troisième personne. Cette différence pourrait être expliquée par l'asymétrie des connaissances introduite par le point de vue à la première personne pour plusieurs raisons. D'abord, le manque d'informations contextuelles lorsque les joueurs sont en vue à la première personne les a peut-être forcés à communiquer avec les deux autres joueurs pour prendre des décisions pertinentes en début de jeu, contrairement à la vue à la troisième personne. Ensuite, les joueurs à la première personne étaient plus dépendants des autres, ce qui les a conduits à faire plus confiance. Un des joueurs a clarifié cela pendant l'entretien (pour le point de vue à la première personne) en déclarant *"Vous ne pouvez pas faire confiance à votre propre perception mais vous devez faire confiance à la perception des autres"* (P1-G3). Enfin, avoir accès à la perception des autres sur les choses est directement associé à la "lecture de l'esprit" et

peut réduire l'incertitude dans les relations [64]. Dans notre cas, il est donc possible que la plus grande dépendance à l'égard des perceptions des autres induite par l'asymétrie des connaissances ait fourni un plus grand sentiment d'accès à l'esprit des autres et ait donc augmenté l'accessibilité psychocomportementale en vue à la première personne.

Les résultats concernant la symétrie subjective perçue révèlent qu'il y a une plus grande corrélation entre le propre sentiment de présence sociale de quelqu'un et sa perception du sentiment de présence sociale de son partenaire à la vue à la première personne qu'à la vue à la troisième personne. En d'autres termes, les participants dans la condition à la première personne ont perçu une sorte de correspondance psychologique et comportementale entre eux et les autres joueurs. Nous pouvons supposer qu'à la vue à la troisième personne, certains joueurs ont ressenti qu'ils donnaient plus (c'est-à-dire de l'attention) que ce que les autres leur donnaient. Un certain déséquilibre pourrait être perçu car, puisque les joueurs ont toutes les informations, il y a moins besoin de coopération pendant leurs tours.

Pour conclure, nos résultats montrent que le point de vue a un impact sur la présence sociale dans le jeu collaboratif, et plus spécifiquement sur les dimensions d'accessibilité psychocomportementale et de symétrie perçue. Il semble que cela soit principalement induit par l'asymétrie des connaissances due aux affordances de l'environnement qui diffèrent dans chaque vue. Cela est en accord avec le travail de Kreijns et al. (2007) [107], qui explique l'impact de l'environnement et de ses caractéristiques sur la présence sociale, et cela complète le travail de Slater et al. (2010) [26], qui a montré que la vue à la première personne pourrait augmenter le sentiment de présence de soi (une autre catégorie du concept de présence). Pour favoriser le sentiment de présence sociale dans un jeu virtuel, il semble donc pertinent d'introduire une asymétrie des connaissances entre les joueurs, ce que permet naturellement la vue à la première personne, en limitant l'accès à certaines informations contextuelles selon le point de vue adopté. Il convient également de faire attention à la conception de la représentation des autres pour améliorer la co-présence.

3.7.2 Point de vue et processus collaboratifs

Nous avons montré que la vue à la première personne augmentait le partage d'informations. Ce résultat peut être expliqué par les affordances de l'environnement, puisque certaines informations (carte du sous-marin, niveau général de l'eau) n'étaient pas visibles pour les joueurs lorsqu'ils étaient à la vue à la première personne. Les joueurs devaient compenser ce manque, communiquant sur les informations manquantes. Nous croyons que cette augmentation du partage d'informations a participé à l'augmentation du sentiment de présence sociale, comme expliqué précédemment pour l'accessibilité psychocomportementale. L'augmentation du partage d'informations grâce à la vue à la première personne peut vraiment bénéficier à l'apprentissage. En effet, la co-construction des connaissances améliore la compréhension en permettant d'argumenter ses propositions, de poser des questions et d'y répondre, et d'ouvrir de nouvelles perspectives et raisonnements [114]. Winne (2010) [115] soutient également cette hypothèse, en faisant valoir que les informations qui ne sont pas accessibles aux autres peuvent nécessiter plus de collaboration pour devenir des connaissances partagées par le groupe.

En revanche, nous n'avons observé aucune différence en termes d'awareness, de régulation et de discussion avec les différents points de vue. Ces résultats peuvent sembler un

peu surprenants, surtout pour l'awareness puisque nous nous attendions à une moindre awareness avec l'introduction de connaissances asymétriques et à plus de régulation pour compenser. Nous pensons donc que le niveau plus élevé de partage d'informations a compensé le manque d'awareness, mais des études supplémentaires seraient nécessaires pour enquêter plus profondément sur la relation entre les quatre processus collaboratifs.

Enfin, nous n'avons pas observé de corrélation directe entre la présence sociale et les processus de collaboration. Cela pourrait être expliqué par un sentiment assez élevé de présence sociale dans les deux conditions. D'autres études devraient être menées puisque certains travaux, tels que celui de Garrison et al. (2010) [106] ont montré que la présence sociale influence les processus de collaboration et développe la conscience des apprenants de l'existence des autres.

3.7.3 Limitations

Premièrement, notre étude a impliqué un nombre plutôt restreint de participants. Cela était principalement dû aux conditions sanitaires, qui ont rendu le recrutement de participants et l'appareillage technologique plus difficile à distance. Cependant, bien que limités, nos résultats sont significatifs et révèlent des tendances qui peuvent être facilement soutenues par la littérature existante dans le domaine. Deuxièmement, nous pensons que l'observation des comportements des participants dans des conditions de laboratoire nous aurait permis d'aller plus loin dans l'analyse et la compréhension des processus collaboratifs qui émergent entre les apprenants. Cela constitue une autre perspective pour approfondir ce travail. Enfin, nous n'avons pas pu analyser de façon pertinente la corrélation entre la perception de la présence sociale et les processus de collaboration qui émergent en raison du nombre plutôt restreint de participants. Nous devrions examiner plus précisément les relations entre les deux, en faisant l'hypothèse qu'un sentiment plus élevé de présence sociale conduirait à plus de processus collaboratifs dans le jeu sérieux ou l'inverse, que des différences dans les processus de collaboration pourraient impacter le sentiment de présence sociale. Nous pourrions également analyser plus profondément l'impact du partage d'informations sur les autres processus de collaboration.

3.8 Proposition d'évolution du jeu sérieux collaboratif

Les résultats ont montré que le point de vue à la première personne favorisait un sentiment de présence sociale accru ainsi qu'un partage d'informations plus important entre les joueurs. Ce constat souligne l'intérêt de manipuler les caractéristiques de l'environnement virtuel, et notamment les modalités de perception de l'avatar, pour influencer la dynamique collaborative. Nous avons entrepris de faire évoluer notre dispositif expérimental afin de l'enrichir et de l'adapter pour une étude à plus grande échelle. L'objectif était double : d'une part, concevoir un jeu sérieux finalisé intégrant les recommandations issues de l'étude précédente (généralisation de la vue à la première personne lors du tour de jeu) ; d'autre part, étendre les possibilités d'action et d'interaction offertes aux joueurs pour susciter des comportements collaboratifs plus diversifiés et potentiellement plus élaborés, compte tenu des limitations observées.

3.8.1 Design final

Suite aux résultats de l'étude précédente et aux modifications apportées, l'interface finale du jeu propose deux vues complémentaires : une vue à la troisième personne pour la navigation globale et une vue à la première personne lors des actions dans les salles. Les figures suivantes présentent ces deux interfaces et détaillent leurs principales fonctionnalités.

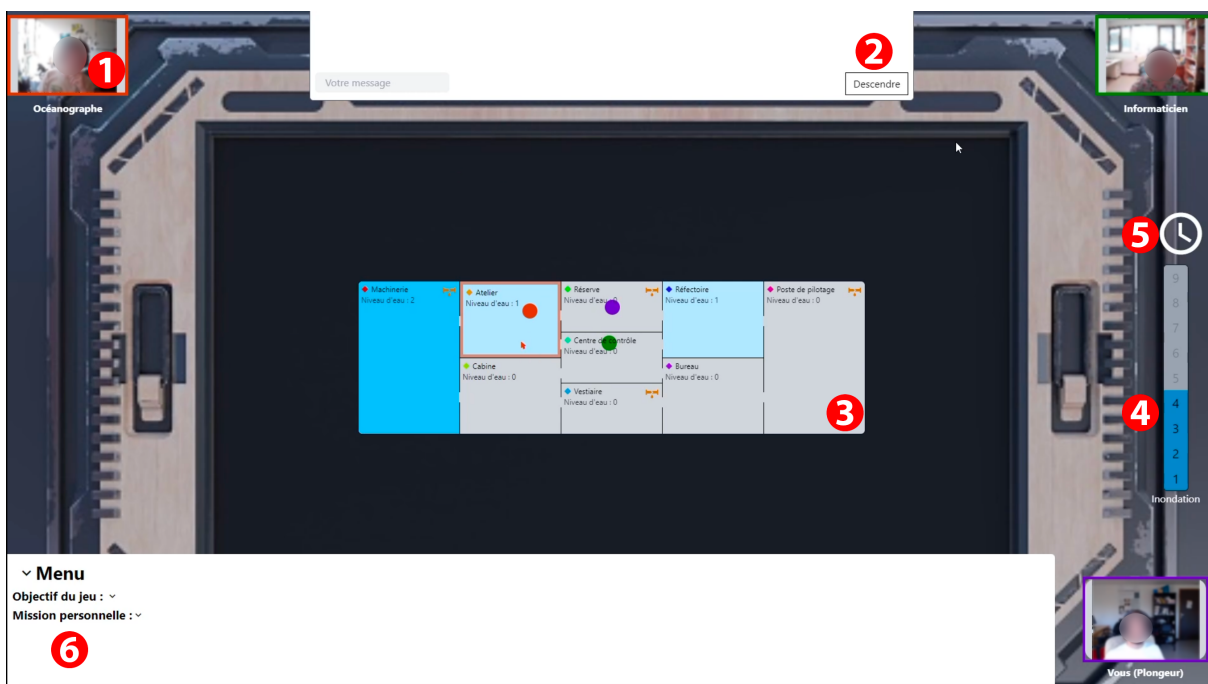


FIGURE 3.3 – Interface du jeu utilisée dans l'étude, point de vue à la troisième personne. 1) Webcam des joueurs pour la communication vidéo, 2) Fenêtre de chat pour la communication entre les joueurs, 3) Plan de la salle du sous-marin, 4) Indicateur des niveaux actuels de l'eau, 5) Minuterie cliquable affichant le temps restant, 6) Menu du jeu avec objectif principal et sous-objectif.

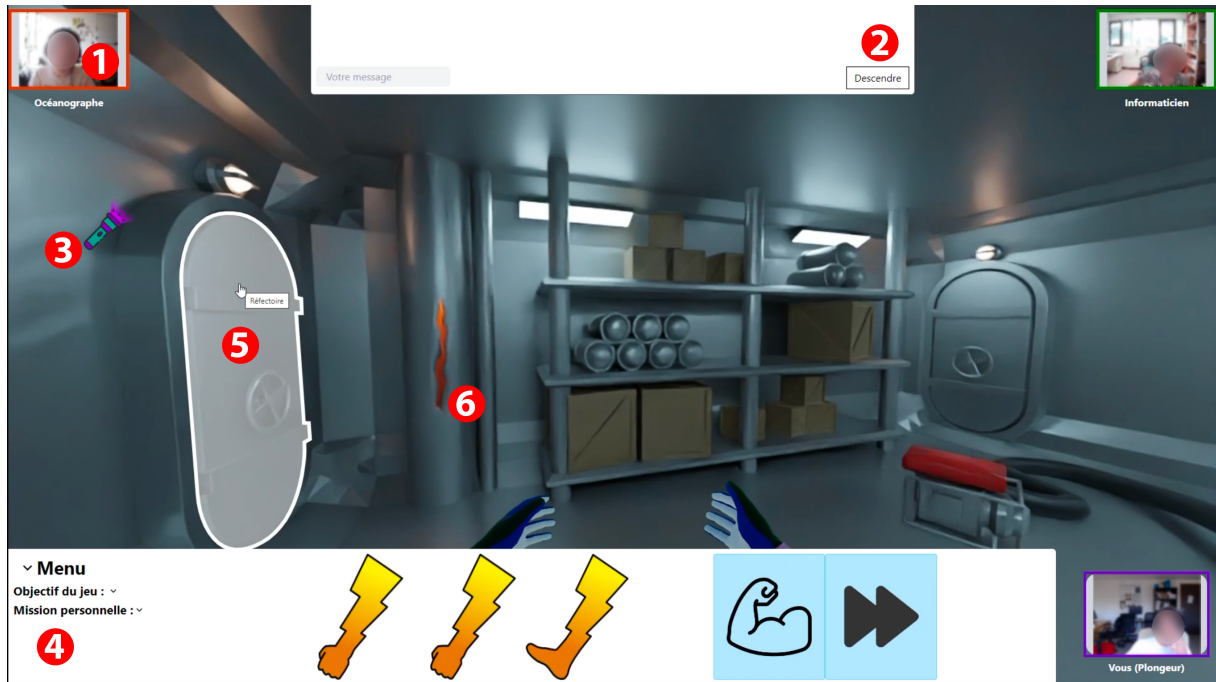


FIGURE 3.4 – **Interface du jeu utilisée dans l'étude, point de vue à la première personne.** 1) Webcam des joueurs pour la communication vidéo, 2) Fenêtre de chat pour la communication entre les joueurs, 3) Lampe torche cliquable pour l'exploration de l'environnement et la découverte d'objets, 4) Menu du jeu avec objectif, sous-objectif et options d'action, 5) Chemin mis en évidence indiquant le mouvement possible dans la pièce, 6) Brèche dans le sous-marin nécessitant une réparation.

3.8.2 Intégration du point de vue à la première personne

Compte tenu de l'influence positive du point de vue à la première personne mise en évidence dans l'étude précédente, nous avons fait le choix de généraliser ce mode de visualisation dans la version finale du jeu. Désormais, lorsque les joueurs effectuent leurs actions, ils basculent systématiquement en vue à la première personne. En dehors de leur tour, les joueurs visualisaient le jeu depuis un point de vue à la troisième personne. Durant leur tour, le point de vue passait à la première personne, et les joueurs devaient entreprendre leurs actions directement dans la pièce. Des informations telles que le niveau d'eau individuel dans chaque pièce, le plan du sous-marin, le niveau total d'eau dans le sous-marin et le temps restant n'étaient pas divulguées aux joueurs jouant (en vue à la première personne).

3.8.3 Ajout de fonctionnalités et de mécaniques de jeu

Si cette étude a mis en évidence l'impact du point de vue, elle a également soulevé de nouvelles questions concernant l'influence d'autres aspects de l'environnement sur la dynamique collaborative. Afin d'enrichir l'expérience des joueurs et de stimuler des comportements collaboratifs plus diversifiés, plusieurs nouvelles fonctionnalités ont été implémentées. Ces ajouts visent notamment à pallier les limitations observées dans l'étude précédente concernant l'analyse des processus de régulation :

- Missions individuelles : en plus de l'objectif commun de réparation du sous-marin, chaque joueur se voit désormais attribuer une mission individuelle consistant à retrouver un objet personnel dissimulé dans l'une des salles. Ce mécanisme vise à introduire une tension entre les buts individuels et le but partagé, rendant ainsi la collaboration plus exigeante. L'ajout de ces missions personnelles permet d'observer plus finement les processus d'autorégulation, notamment comment les joueurs gèrent leurs priorités et équilibrent leurs objectifs personnels avec ceux du groupe.
- Mission collective : Les joueurs doivent trouver un objet commun, dissimulé dans l'une des salles. Cette nouvelle tâche collective, distincte de l'objectif principal de réparation du sous-marin, offre une opportunité supplémentaire d'observer les processus de co-régulation au sein du groupe. Elle nécessite en effet une coordination et une prise de décision partagée pour allouer les ressources entre les différents objectifs.
- Introduction d'une lampe torche : les joueurs disposent dorénavant d'une lampe torche qu'ils peuvent activer lors des phases en vue à la première personne. Cet outil leur permet d'explorer plus en détail l'environnement et potentiellement de découvrir des éléments cachés, liés à leur mission individuelle et collective. L'utilisation de la lampe torche, en tant que décision individuelle, offre un levier supplémentaire pour observer les processus d'autorégulation des joueurs, notamment dans leur gestion des ressources et leur exploration stratégique de l'environnement.

Ces nouvelles mécaniques de jeu, en diversifiant les types d'actions et de décisions à prendre, offrent un terrain plus riche pour l'analyse des comportements collaboratifs. Elles permettent notamment de mieux distinguer et caractériser les processus d'autorégulation et de co-régulation, adressant ainsi les limites identifiées dans le chapitre 3 concernant le manque d'éléments de jeu pour une analyse approfondie des comportements.

3.8.4 Modification du design

Suite aux enseignements tirés de notre première étude et en s'appuyant sur les concepts de présence développés dans le chapitre 2, deux modifications significatives ont été apportées au design du jeu :

- Ajout de bras visibles en vue à la première personne : Dans la nouvelle version, les joueurs peuvent désormais voir leurs propres bras lorsqu'ils sont en vue à la première personne. Cette modification vise à renforcer le sentiment de présence de soi, une des dimensions clés de la présence identifiées par Lee (2004) [59]. En offrant une représentation visuelle du corps du joueur dans l'environnement virtuel, nous cherchons à augmenter le sentiment d'incarnation et d'immersion, lié au sentiment de présence. Cela devrait permettre aux joueurs de se sentir plus directement impliqués dans leurs actions, potentiellement influençant leur engagement et leurs comportements collaboratifs.
- Intégration des éléments de déplacement dans le décor : Les options de déplacement, auparavant présentes sous forme de boutons d'interface, sont maintenant intégrées directement dans les éléments de décor du jeu. Par exemple, les joueurs peuvent cliquer sur une porte pour se déplacer vers une autre pièce. Cette modification vise à améliorer la présence spatiale, autre dimension importante de la présence

selon Heeter (1992) [50]. En rendant l'environnement plus interactif et cohérent, nous cherchons à renforcer le sentiment "d'être là" dans le sous-marin virtuel. Cela devrait non seulement augmenter l'immersion, mais aussi potentiellement influencer la façon dont les joueurs perçoivent et interagissent avec l'espace partagé, un aspect crucial de la collaboration.

- Amélioration générale des graphismes : Une attention particulière a été portée à l'amélioration de la qualité visuelle générale du jeu, incluant des logos plus détaillées, un meilleur éclairage et des effets visuels plus réalistes (comme la visibilité du niveau d'eau à la première personne). Ces améliorations visent à renforcer le réalisme perçu de l'environnement.

Ces modifications du design, en renforçant les différentes facettes du sentiment de présence (présence de soi, présence spatiale, réalisme), visent à créer une expérience plus immersive et engageante. Comme l'ont souligné Biocca et Harms (2002) [49] dans leurs travaux sur la présence sociale, un fort sentiment de présence peut influencer positivement les interactions sociales et la collaboration. Nous espérons ainsi que ces améliorations contribueront à susciter des comportements collaboratifs plus riches et naturels, offrant un terrain d'étude plus fertile pour notre analyse des processus de régulation et de collaboration. En outre, ces modifications devraient nous permettre d'explorer plus en profondeur les liens entre le sentiment de présence et les comportements collaboratifs, un aspect que cette première étude n'avait pu qu'appréhender. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour comprendre comment l'expérience subjective de l'environnement virtuel peut influencer les dynamiques de groupe et les stratégies de collaboration.

3.9 Conclusion

Cette étude exploratoire a permis de mettre en lumière l'influence significative du point de vue sur le sentiment de présence sociale et les processus collaboratifs dans un jeu sérieux multi-joueurs. Nos résultats ont notamment montré que le point de vue à la première personne favorisait un sentiment de présence sociale accru ainsi qu'un partage d'informations plus important entre les joueurs. Ces observations soulignent l'importance de considérer attentivement les caractéristiques de l'environnement virtuel, en particulier les modalités de perception et d'interaction, lors de la conception d'expériences d'apprentissage collaboratif. Les enseignements tirés de cette première étude ont guidé l'évolution de notre dispositif expérimental. L'intégration systématique de la vue à la première personne lors du tour de jeu, l'ajout de nouvelles fonctionnalités comme la lampe torche et les missions individuelles, ainsi que les améliorations apportées au design visuel, visent à enrichir les possibilités d'action et d'interaction offertes aux joueurs. Ces modifications devraient permettre d'observer des comportements collaboratifs plus diversifiés et potentiellement plus élaborés, tout en renforçant le sentiment de présence des participants.

Impact des modalités de communication sur la présence sociale et les processus de régulation dans un jeu collaboratif

Parler, c'est bien. Écouter, c'est mieux. Collaborer, c'est le top.

Un doctorant bavard.

4.1 Introduction

Le chapitre précédent a mis en évidence l'influence du point de vue (première ou troisième personne) sur le sentiment de présence sociale et certains processus collaboratifs dans un jeu sérieux multi-joueurs. Ces résultats soulignent l'importance de considérer les caractéristiques de l'environnement virtuel pour favoriser l'engagement social et la collaboration entre apprenants.

Au-delà du point de vue, les modalités de communication offertes aux utilisateurs constituent un autre levier majeur pour façonner les interactions dans les environnements d'apprentissage collaboratif. Le choix de la modalité (textuelle, audio, vidéo) est susceptible de modifier la manière dont les apprenants perçoivent la présence des autres et régulent leurs activités collectives [16, 106].

Cette question s'inscrit dans un enjeu plus large de conception d'environnements d'apprentissage collaboratifs efficaces et engageants. En effet, à l'heure où les formations à distance et les dispositifs numériques se multiplient, comprendre comment optimiser les interactions médiatisées devient crucial pour garantir la qualité des apprentissages. Notre étude vise ainsi à contribuer à ce champ de recherche, en apportant des éclairages empiriques sur l'impact des modalités de communication dans un contexte de jeu sérieux collaboratif.

Peu d'études ont examiné l'impact des modalités sur les différentes dimensions de la présence sociale et sur la mise en œuvre des processus de régulation dans un contexte d'apprentissage collaboratif.

L'objectif de ce chapitre est donc d'étudier l'influence des modalités de communication (textuelle, audio, vidéo) sur la perception de la présence sociale et les processus de régulation dans un environnement collaboratif. Nous faisons l'hypothèse que les modalités offrant une plus grande richesse d'indices sociaux (comme la vidéo) favoriseront un sentiment de présence sociale et une meilleure régulation.

Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux présentés dans les chapitres précédents, en approfondissant notre compréhension des facteurs qui façonnent la collaboration en environnement virtuel. Elle vise à fournir des recommandations concrètes pour la conception d'environnements d'apprentissage collaboratifs plus efficaces, tout en contribuant au développement des connaissances théoriques sur les mécanismes sous-jacents à la collaboration médiatisée.

Pour tester cette hypothèse, nous avons mené une étude expérimentale auprès de 72 participants engagés dans une tâche collaborative via différentes modalités de communication. Nous présentons dans un premier temps le dispositif expérimental et le protocole de recueil et d'analyse des données. Nous exposons ensuite les résultats obtenus concernant l'impact des modalités sur la présence sociale perçue (co-présence, engagement psychocomportemental, symétrie des perceptions) et sur les processus de régulation individuelle et collective.

Nous discutons enfin ces résultats au regard de la littérature et identifions des implications pour la conception d'environnements collaboratifs adaptés. Nous concluons en soulignant les apports et limites de cette étude et en ouvrant des perspectives pour approfondir la compréhension des liens entre communication, présence sociale et régulation dans les situations d'apprentissage collaboratif médié par les technologies.

4.2 État de l'art

4.2.1 Environnements d'apprentissage collaboratif

La dynamique de la collaboration, en particulier dans les environnements collaboratifs, a déjà donné lieu à de nombreux travaux de recherche. Ces technologies ont été reconnues comme des outils efficaces pour améliorer les performances cognitives [116,117], stimuler la construction des connaissances [118], et finalement améliorer les résultats d'apprentissage [119].

Des études corroborent que les étudiants engagés dans des environnements collaboratifs rapportent des niveaux d'apprentissage plus élevés [120], participent de manière plus égale au processus d'apprentissage [121,122], et sont impliqués dans des discussions plus complexes et stimulantes que lorsqu'ils travaillent seuls [123].

Les environnements d'apprentissage collaboratifs médiatisés présentent à la fois des opportunités et des défis. Malgré leurs avantages potentiels, certaines études rapportent des expériences mitigées. Certains apprenants trouvent les discussions plus confuses [124], moins productives [125], et plus chronophages [121] par rapport aux contextes traditionnels en face à face. D'autres recherches ont mis en évidence des problèmes tels que des taux de participation plus faibles [126], une cohésion de groupe réduite [127], et une satisfaction diminuée [128]. Ces résultats contrastés soulignent l'importance d'une conception minutieuse de ces environnements, prenant en compte à la fois les aspects technologiques et les dynamiques socio-cognitives des groupes [16]. Dans ce contexte, les canaux de com-

munication jouent un rôle crucial dans la facilitation d'interactions efficaces [129]. Les différentes modalités (texte, audio, vidéo) offrent des attributs uniques qui influencent l'efficacité des tâches collaboratives [130]. Par exemple, la communication vidéo, contrairement au texte, transmet des signaux non verbaux comme les expressions faciales et les gestes, essentiels pour la compréhension mutuelle [27]. Cependant, chaque modalité présente ses propres avantages et inconvénients. Le texte peut favoriser une réflexion plus approfondie mais manquer de spontanéité, tandis que l'audio et la vidéo peuvent enrichir les interactions mais aussi introduire des distractions. Ainsi, bien que la technologie offre le potentiel d'améliorer les interactions à distance, le choix et l'utilisation appropriés des modalités de communication restent un défi central dans la conception d'environnements d'apprentissage collaboratifs efficaces.

Chercher à avoir le moyen de communication le plus complet n'est pas forcément le choix le plus approprié. Toutes les tâches collaboratives ne nécessitent pas la profondeur offerte par les modalités à haute richesse. Parfois, un simple chat textuel ou audio peut suffire en raison de leur accessibilité et de leur facilité d'utilisation. Par conséquent, lors de la sélection de la modalité de communication appropriée, il est crucial de considérer la nature de la tâche collaborative, les compétences technologiques des participants et les résultats souhaités [131–133].

Dans notre étude, nous portons notre attention sur le rôle critique des processus de régulation, soulignés par Järvelä et al. (2015) [134] comme un élément essentiel pour résoudre les difficultés de communication rencontrées dans les environnements collaboratifs. Émergeant à la fois de la dynamique individuelle et de groupe, ces processus servent de fondement sur lequel l'apprentissage se construit. Notre étude se concentre principalement sur l'approfondissement de ces mécanismes de régulation dans le contexte des différentes modalités de communication.

4.2.2 Processus de régulation

Dans le contexte de notre étude sur les modalités de communication, nous nous intéressons particulièrement à la façon dont ces processus peuvent être influencés par différents canaux de communication.

Peu de recherches ont été menées jusqu'à présent sur la façon dont les modalités de communication affectent les processus de régulation. Plusieurs études ont montré que la réduction en ligne des signaux sociaux (comme la communication par chat) et l'asynchronicité ou la semi-synchronicité des interactions peuvent amener les individus à se sentir anonymes et moins conscients d'eux-mêmes, diminuant finalement leur capacité à s'auto-réguler et à se voir du point de vue des autres [135–137]. Pour compenser les limites du support de communication et l'absence de signaux sociaux, les participants doivent adapter leur langage [138, 139]. Cette adaptation n'est pas immédiate et peut potentiellement affecter les processus de régulation.

Dans des études récentes, Järvelä et al. (2021) [140] soulignent les défis liés à l'observation et à la compréhension des processus de régulation. Ils soulignent l'importance de considérer la nature située et cyclique de ces processus. Les auteurs soutiennent que la recherche empirique devrait cibler non seulement l'occurrence des activités de régulation, mais aussi comment la régulation de l'apprentissage évolue au fil du temps. De plus, ils insistent sur le manque de méthodes pour "rendre visibles" les processus mentaux qui sont

souvent invisibles et la limitation des mesures subjectives (comme le codage vidéo). Si l'autorégulation peut être évaluée avec l'analyse des journaux de données, cette limitation est particulièrement vraie pour la régulation sociale partagée, qui implique une analyse approfondie des conversations de groupe comme l'ont fait Järvelä et al. (2016) [15].

Cette étude vise à comprendre l'impact des modalités de communication sur les processus de régulation au sein d'un jeu collaboratif. Pour cela, nous procédons à deux analyses complémentaires : une analyse globale, et une analyse temporelle permettant de suivre l'évolution des processus de régulations au cours du jeu. Nous proposons d'adopter une approche objective utilisant les learning analytics pour analyser les processus de régulation, en nous concentrant plus spécifiquement sur les processus autorégulés et co-régulés. Cependant, pour obtenir une compréhension holistique de la dynamique collaborative dans ces environnements, il est crucial de considérer non seulement les processus de régulation, mais aussi la manière dont les apprenants perçoivent et ressentent leur interaction avec les autres. C'est ici qu'intervient le concept de présence sociale, qui joue un rôle fondamental dans la façon dont les apprenants s'engagent dans des activités collaboratives médiatisées par la technologie.

4.2.3 Présence sociale

Historiquement, le sentiment de présence sociale dans les environnements virtuels était principalement considéré à travers un prisme technocentrique, la théorie de la richesse des médias postulant que certains médias offrent intrinsèquement une communication plus riche en raison de leurs capacités technologiques [27]. En substance, les technologies plus riches étaient considérées comme offrant un sentiment plus profond "d'être là". Au contraire, la théorie du traitement de l'information sociale (SIPT) de Walther (1992) [141] a introduit une approche plus centrée sur l'humain. Elle suggère qu'avec un temps adéquat, les individus peuvent s'adapter à n'importe quel média, qu'il soit riche ou limité en signaux, pour parvenir à une meilleure communication. Cette adaptabilité souligne l'importance des stratégies de communication individuelles. Le modèle hyperpersonnel va plus loin en suggérant que la communication médiée par ordinateur (CMC) peut parfois produire une intimité encore plus grande que les interactions en face à face en raison de la présentation de soi sélective [139].

Cependant, bien que ces théories mettent l'accent sur l'adaptabilité humaine, les caractéristiques inhérentes d'une modalité de communication ne peuvent pas être entièrement écartées. Nous pensons qu'elles peuvent influencer la présence sociale, en particulier dans des scénarios contraints. En substance, bien que les affordances technologiques jouent un rôle dans la formation de la présence sociale, l'adaptabilité humaine et les stratégies de communication ont également une importance significative. Pour des interactions virtuelles efficaces, il est essentiel de considérer à la fois le potentiel technologique et l'agentivité, c'est à dire la capacité des utilisateurs à agir de façon intentionnelle sur eux-même, les autres et l'environnement. Pour appuyer cette affirmation, nous pouvons nous appuyer sur la littérature existante. Cela inclut des études sur l'impact du niveau d'interactivité avec un agent virtuel sur le sentiment de présence sociale [142], la qualité audio avec un système audio à 6 canaux (Dolby 5.1) ou 2 canaux (Dolby Stéréo) [143], et l'utilisation de retour haptique pour la communication entre utilisateurs [144]. De plus, des études ont été menées pour comparer les modalités de communication. Une revue systématique

menée par Oh et al. (2018) [85] indique que si les modalités audio et vidéo peuvent avoir un avantage comparatif par rapport au texte pour la communication, la pertinence des modalités audiovisuelles par rapport aux modalités audio seules est plus nuancée, et les résultats ne sont pas nécessairement significatifs.

Bien que les processus de régulation et le sentiment de présence sociale soient tous deux reconnus comme des éléments cruciaux dans les environnements d'apprentissage collaboratif médiatisés, peu d'études ont exploré explicitement les relations entre ces deux dimensions. Quelques travaux ont cependant commencé à éclairer ces liens potentiels. Ainsi, Moon Cho (2013) [145] a mis en évidence que l'apprentissage autorégulé, en particulier l'autosurveillance de l'interaction, est un facteur favorable de la présence sociale perçue dans des cours en ligne asynchrones. Cette étude suggère que les apprenants capables de réguler efficacement leurs interactions sont plus susceptibles de ressentir et de générer un sentiment de présence sociale. Dans une perspective complémentaire, Gunawardena (1995) [146] souligne que ce n'est pas tant la modalité de communication en soi, mais plutôt la nature des interactions et le sentiment de communauté qui influencent la perception de la présence sociale dans les environnements médiatisés. Ces résultats font écho à nos observations sur l'importance des processus de co-régulation dans la construction d'une expérience collaborative efficace (voir chapitre 3). Ils invitent à approfondir l'étude des relations dynamiques entre régulation et présence sociale, en examinant notamment comment différentes modalités de communication peuvent moduler ces interactions. Cette perspective intégrative, encore peu explorée dans la littérature, pourrait offrir des pistes prometteuses pour optimiser la conception des environnements d'apprentissage collaboratif.

4.3 Questions de recherche

Compte tenu du paysage théorique présenté dans les sections précédentes, notre recherche vise à étudier dans quelle mesure différentes modalités de communication impactent la collaboration, en se concentrant spécifiquement sur les dimensions de présence sociale et les processus de régulation dans un contexte d'apprentissage collaboratif. Cette recherche contribue à notre compréhension de la manière dont ces modalités peuvent être optimisées dans la conception et la mise en œuvre des environnements collaboratifs, et comment elles façonnent la collaboration, la présence sociale et les processus de régulation. Nous abordons plus spécifiquement les questions de recherche suivantes :

- RQ 1 : Quels sont les impacts des modalités de communication sur la présence sociale ? Nous visons à comprendre les effets des modalités de communication (texte, audio, vidéo) sur la présence sociale perçue par les utilisateurs. Pour cela nous analyserons plus précisément les sous-dimensions de la présence : la co-présence et l'accessibilité psychocomportementale perçue sous différentes modalités pour fournir une compréhension plus profonde de l'impact sur la présence sociale.
- RQ 2 : Quels sont les impacts des modalités de communication sur les processus de régulation ? Nous analysons l'impact de différentes modalités de communication sur les processus de régulation, en particulier l'auto-régulation et la co-régulation.
- RQ 3 : Comment les processus de régulation évoluent-ils à travers les différentes phases des activités collaboratives ? Notre objectif est d'examiner l'évolution des

processus de régulation entre différentes parties des activités collaboratives. L'intention sous-jacente est de découvrir si et comment l'évolution des processus de régulation est influencée par la modalité de communication sélectionnée.

- RQ 4 : Existe-t-il une corrélation entre la présence sociale et les processus de régulation, et cette corrélation varie-t-elle selon les différentes modalités de communication ?

4.4 Étude

4.4.1 Conditions expérimentales

- Condition Vidéo : Les participants n'étaient pas dans la même pièce, mais ils pouvaient communiquer via webcam, audio et chat.
- Condition Audio : Les participants n'étaient pas dans la même pièce, mais ils pouvaient communiquer via audio et chat.
- Condition Chat : Les participants n'étaient pas dans la même pièce, mais ils pouvaient communiquer via chat.

4.4.2 Participants

Pour cette expérimentation, nous avons recruté 72 participants via les listes de diffusions de notre université. L'âge moyen était de 21,5 ans ($\sigma = 1,7$) avec une répartition de 25 hommes et 47 femmes. Les participants ont été répartis aléatoirement en 24 trinômes (8 par condition expérimentale). Cette taille d'échantillon substantielle doit permettre de dégager des tendances robustes et d'effectuer des analyses statistiques poussées.

4.4.3 Procédure

Les passations se sont déroulées dans les locaux de notre laboratoire. Chaque trinôme était installé dans une pièce dédiée, et séparé. Après une présentation du protocole et le recueil des consentements éclairés, les participants étaient équipés du matériel nécessaire (casque audio, webcam) puis familiarisés avec le jeu grâce à un tutoriel interactif. Ils réalisaient ensuite deux sessions de jeu d'une durée de 20 minutes chacune. Un questionnaire était administré après la session pour mesurer le sentiment de présence sociale. Enfin, des entretiens semi-directifs étaient menés pour chaque groupe à l'issue des passations afin de recueillir le vécu subjectif des participants. L'ensemble des échanges et des actions de jeu étaient enregistrés pour permettre une analyse a posteriori. Au total, les passations duraient environ 1h30 par trinôme.

4.4.4 Données recueillies

Grâce à ce dispositif, nous avons pu recueillir un corpus conséquent et varié de données pour étudier la collaboration sous ses différentes facettes :

- Traces d'interaction : grâce à l'implémentation d'un système de logs, l'ensemble des actions des joueurs dans l'environnement (déplacements, manipulations d'objets, déclenchement de pouvoirs spéciaux...) étaient enregistrées et horodatées.

- Contenu des échanges : la totalité des communications entre les joueurs (audio, texte, vidéo) a été capturée via le logiciel OBS.
- Mesures auto-rapportées : après la 2ème partie de jeu, nous avons utilisé le Networked Minds Social Presence Inventory (SPI, 34 items) pour explorer les perceptions des participants en matière de présence sociale dans le jeu. Ce questionnaire, qui met l'accent sur la coprésence et l'accessibilité psychocomportementale, évalue à la fois la "perception de soi" et la "perception des autres".

La triangulation des données doit nous permettre de caractériser finement les dynamiques de collaboration des différents joueurs et d'examiner l'impact des modalités de communication.

4.4.5 Indicateurs

L'Analytique de l'Apprentissage Collaboratif (CLA) émerge comme un outil pertinent pour analyser la richesse des données générées lors des sessions d'apprentissage collaboratif [147], et peuvent les rendre compréhensibles tant pour les apprenants que pour les enseignants [148, 149].

Évaluer les activités collaboratives nécessite de mesurer la qualité de la collaboration. Selon les objectifs de mesure, divers indicateurs peuvent être analysés. La détermination des rôles dans la dynamique de groupe peut impliquer l'examen des clusters thématiques [150, 151]. La dominance d'un individu peut être déduite du temps de parole [152–155], et la fréquence des prises de parole peut indiquer les niveaux de participation [156]. En tirant parti de ces métriques, les parties prenantes peuvent mieux comprendre et améliorer l'apprentissage collaboratif.

Dans notre étude, nous nous concentrons sur les processus de régulation, et plus spécifiquement sur 16 indicateurs dérivés de la littérature [157], ainsi que sur les définitions des processus de régulation présentées dans la section 2.2. Ces indicateurs sont divisés en 3 catégories : les indicateurs liés à la tâche, les indicateurs d'autorégulation et les indicateurs de co-régulation. Les indicateurs liés à la tâche ne sont pas liés aux processus d'autorégulation ou de co-régulation, mais constituent les actions principales requises pour accomplir le jeu. Pour garantir la clarté et la compréhension, nous n'avons inclus que les indicateurs les plus pertinents et ceux qui ont donné des résultats significatifs.

Nous avons identifié les indicateurs liés à la tâche suivants :

- SpecialPowerUses : indique le nombre de fois où un pouvoir spécial est utilisé pendant le jeu. Les pouvoirs spéciaux sont des capacités uniques fournies aux joueurs pour faciliter la réalisation des tâches. Cet indicateur pourrait révéler l'utilisation stratégique des ressources des joueurs pour surmonter l'augmentation des niveaux d'eau, réparer les brèches et comprendre le jeu et les moyens à leur disposition.
- TurnsWithoutScooping : représente le nombre de tours où le joueur n'a pas effectué l'action d'écopage de l'eau.

Les indicateurs suivants sont classés sous la catégorie d'auto-régulation car ils illustrent l'engagement autonome de l'individu dans des activités orientées vers un but, la planification stratégique et la gestion des ressources personnelles, en accord avec le concept de l'apprentissage et du comportement auto-régulés de Zimmerman.

- OwnObjectTaken : indique le nombre de fois où un objet personnel est récupéré dans le jeu. Chaque objet du joueur a été caché dans une pièce différente du sous-marin, et tous les joueurs pouvaient les voir. La récupération des objets personnels peut être liée à des stratégies individuelles ou à des méthodes d'apprentissage pour gérer les ressources et naviguer dans le jeu. Elle reflète comment les joueurs régulent leur comportement pour atteindre des objectifs personnels, équilibrant entre les objectifs individuels et les besoins collectifs.
- ObjectsTaken : désigne le nombre de fois où les objets des autres joueurs sont volés. Cela pourrait être indicatif de comportements stratégiques ou d'instincts compétitifs. Cela pourrait également affecter la concentration du joueur sur une mission individuelle plutôt que sur la mission collective. Si l'objet est volé, le joueur qui a été volé ne pourra pas compléter sa mission personnelle. Cet indicateur pourrait refléter une planification stratégique individuelle dans la poursuite d'objectifs personnels.
- FlashlightUseSum : temps total passé à utiliser la lampe de poche. Comme la lampe de poche est ce qui permet au joueur de trouver des objets dans une pièce, cela indique le temps alloué pour mener à bien une mission personnelle. Cela pourrait être représentatif d'un désir individuel d'explorer l'environnement, ou d'un sentiment de curiosité pour mieux le comprendre, afin d'atteindre des objectifs personnels.
- ShowSubGoal : nombre de fois où un joueur clique pour afficher un sous-objectif. Cet indicateur est lié à sa propre mission personnelle, et donc à la quête de succès d'un point de vue individuel. Une fréquence élevée pourrait indiquer un besoin de clarté, soulignant l'auto-réflexion et la planification dans le cadre des processus d'auto-régulation.

Les indicateurs suivants relèvent de la catégorie de la co-régulation, reflétant les aspects collaboratifs et interactifs de l'apprentissage et de la résolution de problèmes au sein d'un groupe, en ligne avec la description des processus de co-régulation et d'atteinte d'objectifs collectifs proposée par Hadwin et al. [46]

- TurnsPlayed : fait référence au nombre de tours joués par les joueurs. Un nombre plus élevé de tours peut refléter un niveau plus élevé d'engagement actif et de résolution de problèmes partagés, qui est clé dans la co-régulation. Étant donné que plus le jeu progresse, plus il devient difficile de gagner (le nombre de niveaux d'eau monte de plus en plus vite), il est essentiel d'essayer de gagner avec le moins de tours possible.
- CommonObjectTaken : mesure le nombre de fois où l'objet commun est récupéré. La récupération d'objets communs pourrait indiquer des efforts collaboratifs et une responsabilité partagée pour atteindre l'objectif collectif secondaire. Cela indique un effort collaboratif vers un objectif partagé, résonnant avec le concept de résolution de problèmes interactive et partagée dans la co-régulation.
- MeanTurn : fait référence à la durée moyenne d'un tour. Des tours plus courts pourraient signifier un rythme rapide d'action et de prise de décision dans l'équipe.
- CancelledAction : nombre d'actions annulées pendant le jeu. Lorsqu'une action est effectuée, une fenêtre pop-up apparaît, et le joueur peut soit confirmer soit annuler l'action. Des annulations fréquentes peuvent signaler des conflits, des malentendus ou des changements de stratégies, indiquant une co-régulation moins efficace au sein de l'équipe. Des annulations fréquentes pourraient indiquer une négociation en

cours, des ajustements de stratégie ou la résolution de conflits, des aspects clés de la co-régulation dans un cadre d'équipe.

- ImpossibleAction : reflète le nombre d'actions jugées impossibles par les joueurs. il est possible d'effectuer une action, mais si les conditions ou les règles ne le permettent pas, elle ne réussira pas (plus de points de mouvement, par exemple). Cela peut conduire à des malentendus sur les règles du jeu, qui peuvent résulter d'une communication moins efficace entre les membres de l'équipe.
- ShowMenu : indique le nombre de fois où un joueur clique pour afficher le menu (afficher le menu pour afficher les actions, accès à la possibilité d'afficher l'objectif principal et le sous-objectif)
- ShowMainGoal : représente le nombre de fois où un joueur clique pour afficher l'objectif principal. Un nombre élevé pourrait indiquer un malentendu sur l'objectif du jeu.
- ShowTime : nombre de fois où un joueur clique pour afficher le minuteur. Des vérifications régulières pourraient refléter une préoccupation active pour la gestion du temps en tant que responsabilité partagée. ShowMenu, ShowMainGoal et ShowTime pourraient être liés à l'orientation collective vers les objectifs du jeu, la gestion du temps et la planification stratégique, tous importants dans la co-régulation.
- RepairsDone : nombre de fois où le joueur est responsable de la réparation d'une brèche. Cette action dépend de l'action d'un deuxième joueur, qui doit être dans la même pièce que le joueur pour aider à la réparation de la brèche.
- RepairsParticipationDone : nombre de fois où le joueur a aidé à réparer une brèche. Cette action est liée à l'action du joueur qui a initié la réparation de la brèche. Les deux joueurs doivent être dans la même pièce, et venir en aide à ce joueur pour que la réparation puisse être effectuée. RepairsDone et RepairsParticipationDone sont des indicateurs forts d'efforts collaboratifs et d'assistance mutuelle, des éléments clés dans la co-régulation.

4.5 Résultats

4.5.1 Impact des modalités de communication sur la présence sociale

Les statistiques descriptives sur les résultats du questionnaire concernant la présence sociale, pour différentes modalités de communication, sont présentées dans le tableau 4.2. Comme les données s'écartaient d'une distribution normale et incluaient trois échantillons indépendants, des tests non paramétriques ont été menés. Le test de Kruskal-Wallis a d'abord été appliqué, suivi d'un test post hoc de Dunn sur les résultats du questionnaire de présence sociale à travers différentes conditions. En termes de symétrie subjective perçue, le test de corrélation de Spearman a été mené pour chaque questionnaire, comparant les dimensions "soi" et "autres". Nous avons calculé les coefficients moyens pour les trois conditions.

Co-présence : Le test de Kruskal-Wallis sur la dimension de co-présence du Networked Minds Social Presence Inventory (NM-SPI) a produit une valeur de p de .008, ce qui est

TABEAU 4.1 – Indicateurs classés par catégorie : tâche, autorégulation et co-régulation

Tâche	
Indicateur	Description
specialPowerUses	Nombre de fois qu'un pouvoir spécial est utilisé
turnWithoutScooping	Nombre de tours sans écopage
Autorégulation	
Indicateur	Description
ownObjectTaken	Nombre de fois qu'un objet personnel est récupéré
objectsTaken	Nombre de fois que les objets des autres joueurs sont volés
flashLightUseSum (s)	Temps total d'utilisation de la lampe de poche
showSubGoal	Nombre de fois que le joueur clique pour afficher le sous-objectif
Co-régulation	
Indicateur	Description
canceledAction	Nombre d'actions annulées
impossibleAction	Nombre d'actions jugées impossibles
turnsPlayed	Nombre de tours joués
commonObjectTaken	Nombre de fois que l'objet commun est récupéré
meanTurn (s)	Durée moyenne d'un tour
showMenu	Nombre de fois que le joueur clique pour afficher le menu
showMainGoal	Nombre de fois que le joueur clique pour afficher l'objectif principal
showTime	Nombre de fois que le joueur clique pour afficher le minuteur
repairsDone	Nombre de fois que le joueur est responsable de la réparation d'une brèche
repairsParticipationDone	Nombre de fois que le joueur a aidé à réparer une brèche

TABEAU 4.2 – Statistiques descriptives concernant les 3 modalités de communication selon la dimension de présence sociale, sur une échelle de Likert (1 à 7).

	Co-présence			Psycho-comportemental		
	Audio	Chat	Vidéo	Audio	Chat	Vidéo
Nombre de participants	23	24	24	23	24	24
Médiane	5.88	5.06	5.44	5.92	5.63	5.60
Moyenne	5.88	5.15	5.52	5.87	5.45	5.52
Écart-type	0.58	0.88	0.69	0.57	0.63	0.45
Coefficient de variation	0.10	0.17	0.13	0.10	0.12	0.08
Variance	0.34	0.77	0.48	0.33	0.40	0.20

TABEAU 4.3 – Test de Kruskal-Wallis pour les dimensions de Co-présence et d'Accessibilité Psycho-comportementale

Dimension	Facteur	Statistique	ddl	p
Co-présence	Condition	9.633	2	0.008**
Accessibilité Psycho-comportementale	Condition	7.647	2	0.022*

** $p < .01$, * $p < .05$

inférieur au seuil alpha de 0,05, indiquant des résultats statistiquement significatifs. Une analyse plus approfondie à travers les comparaisons post hoc de Dunn a révélé qu'une différence significative existe entre les conditions chat et audio, la valeur de p étant inférieure

TABLEAU 4.4 – Comparaisons Post Hoc de Dunn pour les dimensions de Co-présence et d'Accessibilité Psycho-comportementale

Dimension	Comparaison	z	p	P_{bonf}
Co-présence	Audio - Chat	3.085	0.002**	0.006**
Co-présence	Audio - Vidéo	1.868	0.062	0.185
Co-présence	Chat - Vidéo	-1.230	0.219	0.657
Psycho-comportemental	Audio - Chat	2.410	0.016*	0.048*
Psycho-comportemental	Audio - Vidéo	2.396	0.017*	0.050*
Psycho-comportemental	Chat - Vidéo	-0.014	0.989	1.000

** $p < .01$, * $p < .05$

au seuil alpha. Les données suggèrent que la modalité audio facilite un degré plus élevé de co-présence par rapport à la modalité chat. Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les autres paires (audio et vidéo, chat et vidéo). Cela suggère que les participants utilisant la condition audio sont plus conscients de la co-présence du corps médiatisé d'autrui que dans les conditions de chat.

Accessibilité Psychocomportementale : Le test de Kruskal-Wallis a produit une valeur de p de .022, ce qui est inférieur au seuil alpha de 0,05, indiquant des résultats significatifs. Une enquête plus approfondie avec les comparaisons post hoc de Dunn a montré des différences significatives entre les modalités audio et chat, et les modalités audio et vidéo, toutes deux tombant en dessous du seuil alpha. Ces résultats suggèrent que la modalité audio permet une accessibilité psychocomportementale plus élevée que les modalités chat et vidéo. Cependant, aucune différence significative n'a été détectée dans les autres comparaisons (chat et vidéo). Cela suggère que les participants utilisant la condition audio ont un meilleur accès à l'engagement attentionnel, à l'état émotionnel, à la compréhension et à l'interaction comportementale d'autrui que dans les deux autres conditions.

4.5.2 Impact des modalités de communication sur la régulation

Différence entre les conditions chat, audio et vidéo

L'objectif de l'analyse était d'explorer les indicateurs liés aux processus de régulation (identifiés dans la section 4.1). Cela a été réalisé en effectuant un test ANOVA sur les indicateurs des trois différentes conditions présentées. Les indicateurs sélectionnés sont présentés dans le tableau 4.5.

Parmi le nombre total d'indicateurs étudiés, cinq d'entre eux ont été identifiés comme significatifs. Ils incluent le nombre de tours joués ($p < 0.001$), la durée moyenne du tour ($p < 0.001$), les actions impossibles ($p < 0.001$), les actions de montrer le menu ($p < 0.05$) et de montrer le sous-objectif ($p < 0.01$). Tous les autres indicateurs n'étaient pas significatifs.

Pour les indicateurs significatifs, une analyse plus approfondie a été réalisée en utilisant des t-tests pour échantillons indépendants, dont les résultats sont présentés dans le tableau 4.6. Les indicateurs sont classés sous deux catégories de processus de régulation : l'auto-régulation et la co-régulation.

TABLEAU 4.5 – Résultats d’une Anova effectuée sur les indicateurs pour comparer les processus de régulation entre les 3 conditions.

Tâche				
Indicateur	$\bar{x}_{\text{Audio}}$	$\bar{x}_{\text{Chat}}$	$\bar{x}_{\text{Vidéo}}$	p-valeur
specialPowerUses	0.692	0.634	0.707	0.542
TurnWithOutScooping	0.270	0.266	0.258	0.932
Autorégulation				
Indicateur	$\bar{x}_{\text{Audio}}$	$\bar{x}_{\text{Chat}}$	$\bar{x}_{\text{Vidéo}}$	p-valeur
ownObjectTaken	0.055	0.049	0.046	0.863
objectsTaken	0.000	0.006	0.011	0.211
flashLightUseSum	20.97	22.02	25.59	0.404
showSubGoal	0.659	0.289	0.665	0.00158**
Co-régulation				
Indicateur	$\bar{x}_{\text{Audio}}$	$\bar{x}_{\text{Chat}}$	$\bar{x}_{\text{Vidéo}}$	p-valeur
canceledAction	0.612	0.699	0.732	0.520
impossibleAction	0.314	0.572	0.269	<0.001***
turnsPlayed	5.69	6.69	5.33	<0.001***
commonObjectTaken	0.021	0.013	0.019	0.748
meanTurn	74.57	97.19	93.78	<0.001***
showMenu	1.03	0.815	1.34	0.00473**
showMainGoal	0.312	0.230	0.319	0.403
showTime	1.53	0.900	1.23	0.093

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

Dans la catégorie de l’auto-régulation, l’indicateur ‘showSubGoal’ a révélé des différences significatives entre les conditions Audio ($M = 0.659$) et Chat ($M = 0.289$) ($p < 0.001$), et entre les conditions Chat ($M = 0.289$) et Vidéo ($M = 0.665$) ($p < 0.001$). Aucune différence significative n’a été observée entre les conditions Audio et Vidéo.

La catégorie de la co-régulation a affiché plus de résultats significatifs à travers les indicateurs. Pour ‘turnsPlayed’, des différences significatives ont été trouvées entre les conditions Audio ($M = 5.687$) et Chat ($M = 6.688$) ($p < 0.001$), et entre les conditions Chat ($M = 6.688$) et Vidéo ($M = 5.333$) ($p < 0.001$). ‘showMenu’ a révélé une différence significative entre les conditions Chat ($M = 0.815$) et Vidéo ($M = 1.343$) ($p < 0.001$), alors que ‘meanTurn’ a montré des différences significatives entre les conditions Audio ($M = 74.568$) et Chat ($M = 97.188$) ($p < 0.001$) et entre les conditions Audio ($M = 74.568$) et Vidéo ($M = 93.781$) ($p < 0.001$). Enfin, l’indicateur ‘impossibleAction’ a présenté des différences significatives entre les conditions Audio ($M = 0.314$) et Chat ($M = 0.572$) ($p < 0.01$) et entre les conditions Chat ($M = 0.572$) et Vidéo ($M = 0.269$) ($p < 0.001$).

Cependant, contrairement aux observations précédentes, tous les indicateurs associés à la catégorie de la tâche ont affiché des résultats non significatifs. Quelle que soit les conditions considérées, les valeurs de p étaient uniformément supérieures au seuil accepté, ne permettant donc pas de rejeter l’hypothèse nulle.

TABLEAU 4.6 – Test t réalisé sur les indicateurs avec une différence significative entre les 3 conditions

Autorégulation					
Indicateur	Condition	$\bar{x}_{Audio}$	$\bar{x}_{Chat}$	$\bar{x}_{Vidéo}$	p-valeur
showSubGoal	Audio vs Chat	0.659	0.289		0.000563***
showSubGoal	Audio vs Vidéo	0.659		0.665	0.967
showSubGoal	Chat vs Vidéo		0.289	0.665	0.000600***
Co-régulation					
Indicateur	Condition	$\bar{x}_{Audio}$	$\bar{x}_{Chat}$	$\bar{x}_{Vidéo}$	p-valeur
impossibleAction	Audio vs Chat	0.314	0.572		0.002**
impossibleAction	Audio vs Vidéo	0.314		0.269	0.513
impossibleAction	Chat vs Vidéo		0.572	0.269	0.000164**
turnsPlayed	Audio vs Chat	5.687	6.688		0.000724***
turnsPlayed	Audio vs Vidéo	5.687		5.333	0.136
turnsPlayed	Chat vs Vidéo		6.688	5.333	0.000017***
meanTurn	Audio vs Chat	74.568	97.188		0.000240***
meanTurn	Audio vs Vidéo	74.568		93.781	0.000386***
meanTurn	Chat vs Vidéo		97.188	93.781	0.557
showMenu	Audio vs Chat	1.032	0.815		0.125
showMenu	Audio vs Vidéo	1.032		1.343	0.089
showMenu	Chat vs Vidéo		0.815	1.343	0.000892***

*** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

Évolution entre la partie 1 et la partie 2

L'analyse visait à explorer l'évolution des indicateurs entre la partie 1 et la partie 2. À cette fin, un test t par paires a été effectué sur les indicateurs et les résultats significatifs sont présentés dans le Tableau 4.7.

Dans la catégorie des tâches, l'indicateur 'specialPowerUses' dans la condition de chat a démontré une augmentation significative de la partie 1 ($M = 0,58$) à la partie 2 ($M = 0,69$), comme en témoigne une valeur p significative ($p = 0,02$) (voir Tableau 4.7).

Dans la catégorie de l'autorégulation, deux indicateurs ont montré des changements considérables. L'indicateur 'showSubGoal' dans la condition audio a montré une diminution significative de la partie 1 ($M = 0,93$) à la partie 2 ($M = 0,39$), ce qui est validé par une valeur p de 0,0003. De même, l'indicateur 'flashLightUseSum' dans la condition de chat a également diminué de manière significative de la partie 1 ($M = 25\,415,20$) à la partie 2 ($M = 18\,632,04$), avec une valeur p de 0,02.

Nous avons également observé des changements significatifs dans la catégorie de la corégulation. L'indicateur 'turnsPlayed' dans la condition vidéo a montré une diminution significative de la partie 1 ($M = 5,83$) à la partie 2 ($M = 4,83$), soutenue par une valeur p de 0,02. Les deux indicateurs 'meanTurn' dans les conditions audio et chat ont affiché des diminutions substantielles, avec la condition audio diminuant de la partie 1 ($M = 84$

TABLEAU 4.7 – Différences significatives entre la partie 1 et la partie 2

Tâche				
Indicateur	Condition	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	P-valeur
specialPowerUses	chat	0.58	0.69	0.02*
Autorégulation				
Indicateur	Condition	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	P-valeur
flashLightUseSum	chat	25.415	18.632	0.02*
showSubGoal	audio	0.93	0.39	0.0003***
Co-régulation				
Indicateur	Condition	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	P-valeur
impossibleAction	audio	0.42	0.20	0.0098**
turnsPlayed	video	5.83	4.83	0.02*
meanTurn	audio	84.96	64.18	0.0001***
meanTurn	chat	106.99	87.38	0.002**
showMenu	chat	0.93	0.70	0.01*
showMainGoal	audio	0.47	0.15	0.001**
showMainGoal	video	0.40	0.24	0.04*
showMainGoal	chat	0.33	0.13	0.02*
showTime	audio	2.05	1.01	0.005**
showTime	chat	1.18	0.62	0.04*

*** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

959,60) à la partie 2 ($M = 64\,176,30$), avec une valeur p de 0,0001, et la condition chat diminuant de la partie 1 ($M = 106\,993,99$) à la partie 2 ($M = 87\,382,62$), avec une valeur p de 0,002. L'indicateur 'impossibleAction' dans la condition audio a également diminué de manière significative de la partie 1 ($M = 0,42$) à la partie 2 ($M = 0,20$), confirmé par une valeur p de 0,0098. De plus, 'showMenu' dans la condition de chat a vu une diminution significative de la partie 1 ($M = 0,93$) à la partie 2 ($M = 0,70$), soutenue par une valeur p de 0,01. L'indicateur 'showTime' dans les conditions audio et chat a également montré des diminutions notables. Dans la condition audio, il a diminué de la partie 1 ($M = 2,05$) à la partie 2 ($M = 1,01$) (valeur $p = 0,005$), et dans la condition chat, il a diminué de la partie 1 ($M = 1,18$) à la partie 2 ($M = 0,62$) (valeur $p = 0,04$).

L'indicateur 'showMainGoal' a montré des diminutions significatives dans toutes les conditions : audio, vidéo et chat. La condition audio a diminué de la partie 1 ($M = 0,47$) à la partie 2 ($M = 0,15$) (valeur $p = 0,001$), la condition vidéo a diminué de la partie 1 ($M = 0,40$) à la partie 2 ($M = 0,24$) (valeur $p = 0,04$), et la condition chat a diminué de la partie 1 ($M = 0,33$) à la partie 2 ($M = 0,13$) (valeur $p = 0,02$).

4.5.3 Corrélation entre la présence sociale et la régulation

Une série de tests de corrélation de Spearman a été menée pour analyser la relation entre les indicateurs et les résultats obtenus à partir des deux dimensions (co-présence et psycho-comportemental) de l'inventaire de présence sociale Networked Mind. La corrélation de Spearman a été choisie comme méthode d'analyse en raison du fait que les données ne suivaient pas une distribution normale.

TABLEAU 4.8 – Résultats significatifs entre les indicateurs et les dimensions de la présence après une corrélation de Spearman.

Coprésence			
Indicateur	Condition	Corrélation	P-valeur
<i>Co-régulation</i>			
canceledAction	audio	-0.500	0.0274*
repairParticipationsDone	vidéo	0.447	0.0287*
turnsPlayed	chat	0.437	0.0329*
commonObjectTaken	chat	0.414	0.0441*
showMenu	audio	-0.423	0.0395*
Psycho-comportemental			
Indicateur	Condition	Corrélation	P-valeur
<i>Tâche</i>			
turnsWithoutScooping	audio	-0.528	0.00800**
<i>Autorégulation</i>			
showSubGoal	chat	0.407	0.0481*
<i>Co-régulation</i>			
commonObjectTaken	chat	0.505	0.0119*
showMenu	vidéo	0.437	0.0325*
repairsDone	vidéo	0.406	0.0489*

** $p < .01$, * $p < .05$

En ce qui concerne la dimension "Co-présence", une corrélation positive a été observée entre 'repairParticipationsDone' pour la condition vidéo ($r = 0,446512$, $p = 0,028724$), 'turnsPlayed' pour la condition chat ($r = 0,436734$, $p = 0,032858$), et 'commonObjectTaken' pour la condition chat ($r = 0,414321$, $p = 0,044126$). Ces résultats suggèrent une corrélation moyenne qui est statistiquement significative au seuil de 0,05.

Cependant, des corrélations négatives ont été trouvées entre 'showMenu' pour la condition audio ($r = -0,422825$, $p = 0,039540$) et 'canceledAction' pour la condition audio ($r = -0,449916$, $p = 0,027386$). Ces résultats indiquent une relation entre une diminution de ces indicateurs et une augmentation de la dimension de co-présence.

Pour la catégorie "Psycho-comportemental", toutes les corrélations étaient positives, à l'exception de 'turnsWithoutScooping' dans la condition audio, qui a montré une corrélation négative significative ($r = -0,527994$, $p = 0,008003$). Ce résultat indique une relation entre une diminution de cet indicateur et une augmentation de la dimension psycho-comportementale. D'autres corrélations positives incluaient 'commonObjectTaken' pour la condition chat ($r = 0,504602$, $p = 0,011915$), 'showMenu' pour la condition vidéo ($r = 0,437407$, $p = 0,032559$), 'showSubGoal' pour la condition chat ($r = 0,407474$, $p = 0,048113$), et 'repairsDone' pour la condition vidéo ($r = 0,406139$, $p = 0,048922$). Tous ces résultats indiquent des corrélations moyennes et sont statistiquement significatifs au seuil de 0,05.

4.6 Discussion

Cette discussion analyse les effets des différentes modalités de communication (audio, chat et vidéo) utilisées dans un environnement de jeu collaboratif. Plus précisément, nous examinons comment chaque modalité affecte l'autorégulation, la corégulation et le sentiment de présence sociale des participants.

4.6.1 Condition audio

Nos résultats montrent que la condition audio améliore de manière notable à la fois la co-présence (c'est-à-dire la perception du corps médiatisé de l'autre) et l'accessibilité psycho-comportementale (c'est-à-dire le sentiment d'accessibilité des états psychologiques, émotionnels et intentionnels des autres participants). Cela s'accompagne d'une corégulation plus efficace, notamment à travers des indicateurs tels qu'un nombre inférieur de tours de jeu et des temps de tour plus courts, ainsi que moins d'actions impossibles.

Le sentiment plus élevé de co-présence par rapport à la condition chat pourrait s'expliquer par le fait que la voix serait perçue par les participants comme une représentation du corps médiatisé de l'autre [158]. De plus, les participants dans la condition audio ont ressenti un sentiment d'accessibilité psycho-comportementale plus élevé par rapport aux conditions chat et vidéo, indiquant une meilleure compréhension des états émotionnels et intentionnels des autres joueurs. Cela pourrait s'expliquer par les nuances émotionnelles véhiculées par les tons de voix (non permises par la communication textuelle), ainsi que par une plus grande facilité à exprimer aux autres l'accès à leurs propres états mentaux, permettant un meilleur sens d'accessibilité psycho-comportementale. Ces résultats sont en accord avec les études montrant que la présence sociale est plus élevée lorsque les participants communiquent par audio (des explications sur la différence entre l'audio et la vidéo sont fournies dans la section suivante) [108, 113, 159]. Du point de vue de l'autorégulation, les participants dans la condition audio ont affiché plus d'objectifs personnels que dans la condition chat. Cela suggère que la modalité audio peut favoriser un environnement où les joueurs sont plus susceptibles de poursuivre des stratégies et des objectifs individuels. Cela peut être dû à une charge cognitive plus faible que dans la condition chat, comme le montre le travail d'Erlandson et al. (2010) [160], ce qui permet aux joueurs d'explorer des objectifs secondaires.

L'analyse des processus de corégulation a révélé que la condition audio a amélioré de manière significative la stratégie de jeu et l'efficacité, comme en témoigne une diminution du nombre de tours, une réduction du temps moyen par tour, par rapport aux conditions chat et vidéo. L'absence d'indices visuels dans la condition audio pourrait avoir incité les participants à articuler leurs stratégies plus clairement, favorisant un consensus et une prise de décision plus rapides. Étant donné la complexité du jeu, la condition audio a certainement facilité les explications par rapport à la condition chat [133]. Cette dynamique de corégulation s'est améliorée entre la première et la deuxième partie du jeu, indiquant une familiarité croissante et une compréhension partagée entre les membres de l'équipe.

Après avoir analysé le sentiment de présence et les processus de régulation, l'analyse de corrélation a permis d'élucider davantage les relations entre la dynamique de collaboration et le sentiment de présence perçue. Une corrélation négative notable a été observée entre le nombre d'affichages de menu et d'actions annulées, et le sentiment de co-présence. Cela

suggère qu'un sentiment de co-présence plus fort pourrait favoriser une meilleure communication, réduisant ainsi les occurrences de malentendus ou de mauvaise planification, qui sont les principales causes d'annulation d'actions. De plus, un degré plus élevé d'accessibilité psycho-comportementale était corrélé avec un nombre réduit de tours joués sans écoper, ce qui implique qu'une compréhension mutuelle plus profonde [49] pourrait conduire à des décisions de jeu plus stratégiques et efficaces, réduisant ainsi l'accumulation d'eau et empêchant les pertes de jeu.

En conclusion, la condition audio semble favoriser un sentiment de présence sociale plus élevé, caractérisé par une co-présence et une accessibilité psycho-comportementale améliorées. Cela, à son tour, facilite de meilleurs processus d'autorégulation et de corégulation, qui ont un impact positif sur la stratégie globale du jeu et les taux de réussite.

4.6.2 Condition vidéo

En ce qui concerne la condition vidéo, nous avons constaté que la présence sociale est inférieure à celle de la condition audio (uniquement pour la dimension psycho-comportementale). Ceci est associé à certains aspects de la corégulation, qui sont plus efficaces dans la condition "vidéo" que dans la condition "chat", mais moins efficaces que dans la condition "audio".

Les résultats indiquent un sentiment de présence sociale plus faible, en particulier l'accessibilité psycho-comportementale, dans la condition vidéo par rapport à la condition audio. Cela peut sembler inattendu au premier abord, étant donné que la communication vidéo fournit plus d'indices visuels (par exemple, les expressions faciales, le regard) et d'informations non verbales qui pourraient potentiellement améliorer le sentiment d'accessibilité des états psychologiques, émotionnels et intentionnels de l'autre. Cependant, il existe une division dans la littérature à ce sujet. Certaines études suggèrent que la modalité vidéo améliore la présence sociale [131, 132], tandis que d'autres ne trouvent aucune amélioration [108, 161–163].

Nous pensons que cette constatation pourrait s'expliquer par la théorie de la charge cognitive [164]. L'intégration des stimuli visuels et auditifs dans la communication vidéo peut entraîner une charge cognitive plus élevée par rapport à la communication audio, qui ne repose que sur des stimuli auditifs [165]. Cette demande cognitive accrue pourrait conduire à un sentiment d'accessibilité psycho-comportementale plus faible, car les joueurs pourraient avoir du mal à gérer simultanément leurs actions de jeu, à traiter visuellement les indices non verbaux et à maintenir un sentiment élevé de présence sociale. Il est également possible que la taille de l'écran allouée aux webcams des autres joueurs, ainsi que leur emplacement (en dehors de l'écran de jeu, voir chapitre 3, aient pu avoir un impact sur ce résultat. Il est également possible, comme le montrent certaines études [131, 132], que l'impact de la modalité vidéo sur la présence sociale puisse être modéré par la nature de la tâche, par exemple une tâche visuelle.

Nos résultats montrent également une différence significative dans la corégulation avec un nombre de tours plus faible et moins d'actions impossibles (par rapport à la modalité chat) et un temps de jeu moyen plus long par tour (par rapport aux modalités chat et audio). Cela pourrait être une indication d'une efficacité et d'une planification stratégique accrues dans la condition vidéo, éventuellement en raison des indices visuels supplémentaires disponibles, réduisant ainsi potentiellement le nombre de tours nécessaires mais

prolongeant le temps moyen par tour, les indices visuels supplémentaires ajoutant une charge cognitive plus élevée ou une source de distraction [166]. Une autre explication est que le format vidéo a facilité un contenu conversationnel supplémentaire, comme l'expression de l'accord, l'encouragement, l'amusement et la recherche de définitions des concepts discutés [167]. Il y a une différence significative dans la relation avec la tâche, et dans l'autorégulation, il y a plus d'affichage d'objectifs secondaires que dans la condition chat.

En examinant la dynamique de jeu et ses processus de régulation, l'analyse de corrélation a clarifié davantage les associations entre ces dynamiques et le sentiment de présence sociale perçu. Nous observons que la co-présence est positivement corrélée avec le nombre d'aides à la réparation effectuées. Les aides à la réparation impliquent que les deux personnes sont dans la même pièce, et que la personne qui joue envoie une demande de réparation au deuxième joueur, qui doit la confirmer. Bien qu'il n'y ait pas de représentation des autres joueurs dans la vue à la première personne, il semble que le fait d'effectuer une action de réparation impliquant deux personnes dans la même pièce ait un impact sur la co-présence, c'est-à-dire la représentation médiatisée du corps de l'autre. Ce résultat ne s'applique qu'à la condition vidéo. L'accessibilité psycho-comportementale est positivement corrélée avec le nombre de réparations effectuées par le joueur. Il est possible que le fait d'entreprendre une action commune avec un autre joueur, en initiant la demande, améliore la perception de l'accès à l'autre joueur. Comme cette corrélation n'a été trouvée que dans la condition vidéo, il est possible qu'elle soit liée à la visualisation des autres joueurs via la webcam. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que, dans cette condition, les joueurs sont visibles via une webcam mais n'ont pas de représentation lorsqu'ils sont dans la même pièce dans le jeu. L'ajout d'actions communes et la mise en évidence de la présence de l'autre joueur dans la même pièce peuvent modifier leur perception des autres joueurs liée à la webcam. Biocca et Harms (2002) [49] soutiennent qu'il existe un moment de présence sociale seuil "lorsque la forme d'un médium (encres réfléchissantes, pixels ou marbre) passe d'une chose, d'une matière, à un élément social, une représentation d'un autre".

En conclusion, la condition vidéo semble conduire à un sentiment de présence sociale plus faible que la condition audio, caractérisé par une accessibilité psycho-comportementale plus faible.

4.6.3 Condition chat

Dans notre étude, nous avons constaté que dans la condition chat, la présence sociale est inférieure à celle de la condition audio pour les deux dimensions. Ceci s'accompagne d'une corégulation moins efficace, par rapport aux conditions audio et vidéo. Il n'y a pas de différence significative dans les indicateurs liés à la tâche, et dans les indicateurs d'autorégulation, il y a moins d'affichage de sous-objectifs.

Nous avons constaté que la condition chat a donné lieu à un sentiment de présence sociale significativement plus faible, notamment en ce qui concerne la co-présence et l'accessibilité psycho-comportementale, par rapport aux conditions audio. Cela suggère que la communication textuelle peut être moins efficace pour favoriser le sentiment "d'être avec les autres", potentiellement en raison de l'absence d'indices non verbaux ou d'expressions émotionnelles en temps réel souvent disponibles dans les modalités audio et vidéo. Cette constatation est conforme à la littérature antérieure indiquant que la communication tex-

tuelle entraîne souvent une diminution du sentiment de présence sociale en raison de ses limitations inhérentes (par exemple, les délais de réponse, l'absence de nuances tonales et l'absence d'indices émotionnels visibles) [85], ainsi qu'à nos explications précédentes concernant la charge cognitive.

L'analyse des processus de corégulation a révélé que la condition chat présentait également un nombre de tours significativement plus élevé, indiquant que le développement d'une stratégie coopérative pourrait prendre plus de temps dans un environnement de chat par rapport à l'audio ou à la vidéo. Cela pourrait être attribué à la nature asynchrone de la communication par chat, qui peut limiter l'efficacité de l'interaction et du retour d'information en temps réel, cruciaux pour une corégulation efficace [134]. Simultanément, nous avons observé que les joueurs dans la condition chat avaient un temps de jeu moyen par tour significativement plus long que ceux dans la condition audio. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Sallnäs (2005) [163] qui montre que le temps passé à une tâche de prise de décision était plus long dans un environnement de chat textuel, par rapport à une condition audio ou vidéo. Cependant, la durée moyenne des tours a considérablement diminué entre la première et la deuxième partie du jeu, suggérant que les joueurs ont peut-être commencé à adapter leurs stratégies de corégulation à l'environnement du chat, améliorant ainsi l'efficacité de leurs processus de corégulation au fil du temps. De plus, les participants dans la condition chat ont effectué significativement plus d'actions impossibles par rapport à leurs homologues dans les conditions audio et vidéo, indiquant une moins bonne corégulation. Cela pourrait être dû à la compréhension contextuelle et émotionnelle limitée offerte par la modalité textuelle, qui pourrait entraver une résolution commune des problèmes et une prise de décision efficaces, rendant plus difficile la fourniture d'explications complexes [133].

Concernant l'autorégulation, les joueurs de la condition chat affichaient moins fréquemment leurs objectifs personnels que ceux des conditions audio et vidéo. L'absence d'indices visuels et audio dans la communication par chat pourrait réduire la motivation ou le besoin perçu de partager des objectifs personnels. Cela pourrait avoir pour effet de saper davantage les comportements d'autorégulation. Il est également possible que la charge cognitive de la condition de chat limite l'intérêt des joueurs pour les objectifs secondaires en raison d'un manque de temps ou de capacité d'attention.

Notre analyse de corrélation a fourni des informations supplémentaires sur les liens entre ces éléments de jeu et le sentiment de présence perçu par le joueur. Fait intéressant, nous avons trouvé une corrélation positive significative entre le nombre de tours joués et le sentiment de co-présence dans la condition chat. Cela pourrait suggérer que l'augmentation du nombre de tours dans le jeu pourrait aider à compenser le manque initial de présence sociale dans les environnements de chat. Ainsi, les joueurs peuvent progressivement développer un sentiment de co-présence en s'adaptant à la modalité de communication textuelle, comme le montre le travail de Ramirez et al. (2002) [168].

De plus, une corrélation positive significative a été observée entre les actions de récupération d'objets communs et le sentiment de co-présence et d'accessibilité psycho-comportementale. Ce résultat implique que les activités ou les objectifs partagés pourraient renforcer la présence sociale perçue et l'accessibilité dans les interactions basées sur le chat. Cette constatation s'aligne sur des recherches antérieures suggérant que les activités conjointes pourraient servir de mécanisme pour favoriser un sentiment d'unité et de compréhension partagée dans les tâches collaboratives [169].

Ces résultats s'accompagnent également d'une évolution significative de la corégulation entre la première et la deuxième partie, notamment avec des temps de jeu par tour plus courts, et moins d'affichages d'objectifs principaux et de temps.

En conclusion, la condition chat semble conduire à un sentiment de présence sociale plus faible que la condition audio, caractérisé par une co-présence et une accessibilité psycho-comportementale plus faibles. Cependant, les résultats montrent une amélioration de certains indicateurs entre le premier et le second jeu, suggérant que les joueurs se sont adaptés à cette modalité. Les différents indicateurs sont également plus faibles que dans les autres conditions.

4.6.4 Implications pour la conception

Compte tenu des résultats de cette étude, nous formulons quelques recommandations pour la conception d'environnements collaboratifs. Tout d'abord, nous pensons que les concepteurs devraient donner la priorité à l'intégration de canaux de communication audio robustes pour renforcer le sentiment de co-présence et d'accessibilité psycho-comportementale entre les participants. Par ailleurs, et lors de l'intégration d'outils d'échanges textuels, les développeurs devraient envisager des stratégies pour minimiser la charge cognitive associée aux interactions basées sur le texte. Cela permettrait aux participants de se concentrer non seulement sur les objectifs principaux du jeu, mais aussi d'explorer des objectifs secondaires, qui ne sont pas nécessaires à la résolution du jeu mais qui enrichissent l'expérience collaborative globale.

Afin de favoriser la co-présence et améliorer la stratégie de jeu avec des échanges audio, il pourrait être bénéfique d'intégrer des mécanismes de jeu qui encouragent les participants à exprimer vocalement leur stratégie et leurs objectifs personnels. Cela pourrait conduire à une expérience de jeu plus riche et plus collaborative.

De plus, des efforts devraient être consacrés à l'optimisation de l'interface de jeu pour réduire les actions qui sont négativement corrélées avec le sentiment de co-présence, par exemple pour réduire le nombre d'affichages de menu et d'annulations d'actions, facilitant ainsi un jeu plus fluide et une meilleure communication. Les résultats montrent que la modalité audio améliore l'accessibilité psycho-comportementale, c'est-à-dire la perception des états émotionnels et intentionnels des autres membres de l'équipe. Pour tirer parti de cet avantage, les concepteurs de jeux sérieux devraient intégrer des fonctionnalités spécifiques qui renforcent cette compréhension mutuelle et encouragent une collaboration plus stratégique. Concrètement, cela pourrait inclure :

- Un système de feedback émotionnel : permettre aux joueurs d'exprimer rapidement leur état émotionnel via des icônes ou des sons préenregistrés, facilitant ainsi la communication non-verbale.
- Des mécanismes de partage d'objectifs : intégrer un tableau de bord partagé où les joueurs peuvent afficher et mettre à jour leurs objectifs individuels et collectifs en temps réel.
- Des outils de planification collaborative : implémenter une fonctionnalité de "brainstorming audio" où les joueurs peuvent enregistrer et partager de courtes idées vocales, favorisant ainsi l'échange rapide de stratégies.
- Un système de rôles dynamiques : permettre aux joueurs de changer de rôles en

cours de jeu en fonction de leur compréhension évolutive des besoins de l'équipe, encourageant ainsi une adaptation stratégique continue.

- Des défis nécessitant une coordination vocale en temps réel : concevoir des puzzles ou des obstacles qui ne peuvent être surmontés que par une communication vocale précise et synchronisée entre les joueurs.

En outre, il serait pertinent de mener des recherches supplémentaires pour déterminer l'équilibre optimal entre les modalités audio et vidéo, afin de favoriser à la fois la coprésence et des processus de co-régulation efficaces. Ces recherches pourraient conduire au développement de plateformes collaboratives plus sophistiquées et adaptables, exploitant les avantages des différentes modalités de communication pour enrichir et améliorer les expériences collaboratives.

Enfin, lors de l'utilisation de la condition vidéo, il est important de considérer attentivement son placement et la taille affichée pour éviter de diminuer l'expérience de l'utilisateur.

4.7 Conclusion

Ce chapitre a exploré l'impact des modalités de communication (chat, audio, vidéo) sur la présence sociale et les processus de régulation dans un environnement d'apprentissage collaboratif médiatisé. Nos résultats ont mis en évidence plusieurs points clés :

- La modalité audio s'est révélée particulièrement efficace pour favoriser un sentiment élevé de présence sociale et faciliter les processus de co-régulation, surpassant les modalités chat et vidéo sur plusieurs aspects.
- Les différentes modalités de communication influencent de manière distincte les dimensions de la présence sociale (co-présence, engagement psycho-comportemental, symétrie des perceptions), soulignant la complexité de ce construit.
- Les processus de régulation individuelle et collective sont sensibles aux modalités de communication, avec des patterns d'interaction spécifiques observés pour chaque modalité.
- La richesse des médias n'est pas toujours garante d'une meilleure collaboration, comme l'illustre la performance supérieure de l'audio par rapport à la vidéo dans certains contextes.
- L'efficacité des modalités peut varier selon la nature de la tâche et la phase de collaboration, suggérant l'intérêt d'approches adaptatives dans la conception d'environnements d'apprentissage.

Ces résultats, mis en perspective avec ceux des chapitres précédents, contribuent à une compréhension plus nuancée et intégrée des facteurs influençant la collaboration en environnement virtuel. Ils soulignent l'importance d'une approche holistique dans la conception, prenant en compte à la fois les aspects visuels (point de vue) et communicationnels (modalités) de l'interface. Les implications pratiques de cette étude sont nombreuses, allant de l'intégration prioritaire de canaux audio robustes à la conception d'outils de support à la régulation adaptés à chaque modalité. Nous avons observé que l'efficacité des modalités peut varier selon la nature de la tâche et la phase de collaboration. Les concepteurs pourraient donc envisager des systèmes qui adaptent dynamiquement les modalités

de communication en fonction du contexte. Par exemple, un environnement pourrait basculer automatiquement en mode audio lors des phases de brainstorming collectif, puis en mode chat pour la synthèse des idées. Ces recommandations ouvrent la voie à des environnements d'apprentissage collaboratifs plus engageants et efficaces.

Ces travaux ouvrent la voie à plusieurs questionnements et autant de pistes de recherche : notamment, comment ces résultats se traduisent-ils dans des collaborations à plus long terme ou dans des contextes culturels variés ? Comment les différentes modalités de communication interagissent-elles avec d'autres variables comme la taille des groupes ou la complexité des tâches ? Ces interrogations ouvrent la voie au chapitre suivant, qui se concentrera sur une analyse plus fine des comportements collaboratifs observés. En utilisant des techniques d'analyse des traces d'interaction et du contenu des échanges, nous chercherons à modéliser les dynamiques collaboratives de manière plus détaillée. Cette approche nous permettra d'approfondir notre compréhension des mécanismes sous-jacents à une collaboration efficace et d'affiner nos recommandations pour la conception d'environnements d'apprentissage adaptatifs. Ainsi, ce chapitre constitue une étape cruciale pour comprendre les facteurs influençant la collaboration médiatisée, tout en posant les bases pour une analyse plus approfondie des comportements collaboratifs, qui sera l'objet du chapitre suivant.

Modélisation des comportements de collaboration à partir des traces d'interaction et de la discussion

Les chaînes de Markov : parce que même en statistiques, tout le monde aime une bonne série.

Un doctorant occupé.

5.1 Introduction

Dans les environnements d'apprentissage collaboratifs médiatisés par les technologies numériques, comprendre la dynamique des interactions entre apprenants est un enjeu crucial pour optimiser les processus d'apprentissage et de collaboration. Au-delà d'une simple analyse des actions individuelles, il s'agit d'étudier comment les différents processus collaboratifs s'articulent et s'influencent mutuellement au sein des groupes d'apprenants.

Des méthodes issues du champ des learning analytics ont été mobilisées pour modéliser ces processus à partir des traces d'interaction, en combinant différents niveaux d'analyse [149]. L'analyse de fréquence constitue une approche fondamentale pour comprendre la distribution et l'importance relative des différents types d'interactions dans les environnements d'apprentissage collaboratif. Cette méthode permet d'identifier les patterns dominants dans les comportements des apprenants et de caractériser les différents styles de collaboration [15].

Le chapitre précédent a mis en évidence des différences significatives entre les modalités de communication (audio, vidéo, chat) sur les comportements collaboratifs, notamment dans les processus de régulation et le sentiment de présence sociale. Dans la continuité de ces travaux, nous choisissons d'approfondir l'analyse des comportements collaboratifs via la modalité chat qui, par leur nature textuelle, permettent une exploitation directe des données sans nécessiter de transcription préalable.

Ce chapitre vise à modéliser ces comportements en utilisant une combinaison de méthodes analytiques qui tirent parti des traces d'interaction et des contenus de discus-

sion. Les approches employées ici, à savoir l'analyse des fréquences, des réseaux de co-occurrence, et des chaînes de Markov, permettent une exploration multidimensionnelle des données, offrant des aperçus à la fois sur la structure et la dynamique des interactions. À travers cette analyse, nous cherchons à identifier des patterns de collaboration qui pourraient informer la conception et l'amélioration des pratiques pédagogiques dans les environnements numériques. En outre, ce chapitre discute des implications de ces méthodes pour l'interprétation des processus collaboratifs, mettant en évidence comment elles se complètent pour fournir une vue globale et détaillée des dynamiques d'apprentissage.

Parmi les approches utilisées, l'analyse des réseaux de co-occurrence s'est révélée pertinente pour étudier les relations entre différents éléments des interactions dans les environnements d'apprentissage collaboratif. Cette méthode issue de la théorie des graphes permet de quantifier et visualiser les associations privilégiées entre différents éléments, et d'identifier ceux jouant un rôle central dans la structuration de l'activité. Les études ont démontré son efficacité pour analyser divers aspects comme les catégories de processus collaboratifs [170].

Les modèles markoviens ont également été employés pour modéliser les séquences d'interaction et détecter des motifs récurrents dans les comportements des apprenants [171]. Appliquée aux actions successives des utilisateurs dans un environnement d'apprentissage, cette méthode stochastique permet d'examiner les probabilités de transition entre différents états et d'identifier des enchaînements typiques. Elle a notamment permis de caractériser différents profils de comportements d'apprentissage et d'autorégulation, comme l'ont démontré Köck et Paramythis (2011) [172] dans leur analyse des séquences d'activités dans les environnements d'apprentissage personnalisés.

L'intérêt de ces approches a aussi été souligné dans le domaine des jeux sérieux et de l'apprentissage à base de jeu. Plusieurs travaux ont montré la pertinence d'analyser les comportements des joueurs à partir des traces d'interaction, pour étudier différentes dimensions de leur expérience comme la motivation, les stratégies de résolution ou les profils de joueurs [173,174]. Le recours aux réseaux de co-occurrence et aux modèles markoviens apparaît comme pertinent pour identifier des patterns de comportement caractéristiques et examiner leurs relations avec des variables d'apprentissage [175].

Cependant, peu de travaux ont à ce jour combiné ces différentes approches pour étudier la collaboration à plusieurs niveaux. Partant de ce constat, ce chapitre vise à proposer une démarche articulant analyse des réseaux de co-occurrence et modèles markoviens pour modéliser la dynamique des interactions au sein de groupes d'apprenants engagés dans un jeu sérieux collaboratif.

L'enjeu est ainsi de proposer une approche intégrée permettant de mieux comprendre la dynamique des interactions dans un contexte d'apprentissage à base de jeu, en prenant en compte la diversité des comportements des apprenants. Pour rendre compte de cette complexité, nous proposons de combiner l'analyse des traces d'interaction dans l'environnement (actions de jeu) avec l'analyse du contenu des échanges (codage des discussions) afin d'obtenir une vue globale des comportements collaboratifs.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord le cadre théorique et méthodologique de cette recherche, en nous appuyant sur les travaux existants en CSCL et learning analytics. Nous détaillons ensuite notre approche basée sur la combinaison de trois méthodes d'analyse complémentaires - fréquences, réseaux de co-occurrence et chaînes de Markov - pour modéliser les comportements collaboratifs à partir de données multimodales. Les

résultats obtenus dans le contexte du jeu sérieux collaboratif (présenté précédemment) sont ensuite analysés et discutés au regard de la littérature.

5.2 Méthodologie d'analyse

Pour modéliser et analyser les comportements collaboratifs à partir des traces d'interaction et des discussions, nous proposons de combiner trois approches complémentaires : l'analyse des fréquences, l'analyse des réseaux de co-occurrence et l'analyse des séquences avec les chaînes de Markov.

5.2.1 Analyse de fréquence

L'analyse de fréquence dans ce chapitre consiste à examiner la récurrence des différentes catégories de processus collaboratifs au sein des interactions des groupes d'apprenants. En quantifiant la fréquence d'apparition de chaque catégorie, telles que les tâches, la co-régulation, et le partage d'informations, nous obtenons une vue d'ensemble de la prédominance des divers éléments de collaboration au cours des sessions de jeu. Cette méthode statistique simple permet non seulement d'identifier les aspects les plus actifs de l'interaction au sein des groupes mais aussi de repérer des variations significatives entre les groupes. Les résultats de cette analyse servent de base pour des investigations plus poussées à l'aide d'outils analytiques plus complexes comme les réseaux de co-occurrence et les chaînes de Markov, enrichissant ainsi notre compréhension des dynamiques de collaboration observées.

5.2.2 Analyse des réseaux de co-occurrence

Dans un second temps, nous construisons et analysons des réseaux de co-occurrence pour chaque groupe, afin d'examiner les relations entre les différentes catégories de processus collaboratif. L'idée sous-jacente est que des catégories qui apparaissent souvent ensemble dans les séquences d'interaction sont probablement liées fonctionnellement et reflètent une certaine organisation de l'activité.

Sur le plan mathématique, un réseau de co-occurrence est un graphe non orienté où chaque nœud représente une catégorie (ici un processus collaboratif) et chaque arête entre deux nœuds indique que ces deux catégories apparaissent fréquemment ensemble dans les données. Le poids des arêtes représente la force de l'association, calculée par exemple à partir du nombre de co-occurrences observées.

Techniquement, nous considérons que deux catégories sont en co-occurrence si elles apparaissent de manière contiguë dans la séquence codée, c'est-à-dire séparées au maximum par un certain nombre d'unités. En balayant ainsi les séquences codées, nous construisons pour chaque groupe une matrice de co-occurrence qui comptabilise le nombre de co-occurrences observées pour chaque paire de catégories. Cette matrice est ensuite transformée en matrice d'adjacence d'un réseau pondéré, où chaque nœud représente une catégorie et chaque lien pondéré indique la force de l'association entre deux catégories.

Une fois ces réseaux construits, nous les analysons à l'aide de différentes métriques classiques de la théorie des graphes. La densité du réseau, qui correspond à la proportion de liens présents par rapport au nombre total de liens possibles, reflète le degré général

de connectivité entre les catégories. Un réseau dense indique que les processus collaboratifs sont fortement liés les uns aux autres, tandis qu'un réseau clairsemé traduit une certaine compartimentation de l'activité. Le degré de chaque noeud, c'est-à-dire le nombre de liens qui lui sont incidents, permet d'identifier les catégories les plus connectées aux autres et donc potentiellement les plus centrales dans l'activité du groupe. La centralité d'intermédiarité (*betweenness centrality*) mesure, pour chaque noeud, la proportion des plus courts chemins du réseau qui passent par lui. Un noeud avec une forte centralité d'intermédiarité joue un rôle important de "pont" ou de "relais" entre différentes zones du réseau, contrôlant le flux d'informations entre les processus collaboratifs.

La visualisation de ces réseaux sous forme de graphes offre une représentation intuitive de la structure des interactions et permet une comparaison qualitative entre groupes. L'analyse des réseaux de co-occurrence apporte ainsi un éclairage complémentaire en mettant en évidence l'organisation relationnelle des processus collaboratifs, là où l'analyse des fréquences ne considère que leur distribution individuelle. Elle permet de détecter des associations privilégiées entre certains processus et d'identifier les catégories jouant un rôle clé dans la structuration de l'activité collective.

5.2.3 Analyse des séquences avec les chaînes de Markov

Enfin, pour aller au-delà d'une simple analyse des co-occurrences et prendre en compte la dimension temporelle des interactions, nous proposons de modéliser les séquences d'activités collaboratives à l'aide des chaînes de Markov. Cet outil mathématique, issu de la théorie des processus stochastiques, permet de représenter l'évolution d'un système à travers une succession d'états discrets, où la probabilité de transition vers un état futur ne dépend que de l'état présent (propriété de Markov).

Dans notre cas, chaque catégorie de processus collaboratif est considérée comme un état possible du système, et nous cherchons à modéliser les probabilités de passer d'un état à un autre au cours du temps. Concrètement, pour chaque groupe, nous construisons une matrice de transition en estimant les probabilités empiriques de passer d'une catégorie à une autre sur la base des séquences observées.

Par exemple, si dans les séquences du groupe 1, la catégorie "partage d'information" est suivie 8 fois sur 10 par la catégorie "discussion", la probabilité de transition de "partage d'information" vers "discussion" sera estimée à 0.8 pour ce groupe. En répétant ce calcul pour chaque paire de catégories, on obtient une matrice carrée dont les lignes et les colonnes représentent les états, et dont chaque cellule (i,j) indique la probabilité de passer de l'état i à l'état j à chaque pas de temps.

À partir de cette matrice de transition, notre analyse se concentre sur plusieurs aspects clés :

- Nombre de transitions uniques : cette analyse quantifie la diversité des enchaînements d'activités en comptabilisant le nombre de transitions uniques observées dans chaque groupe. Cet indicateur renseigne sur la variété des séquences d'interaction.
- Probabilités moyennes de transition : pour chaque groupe, nous calculons la moyenne des probabilités de transition entre toutes les paires de catégories d'activités. Cette mesure donne une indication globale de la prévisibilité des enchaînements d'actions.
- Écart-type des probabilités de transition : en complément de la moyenne, l'examen de l'écart-type des probabilités de transition permet d'évaluer la variabilité des

patterns d'interaction au sein de chaque groupe.

- Modélisation sous forme de process map : pour visualiser de manière intuitive les flux d'activités, la génération des cartes de processus (process maps) basées sur les matrices de transition markoviennes met en évidence les transitions les plus probables et la fréquence relative des différentes activités.

En combinant ces différents niveaux d'analyse, nous visons à obtenir une compréhension approfondie de la dynamique temporelle des interactions collaboratives. Cette approche nous permet non seulement d'identifier des patterns récurrents dans les séquences d'activités, mais aussi de comparer quantitativement les styles de collaboration entre les groupes. L'utilisation des chaînes de Markov et leur visualisation sous forme de process maps offrent ainsi un éclairage complémentaire aux analyses de fréquence et de co-occurrence, en capturant la dimension séquentielle des comportements collaboratifs dans notre environnement d'apprentissage.

Au final, le cadre méthodologique que nous proposons vise à capturer la complexité et la dynamique de l'activité collective en articulant différents niveaux de description, des régularités globales aux enchaînements locaux en passant par les associations privilégiées. En combinant des techniques de statistiques descriptives, d'analyse de réseaux et de modélisation stochastique, cela permet une approche multi-niveau pour l'étude des processus de collaboration dans les environnements numériques.

5.3 Étude

Ce chapitre s'appuie sur l'ensemble de données collectées et présentées dans le chapitre 4, qui détaille les caractéristiques du jeu utilisé pour l'expérimentation, son fonctionnement, ainsi que la composition et le nombre de participants impliqués. Compte tenu de la richesse des données issues de cette expérience initiale, nous avons décidé de poursuivre notre analyse en explorant d'autres dimensions de ces données pour approfondir notre compréhension des comportements collaboratifs. Cette continuité nous permet de tirer pleinement parti de la complexité des interactions capturées, offrant une base solide pour une exploration détaillée à travers les méthodes d'analyse de fréquence, de réseaux de co-occurrence, et de chaînes de Markov, comme décrit dans les sections précédentes.

5.3.1 Analyse multimodale

Dans cette étude, nous proposons une approche novatrice combinant l'analyse des traces d'interaction (actions catégorisées en tâches, autorégulation et corégulation) et l'analyse du contenu des échanges (catégorisation manuelle des énoncés du chat en directives, partages d'informations, consultation, etc.). Cette approche multimodale vise à offrir une compréhension plus riche et nuancée des comportements collaboratifs dans notre environnement d'apprentissage. En effet, si l'analyse des traces permet de capturer les actions concrètes des apprenants dans l'environnement virtuel, l'examen du contenu des échanges offre un éclairage complémentaire sur les processus cognitifs et sociaux à l'œuvre. La combinaison de ces deux sources de données permet de pallier les limites inhérentes à chacune d'elles prise isolément. Par exemple, là où l'analyse des traces pourrait laisser dans l'ombre les intentions ou les raisonnements des apprenants, l'analyse du contenu des

échanges permet de les expliciter. Inversement, certaines actions collaboratives peuvent ne pas être verbalisées mais être capturées par les traces d'interaction. Cette approche s'inscrit dans la lignée des travaux récents en learning analytics [149] qui soulignent l'importance d'adopter des méthodologies intégratives pour saisir la complexité des phénomènes d'apprentissage collaboratif médiatisé par ordinateur. Elle fait également écho aux recommandations de Järvelä et al. (2016) [15] sur la nécessité de combiner différents niveaux d'analyse pour comprendre les processus de régulation dans les environnements CSCL.

5.3.2 Analyse vidéo et schémas de codage

La grille d'analyse utilisée dans cette étude a été élaborée selon un processus itératif combinant des approches top-down et bottom-up. Notre point de départ a été la grille développée dans le chapitre 3, qui s'appuyait sur les travaux de Tong (2017) [14] concernant les processus collaboratifs (awareness, régulation, partage d'informations et discussion). Cette base a été enrichie par une approche top-down, en intégrant des éléments issus de la littérature sur la régulation dans les environnements CSCL, notamment les travaux de Järvelä et al. (2016) [15] sur l'autorégulation et la co-régulation. Parallèlement, nous avons collaboré avec le laboratoire ICAR, spécialisé en analyse du discours, pour développer une approche bottom-up. Cette approche, basée sur l'analyse inductive du corpus de messages échangés dans le chat, a permis de faire émerger des catégories spécifiques à notre contexte d'étude, telles que "clarification", "explication", "réception".

L'intégration de ces deux approches a conduit à une grille d'analyse plus riche et plus adaptée à notre étude, combinant des catégories théoriquement fondées avec des catégories empiriquement dérivées. Par exemple, la catégorie 'résolution de tâches' issue de notre grille initiale a été affinée pour inclure des sous-catégories comme 'feedback d'exécution'. Ce processus itératif a permis d'assurer à la fois la validité théorique de notre grille et sa pertinence empirique pour l'analyse des comportements collaboratifs dans notre environnement d'apprentissage spécifique.

L'objectif de ce codage était de fournir un aperçu quantitatif de la manière dont les participants ont collaboré dans le jeu à partir du chat. Nous avons défini un schéma de codage dans le Tableau 5.1. Trois codeurs ont catégorisé indépendamment les messages du tchat, représentant plus de 10% du total des messages (soit 323 énoncés sur un corpus total de 3069 messages). Un test de fiabilité inter-juges a été effectué avec un résultat satisfaisant. Le Kappa de Fleiss, qui mesure l'accord entre trois observateurs, est : $\kappa = 0.731$ ($\sigma_e = 0.008$), indiquant un accord substantiel entre les codeurs. Il y avait au total 14 parties, pour un total de 3069 messages, soit une moyenne de 219 messages par partie.

TABLEAU 5.1 – Schéma de codage des comportements collaboratifs : catégories, sous-catégories et descriptions

Catégorie	Sous-Catégorie	Code	Description
Partage d'informations	Information	INFOGEN	Donne une info générale
	Monitoring	MONIT	Donne une info à laquelle un joueur n'a pas accès
	Awareness	AW AW-	Rend visible son action Rend compte d'une info dont il ne dispose pas
Résolution de tâches	Consultation	CONSULT	Demande l'avis des autres
	Proposition	PROP	Fait une proposition d'action
	Directive	DIR	Donne une directive
	Feedback d'exécution	FEEDEXE	Fait un retour sur ce qui a été fait
Social		SOC	Fonction sociale
Régulation du dialogue	Validation	VAL	Valide/Rejette/Ne se positionne pas ou nuance une proposition
	Clarification	CLAR	Fait une clarification
	Explication	EXPL	Donne une explication, justification
	Réception	RECEPT	Accuse réception

5.4 Résultats

5.4.1 Analyse de fréquence

L'analyse des fréquences d'apparition des différentes catégories de processus collaboratifs révèle des patterns d'interaction distincts entre les groupes étudiés. Notre schéma de codage a produit de nombreux indicateurs, mais nous nous concentrerons ici sur ceux présentant les fréquences relatives les plus élevées, notamment les catégories "Tâche", "Co-régulation", "Auto-régulation" et "Consultation", qui émergent comme des éléments clés dans la dynamique collaborative. Le tableau 5.1 présente la distribution de l'ensemble des catégories pour chaque groupe.

Le Tableau 5.2 présente la distribution des activités avec les plus hautes fréquences pour tous les groupes étudiés, ainsi que le nombre d'indicateurs étant supérieurs à 5%.

L'examen de ces données révèle que pour l'ensemble des groupes, les catégories "Tâche" et "Co-régulation" sont les plus représentées. La catégorie "Tâche" varie entre 21,18% (G2) et 46,41% (G7) des interactions, tandis que la "Co-régulation" oscille entre 9,52%

Catégorie	Group G1 (P)	Group G2 (I)	Group G3 (I)	Group G4 (I)	Group G6 (I)	Group G7 (I)	Group G8 (I)
Task	24,75%	21,18%	27,24%	31,20%	40,04%	46,41%	34,90%
co-régulation	12,07%	16,86%	9,52%	19,92%	24,35%	22,25%	13,11%
CONSULT	11,56%	9,80%	11,17%	8,02%	2,40%	1,02%	7,98%
self-régulation	9,23%	9,48%	7,75%	11,40%	16,79%	12,59%	7,98%
DIR	7,61%	4,32%	5,84%	3,38%	3,14%	4,54%	12,68%
VAL	7,51%	8,22%	11,87%	3,63%	2,58%	1,61%	2,99%
MONIT	7,20%	9,91%	5,84%	6,14%	3,32%	2,05%	3,85%
AW	6,39%	3,79%	6,79%	3,63%	2,40%	5,71%	4,27%
SOCIAL	4,06%	5,69%	2,67%	0,75%	1,29%	0	1,99%
INFO	3,45%	3,48%	1,84%	2,38%	1,29%	1,46%	2,28%
CLAR	3,35%	1,79%	3,68%	2,51%	1,11%	1,02%	3,99%
FEDEXE	1,32%	2,21%	2,29%	3,51%	0,74%	0,15%	1,28%
AW-	0,91%	0,63%	1,02%	0,88%	0,18%	0,29%	0,28%
RECEPT	0,61%	2,63%	2,48%	2,63%	0,37%	0,88%	2,42%

FIGURE 5.1 – Distribution des fréquences relatives des comportements collaboratifs par groupe (%)

TABLEAU 5.2 – Distribution des catégories dominantes de comportements collaboratifs par groupe

Groupe	Tâche	Co-régulation	Consultation	Indicateurs > 5%
G1	24,75%	12,07%	11,56%	8
G2	21,18%	16,86%	9,80%	7
G3	27,24%	9,52%	11,17%	8
G4	31,20%	19,92%	8,02%	5
G6	40,04%	24,35%	2,40%	3
G7	46,41%	22,25%	1,02%	4
G8	34,90%	13,11%	7,98%	5

(G3) et 24,35% (G6). On observe toutefois des variations notables dans la distribution des fréquences entre les groupes. Pour les groupes G1, G2, G3, G4 et G8, au-delà des catégories "Tâche" et "Co-régulation", d'autres catégories émergent avec des fréquences significatives (>5%). La consultation, notamment, représente entre 7,98% (G8) et 11,56% (G1) des interactions. Ces groupes présentent entre 5 et 8 catégories dépassant le seuil de 5% de fréquence. Les groupes G6 et G7 se distinguent par une concentration plus marquée sur les deux catégories principales. La catégorie "Tâche" atteint respectivement 40,04% et 46,41% des interactions, et la "Co-régulation" 24,35% et 22,25%. Les autres catégories présentent des fréquences plus faibles, avec notamment la consultation à 2,40% pour G6 et 1,02% pour G7. Ces deux groupes comptent respectivement 3 et 4 catégories dépassant le seuil de 5%.

5.4.2 Analyse des réseaux de co-occurrence

L'analyse des réseaux de co-occurrence, dans le tableau 5.2 nous permet d'examiner la structure relationnelle des activités collaboratives au sein des groupes. Cette approche révèle des patterns d'interaction distincts, complétant les observations issues de l'analyse de fréquence. Le tableau 5.3 présente les densités des réseaux de co-occurrence observées pour chaque groupe.

Groupe	Nœuds	Arêtes	Deg. A1	Deg. A2	Deg. A3	Deg. V1	Deg. V2	Deg. V3	Cent. A'	Cent. A'	Cent. A'	Cent. V1	Cent. V2	Cent. V3
G1	14	79	Consult	Dir	Co-rég	1	1	1	Consult	Dir	Co-rég	0,02	0,02	0,02
G2	14	81	Monit	Co-rég	Consult	1	1	1	Monit	Co-rég	Consult	0,018	0,018	0,018
G3	14	84	Social	Consult	Val	1	1	1	Social	Consult	Val	0,009	0,009	0,009
G4	14	68	Consult	Co-rég	Task	0,923	0,923	0,923	Task	Dir	Consult	0,053	0,032	0,03
G6	14	45	Co-rég	Task	Self-rég.	0,846	0,769	0,692	Dir	Co-rég	Aw	0,155	0,131	0,101
G7	13	41	Co-rég.	Task	Dir	0,917	0,917	0,75	Task	Co-rég	Dir	0,247	0,141	0,082
G8	14	70	Task	Dir	Consult	1	1	0,923	Task	Dir	Clar	0,068	0,068	0,037

FIGURE 5.2 – Structure des réseaux de co-occurrence

TABLEAU 5.3 – Analyse structurale : densité des réseaux de co-occurrence par groupe

Groupe	Nombre de liens	Densité
G1	79	0.87
G2	81	0.89
G3	84	0.92
G4	68	0.75
G6	45	0.49
G7	41	0.53
G8	70	0.77

L'examen de ces données révèle deux tendances distinctes dans la structure des interactions collaboratives. D'une part, les groupes G1, G2, G3, G4 et G8 présentent des réseaux très denses, avec des valeurs allant de 0,75 pour G4 à 0,92 pour G3. Cette forte densité indique une interconnexion importante entre les différents types d'activités. L'analyse des degrés des nœuds (tableau 5.2) dans ces réseaux révèle que la consultation et la co-régulation sont systématiquement parmi les catégories les plus centrales, à l'exception du groupe G3 et G8. Il est intéressant de noter que ces groupes ne présentent pas de "ponts" prédominants (pas de scores de betweenness supérieur à 0,1), ce qui suggère une stratégie d'interaction flexible et bien répartie. D'autre part, les groupes G6 et G7 se caractérisent par des réseaux nettement moins denses (0,49 et 0,53 respectivement), indiquant une organisation plus modulaire et moins intégrée des activités. Dans ces groupes, les catégories centrales diffèrent également, avec une prédominance de la co-régulation, de la tâche et de l'autorégulation ou des directives. Contrairement aux autres groupes, la consultation n'apparaît pas comme un élément central. De plus, ces groupes présentent des "ponts" avec des valeurs de betweenness supérieures à 0,100, notamment les directives, jouant un rôle clé de pivot dans la coordination des différentes phases d'interaction. Ces résultats mettent en évidence des différences significatives dans la structure relationnelle des activités collaboratives entre les groupes. Ils suggèrent l'existence de deux approches distinctes dans l'organisation des interactions : une approche plus intégrée et interconnectée pour les groupes G1, G2, G3, G4 et G8, et une approche plus modulaire et centrée sur certaines activités spécifiques pour les groupes G6 et G7. Ces observations complètent les tendances identifiées dans l'analyse de fréquence, offrant une perspective plus riche sur les dynamiques collaboratives au sein de notre échantillon.

5.4.3 Analyse des chaînes de Markov

L'analyse des chaînes de Markov nous permet d'examiner la dynamique temporelle des interactions collaboratives, en modélisant les probabilités de transition entre différentes catégories d'activités. Cette approche offre un éclairage complémentaire sur les patterns comportementaux identifiés précédemment.

Diversité des transitions

Nous avons d'abord examiné le nombre de transitions uniques observées dans chaque groupe, ce qui donne une indication de la variété des séquences d'interaction. Le Tableau 5.4 présente ces résultats.

TABLEAU 5.4 – Diversité comportementale : nombre de transitions uniques observées par groupe

Groupe	Transitions uniques
G1	136
G2	150
G3	151
G4	121
G6	71
G7	68
G8	113

Ces données révèlent une variation importante dans la diversité des transitions entre les groupes. Les groupes G1, G2, G3, G4 et G8 présentent un nombre élevé de transitions uniques (entre 113 pour G8 et 151 pour G3), indiquant une grande variété dans les enchaînements d'activités. En revanche, les groupes G6 et G7 montrent un nombre nettement plus restreint de transitions uniques (71 et 68 respectivement), suggérant des séquences d'interaction plus répétitives.

Analyse des probabilités de transition

Pour chaque groupe, nous avons calculé la moyenne des probabilités de transition entre toutes les paires de catégories d'activités, ainsi que l'écart type moyen. Le Tableau 6.5 résume les statistiques descriptives de ces probabilités.

Pour les groupes G1, G2, G3, G4 et G8 les probabilités moyennes de transition sont relativement basses (de 0,093 pour G2 et G3 à 0,124 pour G8), avec des écarts-types faibles (de 0,066 pour G2 à 0,110 pour G8). Ces caractéristiques suggèrent une dynamique d'interaction flexible, avec de nombreux patterns d'enchaînement différents. Pour les groupes G6 et G7, les probabilités moyennes de transition sont plus élevées (0,197 pour G6 et 0,191 pour G7), avec des écarts-types plus importants (0,185 pour G6 et 0,219 pour G7). Ces caractéristiques indiquent une dynamique d'interaction où certaines transitions sont statistiquement plus fréquentes que d'autres, comme en témoignent à la fois les valeurs moyennes plus élevées et la plus grande dispersion des probabilités de transition.

TABLEAU 5.5 – Analyse statistique des probabilités de transition entre comportements collaboratifs par groupe

Groupe	Probabilité moyenne	Écart-type
G1	0,103	0,083
G2	0,093	0,066
G3	0,093	0,071
G4	0,116	0,107
G6	0,197	0,185
G7	0,191	0,219
G8	0,124	0,110

TABLEAU 5.6 – Synthèse comparative des indicateurs de collaboration et interprétation par groupe

Groupe	Analyse de fréquence	Réseau de co-occurrence	Transitions uniques	Probabilités de transition	Interprétation
G1	Tâche : 24,75% Co-rég : 12,07% Consult : 11,56%	Densité : 0,87	136	Moy : 0,103 ET : 0,083	Distribution variée des activités, forte interconnexion, flexibilité dans les séquences d'interaction
G2	Tâche : 21,18% Co-rég : 16,86% Consult : 9,80%	Densité : 0,89	150	Moy : 0,093 ET : 0,066	
G3	Tâche : 27,24% Co-rég : 9,52% Consult : 11,17%	Densité : 0,92	151	Moy : 0,093 ET : 0,071	
G4	Tâche : 31,20% Co-rég : 19,92% Consult : 8,02%	Densité : 0,75	121	Moy : 0,116 ET : 0,107	
G8	Tâche : 34,90% Co-rég : 13,11% Consult : 7,98%	Densité : 0,77	113	Moy : 0,124 ET : 0,110	
G6	Tâche : 40,04% Co-rég : 24,35% Consult : 2,40%	Densité : 0,49	71	Moy : 0,197 ET : 0,185	Forte concentration sur la tâche, structure moins intégrée, séquences d'interaction plus prévisibles
G7	Tâche : 46,41% Co-rég : 22,25% Consult : 1,02%	Densité : 0,53	68	Moy : 0,191 ET : 0,219	

L'analyse des données présentées dans le tableau 5.6 révèle deux tendances distinctes

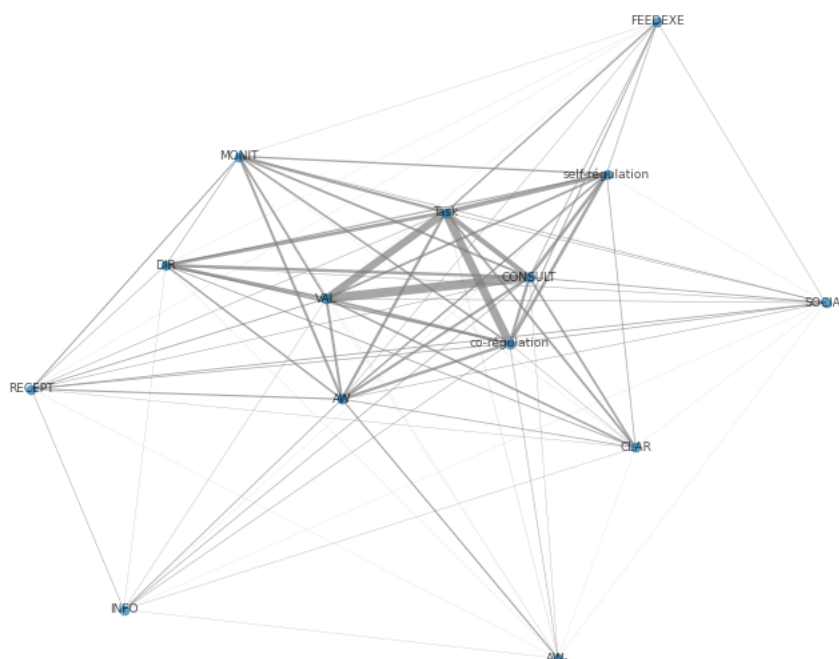


FIGURE 5.3 – Visualisation du réseau de co-occurrence pour le groupe G3

dans les comportements collaboratifs de notre échantillon. Ces tendances se manifestent de manière consistante à travers nos différentes méthodes d'analyse, de la distribution des fréquences jusqu'à la structure temporelle des interactions. Les groupes G1, G2, G3, G4 et G8 présentent des caractéristiques communes : une répartition plus diversifiée des activités où, bien que la tâche reste prédominante (entre 21,18% et 34,90%), d'autres catégories émergent significativement. Ces groupes se distinguent par des réseaux de co-occurrence denses (entre 0,75 et 0,92) et un nombre élevé de transitions uniques (entre 113 et 151). À l'inverse, les groupes G6 et G7 montrent une concentration plus marquée sur certaines catégories spécifiques, notamment la tâche (40,04% et 46,41% respectivement), des réseaux de co-occurrence moins denses (0,49 et 0,53) et un nombre plus restreint de transitions uniques (71 et 68). Pour analyser plus finement ces tendances, nous avons sélectionné deux groupes présentant les caractéristiques les plus marquées : G3 et G7. Le groupe G3 se caractérise par la densité de réseau la plus élevée (0,92) et le plus grand nombre de transitions uniques (151). Le groupe G7 présente quant à lui la plus forte concentration sur la tâche (46,41%) et le plus petit nombre de transitions uniques (68). La suite de notre analyse se focalisera sur une modélisation visuelle détaillée des dynamiques collaboratives de ces deux groupes, permettant d'examiner plus précisément les caractéristiques qui les différencient.

5.4.4 Modélisation visuelle des dynamiques collaboratives

Pour approfondir notre compréhension des dynamiques collaboratives identifiées précédemment, nous avons généré des représentations visuelles pour les groupes G3 et G7.

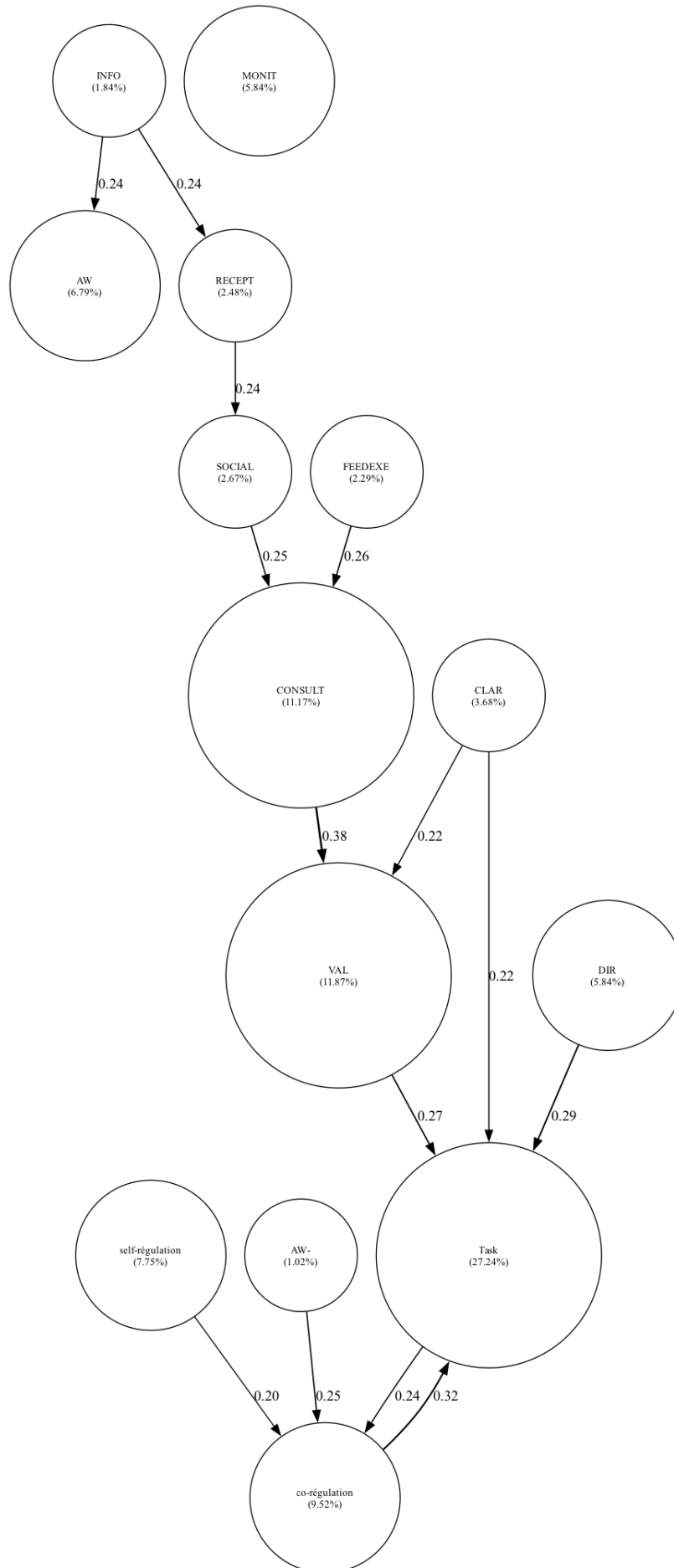


FIGURE 5.4 – Dynamiques de transition entre comportements collaboratifs pour G3 : modélisation par chaînes de Markov

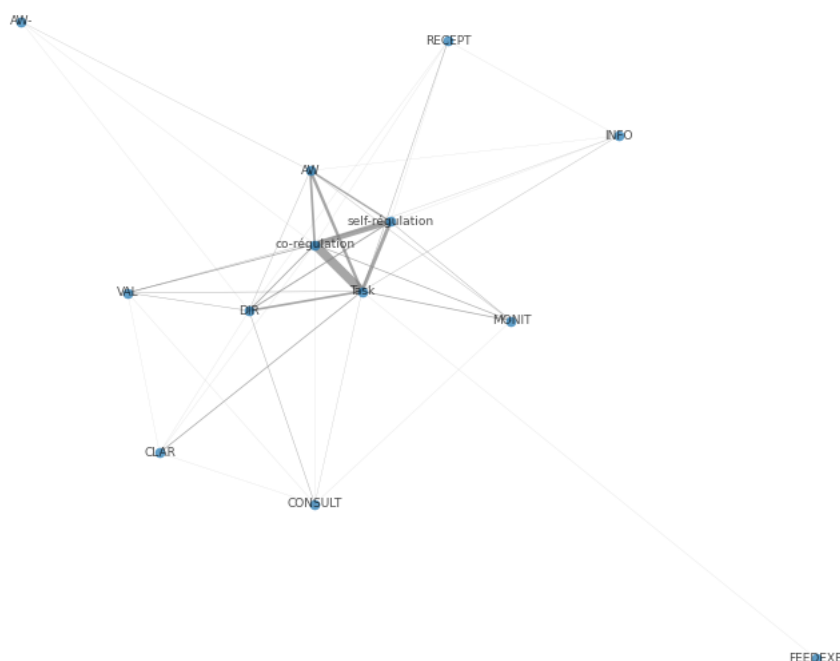


FIGURE 5.5 – Visualisation du réseau de co-occurrence pour le groupe G7

Ces visualisations, comprenant des réseaux de co-occurrence et des cartes de processus (process maps), offrent des aperçus complémentaires sur les structures d'interaction et les flux d'activités au sein de ces groupes. Pour les cartes de processus, nous avons appliqué un seuil de 0,18 pour l'affichage des liens entre les différents nœuds. Ce seuil a été choisi pour mettre en évidence les transitions les plus significatives tout en maintenant la lisibilité des graphiques. De plus, la taille des nœuds dans les cartes de processus est proportionnelle à la fréquence relative de chaque catégorie d'activité. Nous avons défini cinq catégories de taille de nœuds basées sur la fréquence :

- Très grands nœuds (taille 3.5) pour les fréquences supérieures à 30%
- Grands nœuds (taille 3) pour les fréquences entre 10% et 30%
- Nœuds moyens (taille 2) pour les fréquences entre 5% et 10%
- Petits nœuds (taille 1.5) pour les fréquences entre 1% et 5%
- Très petits nœuds (taille 1) pour les fréquences inférieures à 1%

Cette représentation visuelle permet de saisir rapidement l'importance relative de chaque type d'activité au sein du groupe, tout en visualisant les transitions les plus probables entre ces activités. Ainsi, les cartes de processus offrent une vue synthétique de la fréquence des activités et de leur enchaînement, enrichissant notre compréhension des dynamiques collaboratives propres à chaque groupe.

Réseaux de co-occurrence

Les réseaux de co-occurrence (Figures 5.3 et 5.5) illustrent la structure relationnelle des activités collaboratives pour G3 et G7 respectivement. Pour G3 (Figure 5.3), le réseau

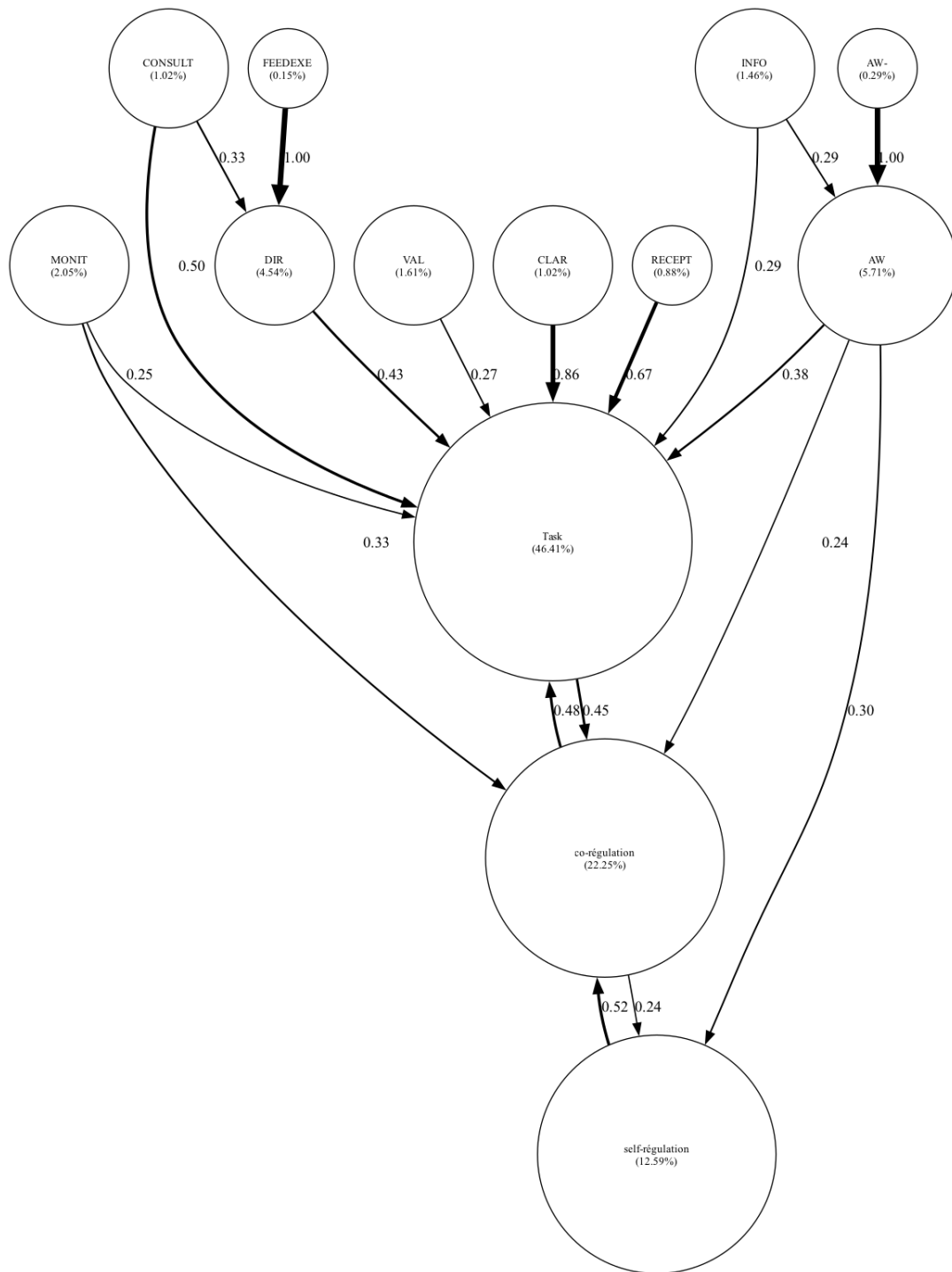


FIGURE 5.6 – Dynamiques de transition entre comportements collaboratifs pour G7 : modélisation par chaînes de Markov

présente une densité élevée (0.92), corroborant nos observations précédentes sur l'interconnexion forte des activités dans ce groupe. Visuellement, cela se traduit par un graphe hautement connecté où presque tous les nœuds sont reliés entre eux. Les nœuds centraux, représentant les catégories les plus connectées, incluent "Tâche", "Co-régulation", et "Consultation", confirmant leur rôle pivot identifié dans l'analyse de fréquence. En contraste, le réseau de G7 (Figure 5.5) affiche une densité nettement plus faible (0.53), se manifestant par une structure plus clairsemée. Les nœuds "Tâche" et "Co-régulation" apparaissent significativement plus grands, indiquant leur centralité accrue dans les interactions.

Cartes de processus (Process Maps)

Les cartes de processus (Figures 5.4 et 5.6) offrent une perspective dynamique sur les séquences d'activités, complétant l'aspect structurel des réseaux de co-occurrence. Il est important de noter que ces visualisations ne montrent que les transitions ayant une probabilité supérieure à 0.18, ce qui permet de mettre en évidence les patterns les plus forts mais masque les transitions plus faibles.

La carte de G3, en cohérence avec sa forte densité de réseau (0.92) et son nombre élevé de transitions uniques (151) identifiés précédemment, montre un pattern intéressant. Bien que les transitions visibles (>0.18) puissent sembler majoritairement unidirectionnelles, cela ne reflète que les transitions les plus probables. Le grand nombre de transitions uniques et la forte densité de co-occurrence suggèrent en réalité une dynamique d'interaction plus riche et diversifiée, où de nombreuses transitions de plus faible probabilité (<0.18) contribuent à la flexibilité globale des interactions. Ces transitions, bien qu'unidirectionnelles au-dessus du seuil de 0.18, s'inscrivent dans un contexte plus large de forte densité de réseau (0.92) et de nombreuses transitions uniques (151). Pour G3, l'analyse de la process map révèle une structure d'interaction relativement linéaire, mais complexe. On observe une progression séquentielle où différentes formes d'échanges et d'activités (INFO, RECEPT, SOCIAL, CONSULT, VAL) conduisent ultimement à la réalisation de la tâche. Cette structure reflète la forte densité du réseau de co-occurrence (0.92) et le nombre élevé de transitions uniques (151) précédemment identifiés, suggérant un processus collaboratif qui privilégie la construction progressive et collective de l'action. Les aller-retours observés entre la tâche et la co-régulation, influencés par l'auto-régulation, illustrent un processus itératif de régulation collective. Cette organisation est cohérente avec la distribution plus équilibrée des fréquences d'activités observée initialement (Tâche : 27.24%, Co-régulation : 9.52%, Consultation : 11.17%).

En contraste, la process map de G7 révèle une dynamique radicalement différente où la majorité des actions convergent directement vers la tâche, avec des probabilités de transition particulièrement élevées (notamment 0.67 de "RECEPT" vers "Tâche"). Cette structure centrée sur la tâche est cohérente avec la faible densité de réseau observée (0.53) et le nombre limité de transitions uniques (68). La particularité de ce groupe réside dans les fortes transitions bidirectionnelles formant un triangle entre tâche, co-régulation et l'auto-régulation (transitions de 0.45 et 0.48 entre Tâche et Co-régulation, 0.52 et 0.24 entre Co-régulation et Auto-régulation). Cette configuration révèle une organisation particulière des interactions, caractérisée par des transitions bidirectionnelles marquées formant une structure triangulaire entre tâche, co-régulation et auto-régulation (transitions de 0.45 et 0.48 entre Tâche et Co-régulation, 0.52 et 0.24 entre Co-régulation et Auto-régulation).

Ces allers-retours fréquents entre les différents niveaux de régulation, combinés à la forte concentration des fréquences sur la tâche (46.41%) et la co-régulation (22.25%), suggèrent une dynamique où les processus de régulation individuelle et collective sont étroitement liés à l'exécution des tâches.

Cette analyse des process maps, mise en perspective avec les résultats précédents de densité et de co-occurrence, révèle ainsi deux dynamiques collaboratives distinctes : - Pour G3 : une collaboration caractérisée par une grande diversité de transitions possibles, comme le montrent les 151 transitions uniques identifiées et la densité élevée du réseau (0,92). Les séquences d'activités présentent de multiples chemins pour atteindre la catégorie "Tâche", avec des probabilités de transition plus uniformément distribuées (moyenne = 0,093, écart-type = 0,071). - Pour G7 : une collaboration plus structurée autour de cycles de régulation focalisés sur la tâche, avec des transitions plus prévisibles et des boucles de rétroaction entre tâche, co-régulation et auto-régulation.

5.5 Discussion

Les résultats de notre étude offrent un aperçu de la dynamique complexe des comportements collaboratifs dans un environnement d'apprentissage basé sur un jeu sérieux. En combinant l'analyse des traces d'interaction et la catégorisation des échanges dans le chat, notre approche à plusieurs niveaux a permis de mettre en lumière des patterns spécifiques dans l'organisation et la séquence des activités collaboratives.

5.5.1 Analyse de fréquence

L'analyse des fréquences a révélé des profils de collaboration très contrastés entre les groupes. Si certains (G1, G2, G3, G4 et G8) présentent une répartition relativement équilibrée entre les catégories liées à la tâche, la co-régulation et l'auto-régulation, les groupes G et G7 se distinguent par une prédominance marquée de certains processus. Nos travaux semblent cohérent avec ceux de Viberg et al. (2018) [149], qui ont montré l'importance d'analyser à la fois les actions liées à la tâche et les processus de régulation dans les interactions, ce que nos résultats confirment à travers la prépondérance observée de ces deux catégories dans tous les groupes, bien qu'avec des proportions variables.

5.5.2 Réseaux de co-occurrence

La modélisation par réseaux de co-occurrence a permis d'aller plus loin en montrant la structure relationnelle de ces activités. On observe chez les groupes G1 à G4 des réseaux très denses, indiquant une forte interconnexion des catégories d'activité. Les processus de consultation, de co-régulation et de monitoring apparaissent particulièrement centraux et connectés aux autres. À l'inverse, les groupes G6 et G7 présentent des réseaux plus clairsemés avec une organisation plus modulaire : la tâche et la co-régulation occupent une place prépondérante mais sont moins articulées aux autres processus. Ces topologies contrastées mettent en évidence deux structures d'organisation différentes : d'une part, des réseaux denses avec de nombreuses connexions entre les catégories d'activités, et d'autre part, des réseaux moins denses où les connexions sont plus concentrées autour de certaines catégories spécifiques, notamment la tâche et la co-régulation. Elles rejoignent

les observations de Saqr et al. (2019) [170] montrant l'intérêt des métriques de réseaux pour caractériser les patterns d'interaction et leur évolution.

5.5.3 Chaîne de Markov

Dans notre analyse des chaînes de Markov, nous avons choisi de nous concentrer sur les probabilités de transition les plus fortes plutôt que sur les transitions des tâches les plus fréquentes. Ce choix méthodologique est motivé par notre objectif d'identifier les patterns comportementaux dominants et les tendances les plus significatives dans les dynamiques collaboratives. Bien que les tâches fréquentes soient importantes, elles ne révèlent pas nécessairement les enchaînements d'actions les plus caractéristiques. En examinant les transitions les plus probables, nous mettons en lumière les séquences d'actions qui définissent le plus fortement le comportement collaboratif de chaque groupe. L'analyse par chaînes de Markov a permis de caractériser la structure temporelle des interactions collaboratives à travers les transitions entre catégories d'activités. Les différences observées entre les groupes dans le nombre de transitions uniques et les probabilités moyennes de transition suggèrent des modes de collaboration distincts. Ces observations s'inscrivent dans la lignée des travaux de Köck et Paramythis (2011) [172] et Jeong et al. (2010) [171], qui ont démontré l'intérêt des modèles markoviens pour identifier des patterns comportementaux caractéristiques dans les environnements d'apprentissage. Dans notre contexte, cette approche a notamment mis en évidence comment les enchaînements d'activités peuvent varier selon les groupes, certains adoptant des séquences d'actions plus régulières que d'autres.

5.5.4 Modélisation visuelle des dynamiques collaboratives

La modélisation visuelle à travers les réseaux de co-occurrence et les cartes de processus met en évidence les différences structurelles dans l'organisation des interactions entre les groupes G3 et G7. Pour G3, le réseau de co-occurrence montre une forte interconnexion entre toutes les catégories d'activités. La taille similaire des nœuds confirme la distribution équilibrée des interactions identifiée dans l'analyse fréquentielle, avec une répartition des rôles pivots entre les catégories "Tâche", "Co-régulation", "Validation" et "Consultation". Cette densité élevée suggère que les différentes catégories d'activités sont fortement liées entre elles, indiquant une approche collaborative où les transitions entre différents types d'interactions sont fluides et fréquentes. La taille relativement uniforme des nœuds dans ce réseau corrobore l'analyse de fréquence initiale, montrant une distribution équilibrée des interactions entre les diverses catégories. La centralité des nœuds "Tâche", "Co-régulation", "Validation" et "Consultation" dans ce réseau confirme leur rôle pivot dans la dynamique du groupe, soulignant l'importance de ces processus dans la coordination et l'exécution des activités collaboratives. La carte de processus de G3 vient compléter cette image en offrant une perspective dynamique sur les séquences d'activités. La multiplicité des liens entre les différentes catégories et la présence de nombreuses étapes de transitions pour arriver à la tâche (par exemple "Social" puis "CONSULT" et "VAL" avant "Tâche") mettent en évidence une dynamique d'interaction itérative. Cette structure suggère un processus de prise de décision collaboratif où les membres du groupe s'engagent fréquemment dans des cycles différents, comme montré par les autres chemins

itératifs. Les transitions fréquentes impliquant "INFO" (Information), "RECEPT" (Réception), et "SOCIAL" indiquent un flux continu d'échanges d'information et d'interactions sociales, soulignant l'importance de la communication et du maintien des relations interpersonnelles dans le processus collaboratif. En contraste, le groupe G7, présente des visualisations significativement différentes. Son réseau de co-occurrence, avec une densité plus faible, révèle une structure plus clairsemée et modulaire. Cette configuration suggère une approche plus compartimentée de la collaboration, où certaines activités sont moins intégrées dans le flux global des interactions. La prédominance visuelle des nœuds "Tâche" et "Co-régulation" dans ce réseau corrobore l'analyse de fréquence initiale, soulignant la concentration des activités autour de l'exécution des tâches et de la coordination directe. La carte de processus de G7 renforce cette interprétation en montrant des chemins de transition plus directs et moins diversifiés. Les transitions à forte probabilité, comme celle de "RECEPT" à "Tâche", illustrent une tendance à passer rapidement de la réception d'information à l'exécution de tâches, sans nécessairement s'engager dans des processus de consultation ou de validation extensive. Cette structure plus linéaire des transitions suggère une approche plus directe et moins délibérative de la collaboration, privilégiant l'efficacité dans l'exécution des tâches au détriment potentiel d'une exploration plus approfondie des options ou d'un consensus plus large. Ces visualisations mettent en lumière les différences qualitatives entre les deux modes de collaboration identifiés précédemment.

De plus, dans une perspective de learning analytics, ces représentations visuelles pourraient servir d'outils de feedback pour les apprenants et les enseignants, offrant une vue d'ensemble intuitive des dynamiques de groupe et facilitant la réflexion sur les processus collaboratifs. Elles ouvrent également des pistes intéressantes pour le développement d'indicateurs visuels en temps réel de la qualité de la collaboration, permettant potentiellement des interventions pédagogiques ciblées ou des ajustements automatiques de l'environnement d'apprentissage. Cependant, il est important de noter que ces visualisations, bien qu'informatives, simplifient nécessairement la complexité des interactions. Elles doivent donc être interprétées avec prudence et en conjonction avec d'autres formes d'analyse. Des recherches futures pourraient explorer des techniques de visualisation plus avancées, capables de capturer des aspects temporels plus fins ou des patterns d'interaction plus complexes, enrichissant ainsi notre compréhension des dynamiques collaboratives dans les environnements d'apprentissage numériques.

5.6 Conclusion

Pour conclure, notre étude propose une exploration novatrice des facteurs qui façonnent la collaboration dans les environnements d'apprentissage numériques. En développant une approche intégrative qui combine l'analyse des traces d'interaction et du contenu des échanges, nous avons cherché à modéliser les comportements collaboratifs à plusieurs niveaux (fréquence, relation, séquence), offrant ainsi un aperçu de la complexité des dynamiques que les groupes construisent dans leur utilisation des outils numériques. Cette méthodologie exploratoire, bien que préliminaire, ouvre des perspectives intéressantes pour saisir la richesse des interactions collaboratives. L'analyse des fréquences fournit une vue d'ensemble de la distribution des activités, servant de point de départ à une compréhension plus fine. Les réseaux de co-occurrence, en caractérisant la structure relationnelle, permettent d'identifier les processus pivots au sein des interactions. L'ajout

des chaînes de Markov apporte une dimension temporelle cruciale, révélant les séquences d'enchaînement des actions. Enfin, la visualisation de ces chaînes à travers des process maps offre une représentation synthétique des tendances principales et des relations entre actions, facilitant l'interprétation des dynamiques collaboratives.

Ces premiers résultats appellent des approfondissements. Il serait intéressant d'examiner plus systématiquement les liens entre les patterns de collaboration identifiés et l'efficacité des groupes, en croisant par exemple métriques de réseaux et mesures de performance. Une étude longitudinale permettrait également de suivre l'évolution des dynamiques au fil des sessions et d'identifier d'éventuelles trajectoires d'apprentissage. La prise en compte de facteurs contextuels comme la difficulté de la tâche ou la composition du groupe enrichirait aussi l'analyse.

Modélisation approfondie de la collaboration : comparaison inter-condition à l'aide de techniques d'apprentissage automatique

*"Éplucher des données, c'est comme
éplucher un oignon : ça finit souvent
par quelques larmes."*

Un doctorant épuisé.

6.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé une approche novatrice pour modéliser la collaboration de manière approfondie en combinant l'analyse des traces d'interaction (actions catégorisées en tâches, auto-régulation et co-régulation) et l'analyse du contenu des échanges (catégorisation manuelle des énoncés du chat en directives, partages d'informations, consultation, etc.). En appliquant successivement des techniques d'analyse de fréquence, de réseaux de co-occurrence et de chaînes de Markov, nous avons pu mettre en évidence des patterns spécifiques dans la structuration et la dynamique des activités collaboratives au sein de la condition 'chat' de notre dispositif.

L'objectif de ce dernier chapitre est d'étendre cette démarche à la condition expérimentale audio afin de permettre une comparaison systématique des processus collaboratifs selon les modalités de communication. Cette extension représente un défi méthodologique important car la classification manuelle des énoncés, bien que précise, est un processus extrêmement chronophage qui nécessite des ressources humaines considérables - dans notre cas, la classification manuelle des 3000 énoncés du chat a représenté environ 30 heures de travail. L'analyse de l'ensemble des interactions audio, plus volumineuses que celles du chat, rendrait cette approche manuelle difficilement réalisable. Pour surmonter cette limitation, nous allons tirer parti des avancées récentes dans le domaine de l'apprentissage automatique, et plus spécifiquement des techniques de traitement automatique du langage naturel (TALN). Cette approche nous permettra non seulement d'analyser effi-

cacement un volume plus important de données, mais aussi d'assurer une cohérence dans la classification entre les modalités chat et audio.

Forts de ces données enrichies, nous répliquerons trois niveaux complémentaires d'analyse : (1) l'analyse des fréquences qui permet de quantifier l'importance relative de chaque type d'activité, (2) l'analyse des réseaux de co-occurrence qui révèle les associations entre les différentes activités, et (3) l'analyse des chaînes de Markov qui capture la dynamique temporelle des interactions. Cette combinaison d'analyses, allant de la simple distribution des activités jusqu'à leur enchaînement temporel, en passant par leur structuration relationnelle, offre une perspective complète des processus collaboratifs dans chaque modalité de communication. Cette démarche méthodologique permet ainsi d'examiner la collaboration à différentes échelles : depuis les comportements individuels jusqu'aux patterns d'interaction collectifs, tout en prenant en compte leur évolution dans le temps. Cette analyse comparative approfondie nous permettra d'identifier les forces et les faiblesses spécifiques de chaque modalité dans le soutien à différents aspects de la collaboration, ouvrant ainsi la voie à des recommandations concrètes pour la conception d'environnements d'apprentissage collaboratif plus efficaces et adaptés.

6.2 Méthodologie

6.2.1 Reconnaissance et transcription vocales

Initialement, notre protocole prévoyait l'utilisation du modèle de reconnaissance vocale Whisper (OpenAI, 2022) pour la transcription automatique des échanges audio. Whisper a été choisi pour ses performances sur des corpus de parole conversationnelle en langue française et ses capacités de suppression du bruit et de différenciation des locuteurs [176]. Cependant, lors des tests préliminaires, nous avons constaté que la qualité audio de nos enregistrements était insuffisante pour obtenir des transcriptions exploitables via Whisper. Les facteurs contribuant à cette faible qualité incluaient le bruit ambiant, la mauvaise qualité des micros, les chevauchements fréquents entre locuteurs, et les variations importantes dans le volume et la clarté des voix des participants. Face à ce défi méthodologique, nous avons collaboré avec le laboratoire ICAR (Interactions, Corpus, Apprentissages, Représentations) pour assurer la qualité et la fiabilité de nos données. Le laboratoire ICAR a réalisé la transcription des données audio selon un processus en deux étapes :

1. Une transcription automatique initiale avec le modèle Whisper, fournissant une première structuration des échanges verbaux.
2. Une transcription manuelle approfondie, nécessitant environ 100 heures de travail, pour :
 - Corriger les erreurs de reconnaissance du modèle Whisper
 - Clarifier les passages ambigus (chevauchements de parole, expressions peu claires)
 - Identifier précisément les locuteurs
 - Annoter les éléments paralinguistiques pertinents

L'ampleur de ce travail de transcription explique pourquoi notre analyse se concentre uniquement sur la partie 1 des sessions en modalité audio. En effet, la transcription complète de l'ensemble des conditions expérimentales (toutes les parties des modalités audio

et vidéo) aurait nécessité plusieurs centaines d’heures supplémentaires, dépassant les ressources disponibles pour cette étude. Cette limitation, bien que contraignante, nous permet néanmoins de conduire une analyse approfondie des phases initiales de collaboration, particulièrement cruciales dans l’établissement des dynamiques d’interaction.

Cette approche hybride, combinant traitement automatique initial et expertise humaine, nous a permis d’obtenir un corpus de haute qualité pour la modalité audio, essentiel pour nos analyses comparatives. Bien que plus chronophage qu’une transcription entièrement automatisée, cette méthode garantit la fiabilité des données sur lesquelles reposent nos analyses des dynamiques collaboratives.

6.2.2 Classification automatique des énoncés

Pour classifier les énoncés issus des transcriptions selon notre schème de codage pré-établi (directif, partage d’informations, consultation...), nous avons fait appel à un modèle de type BERT. Ce choix s’appuie sur les performances remarquables de BERT dans les tâches de classification de texte et le traitement du français [177]. Sa capacité à capturer le contexte bidirectionnel et sa robustesse face aux variations linguistiques en font un choix particulièrement adapté pour notre tâche de classification d’énoncés conversationnels. Notre démarche a consisté à affiner (fine-tuner) un modèle BERT pré-entraîné sur notre jeu de données de 3000 phrases manuellement catégorisées, issues de la condition ‘chat’.

6.2.3 Réplication des analyses multi-niveaux

Une fois l’ensemble des énoncés catégorisés, nous avons répliqué la démarche d’analyse déployée dans le chapitre 5 pour les deux conditions expérimentales :

- Analyse des fréquences : calcul des occurrences et pourcentages de chaque catégorie d’énoncé et d’action, permettant de comparer leur distribution globale selon les modalités de communication.
- Analyse des réseaux de cooccurrence : construction de réseaux pondérés représentant la force des associations entre les différentes catégories, et calcul de métriques (densité, centralité...) pour caractériser la structure des activités collaboratives dans chaque condition.
- Analyse des chaînes de Markov : modélisation des probabilités de transition entre les différents états (catégories) afin d’identifier des séquences d’interaction caractéristiques et de les comparer entre les conditions.

L’enjeu était ainsi de proposer une vision intégrée et multidimensionnelle des spécificités de la collaboration selon les modalités de communication mobilisées.

Catégorie Chat	Pourcentage	Catégorie Audio	Audio
Task	29,22	VAL	18,86
co-régulation	18,70	AW	14,39
self-régulation	10,46	CONSULT	9,45
CONSULT	8,30	MONIT	8,72
AW	5,74	co-régulation	7,43
VAL	5,55	Task	6,85
MONIT	4,94	DIR	6,51
DIR	4,31	RECEPT	6,33
INFO	3,39	CLAR	6,04
CLAR	2,66	self-régulation	5,87
SOCIAL	2,54	INFO	5,75
RECEPT	1,84	SOCIAL	2,44
FEEDEXE	1,55	FEEDEXE	1,35
AW-	0,79	AW-	0,00

FIGURE 6.1 – Distribution des catégories de processus collaboratifs dans les modalités Chat et Audio

6.3 Analyse inter-groupes : comparaison globale des modalités

6.3.1 Analyse comparative des fréquences

L'analyse des fréquences d'apparition des différentes catégories de processus collaboratifs révèle des patterns d'interaction distincts entre les modalités chat et audio. Le Tableau 6.1 présente une comparaison croisée des catégories dominantes pour chaque modalité, montrant leur importance relative dans les deux contextes de communication. Pour chaque modalité, nous présentons les trois catégories les plus fréquentes et leur pourcentage d'occurrence, ainsi que leur fréquence dans l'autre modalité pour permettre une comparaison directe.

TABLEAU 6.1 – Comparaison des catégories les plus fréquentes entre les modalités chat et audio. Le tableau se lit en deux parties : à gauche, les catégories dominantes de la modalité chat avec leurs pourcentages dans les deux modalités ; à droite, les catégories dominantes de la modalité audio avec leurs pourcentages respectifs.

Modalité Chat			Modalité Audio		
Catégorie	Chat (%)	Audio (%)	Catégorie	Audio (%)	Chat (%)
Tâche	29,22	6,85	VAL	18,86	5,55
Co-régulation	18,70	7,43	AW	14,39	5,74
auto-régulation	10,46	5,87	CONSULT	9,45	8,30

Dans la modalité chat, trois catégories représentent 58,38% des interactions totales. La catégorie Tâche constitue 29,22% des interactions, suivie par la co-régulation (18,70%) et la auto-régulation (10,46%). Ces mêmes catégories dans la modalité audio représentent respectivement 6,85%, 7,43% et 5,87% des interactions, soit un total de 20,15%. La modalité audio présente une distribution différente, avec trois catégories dominantes totalisant 42,70% des interactions : VAL (18,86%), AW (14,39%) et CONSULT (9,45%). En comparaison, ces catégories dans la modalité chat représentent respectivement 5,55%, 5,74%

et 8,30% des interactions, soit un total de 19,59%. L'analyse de la distribution globale des catégories révèle une différence notable dans la diversité des processus collaboratifs entre les deux modalités. En considérant un seuil de significativité de 5% des interactions totales, la modalité chat présente une structure plus concentrée avec seulement 6 catégories dépassant ce seuil. En revanche, la modalité audio montre une distribution plus diversifiée, avec 11 catégories dépassant ce même seuil, suggérant une plus grande variété dans les types d'interactions mobilisés. Les écarts les plus importants entre les deux modalités s'observent pour les catégories Tâche (différence de 22,37 points), VAL (différence de 13,31 points) et AW (différence de 8,65 points).

Comparaison du volume des interactions par modalité

Au-delà de la distribution des catégories d'interaction, il est crucial d'examiner le volume et la répartition des actions et des échanges communicatifs dans chaque modalité. Cette analyse complémentaire offre un éclairage supplémentaire sur la dynamique collaborative et les patterns d'utilisation des différentes modalités de communication. Dans la modalité chat, on observe une moyenne de 263 actions par partie (tableau 6.2), représentant 58,38% de l'ensemble des interactions. Ces actions englobent les catégories Tâche, co-régulation et auto-régulation. En parallèle, la moyenne des messages envoyés (englobant les autres catégories de discussion) s'élève à 188 par partie, soit 41,62% des interactions totales. En revanche, la modalité audio présente un profil d'interaction différent. On y observe une moyenne de 192 actions par partie, ne représentant que 20,15% des interactions totales. Cependant, le volume des échanges audio est nettement plus élevé, avec une moyenne de 760 interactions vocales par partie, constituant 79,85% de l'ensemble des interactions. Cette prépondérance marquée des échanges vocaux par rapport aux actions concrètes dans l'environnement révèle une dynamique collaborative distincte dans la modalité audio.

Le Tableau 6.2 résume ces données pour une comparaison directe.

TABLEAU 6.2 – Comparaison du volume et de la répartition des actions et des échanges communicatifs entre les modalités chat et audio

	Modalité Chat		Modalité Audio	
	Moyenne	Pourcentage	Moyenne	Pourcentage
Actions	263	58,38%	192	20,15%
Échanges communicatifs	188	41,62%	760	79,85%

6.3.2 Analyse comparative des réseaux de co-occurrence

L'analyse des réseaux de co-occurrence nous permet d'examiner la structure relationnelle des activités collaboratives au sein des modalités chat et audio. Cette approche révèle des patterns d'interaction distincts, complétant les observations issues de l'analyse de fréquence. Pour affiner notre analyse, nous avons appliqué un seuil de significativité de 0,16 sur les liens de co-occurrence, ne conservant ainsi que les associations qui se produisent dans plus de 16% des cas, ce qui permet d'identifier les patterns d'interaction

TABLEAU 6.3 – Métriques des réseaux de co-occurrence en fonction de la modalité (Chat et Audio)

Metric	Value Chat	Value Audio
Number of Nodes	14	13
Number of Edges (Filtered)	48	75
Number of Edges (Total)	90	78
Top Degree Centrality 1	co-régulation: 0.9231	VAL: 1.0000
Top Degree Centrality 2	AW: 0.9231	MONIT: 1.0000
Top Degree Centrality 3	Task: 0.8462	CONSULT: 1.0000
Top Degree Centrality 4	CONSULT: 0.7692	AW: 1.0000
Top Degree Centrality 5	VAL: 0.6923	RECEPT: 1.0000
Top Betweenness Centrality	AW: 0.2278	VAL: 0.0051
Top Betweenness Centrality	co-régulation: 0.1509	MONIT: 0.0051
Top Betweenness Centrality	Task: 0.1162	CONSULT: 0.0051
Top Betweenness Centrality	CONSULT: 0.0376	AW: 0.0051
Top Betweenness Centrality	VAL: 0.0222	RECEPT: 0.0051

les plus récurrents. Le tableau 6.4 présente les principales métriques des réseaux de co-occurrence pour chaque modalité, et le tableau 6.3 le tableau complet. Pour déterminer le seuil de significativité des co-occurrences, nous avons adopté une approche empirique basée sur la lisibilité visuelle des réseaux (visual readability threshold). Bien que des méthodes statistiques traditionnelles existent pour définir de tels seuils, nous avons privilégié une approche itérative visant à optimiser la lisibilité et la pertinence des visualisations. Après plusieurs itérations, le seuil de 0,16 s'est révélé optimal pour mettre en évidence les patterns d'interaction significatifs tout en maintenant une représentation claire et interprétable des réseaux. Cette approche, bien que subjective, est couramment utilisée dans l'analyse exploratoire des réseaux sociaux où l'interprétabilité des visualisations est primordiale [178].

TABLEAU 6.4 – Métriques résumé des réseaux de co-occurrence pour les modalités chat et audio. Le nombre de liens filtrés correspond aux co-occurrences dépassant le seuil de significativité de 0,16.

Métrique	Chat	Audio
Nombre de nœuds	14	13
Nombre de liens (filtrés)	48	75
Nombre de liens (total)	90	78
Densité du réseau	0,49	0,54

L'examen de ces données révèle des différences dans la structure des réseaux entre les deux modalités. La modalité audio présente un réseau avec une densité de 0,54, tandis que la modalité chat montre une densité de 0,49. Le nombre de liens filtrés représente les connexions dont la force dépasse un seuil de 0,16, permettant de se concentrer sur les associations les plus significatives. Le ratio entre les liens filtrés et le nombre total de liens (53,33% pour le chat et 96,15% pour l'audio) souligne une différence marquée dans la distribution de la force des connexions entre les deux modalités, avec une proportion nettement plus élevée de liens forts dans la modalité audio. En ce qui concerne la centralité de degré, qui mesure l'importance d'un nœud dans le réseau, nous observons des

différences, d'après le tableau 6.3 :

L'analyse de la centralité de degré, qui mesure la proportion de connexions directes qu'un nœud entretient avec les autres nœuds du réseau (normalisée par le nombre maximum possible de connexions), révèle des distributions différentes entre les deux modalités :

- Dans la modalité chat, nous observons une distribution hiérarchique des centralités. Les catégories "co-régulation" et "AW" présentent la centralité la plus élevée (0,9231), suivies par "Tâche" (0,8462), "CONSULT" (0,7692), et "VAL" (0,6923).
- Pour la modalité audio, les cinq premières catégories (VAL, MONIT, CONSULT, AW, RECEPT) présentent une centralité de degré identique de 1,0000.

Les résultats de l'analyse de la centralité d'intermédiarité, qui quantifie la fréquence avec laquelle un nœud se trouve sur les plus courts chemins entre toutes les autres paires de nœuds du réseau, montrent également des variations entre les deux modalités :

- Dans la modalité chat, trois catégories se distinguent par leur centralité d'intermédiarité : "AW" (0,2278), "co-régulation" (0,1509), et "Tâche" (0,1162). Les autres catégories présentent des valeurs inférieures à 0,1000.
- Dans la modalité audio, toutes les catégories principales affichent une centralité d'intermédiarité identique de 0,0051.

Le tableau 6.4 synthétise les principales métriques des réseaux de co-occurrence pour les deux modalités, incluant le nombre de nœuds (modalité chat : 14, modalité audio : 13), le nombre de liens filtrés (modalité chat : 48, modalité audio : 75), et la densité du réseau (modalité chat : 0,49, modalité audio : 0,54)."

Précisions sur les métriques de la modalité Audio

Les valeurs obtenues pour la modalité audio reflètent une configuration spécifique de la structure du réseau. Dans un réseau de 13 nœuds, la centralité de degré est calculée comme le ratio entre le nombre de connexions directes d'un nœud et le nombre maximum possible de connexions ($n-1$, soit 12 dans notre cas). Une centralité de degré de 1.0000 pour les cinq premières catégories indique que chacune de ces catégories est connectée à l'ensemble des autres nœuds du réseau, atteignant ainsi le maximum théorique de connections possibles. La centralité d'intermédiarité, quant à elle, mesure la fréquence avec laquelle un nœud se trouve sur le plus court chemin entre deux autres nœuds. Dans notre cas, la valeur uniforme et très faible de 0.0051 s'explique par la topologie particulière du réseau : comme chaque nœud est directement connecté à tous les autres, aucun nœud n'est nécessaire comme intermédiaire pour établir un chemin entre deux autres nœuds. Cette valeur spécifique résulte de la normalisation appliquée dans le calcul de la centralité d'intermédiarité, où la somme est divisée par $((n-1)(n-2)/2)$ pour un réseau non dirigé, n étant le nombre de nœuds. Dans un réseau complètement connecté, chaque nœud apparaît dans une proportion égale et minimale des plus courts chemins, d'où cette valeur normalisée uniforme. Cette configuration mathématique correspond à ce qu'on appelle un graphe complet ou presque complet, où la distance géodésique (le plus court chemin) entre n'importe quelle paire de nœuds est toujours de 1, traduisant une connexion directe.

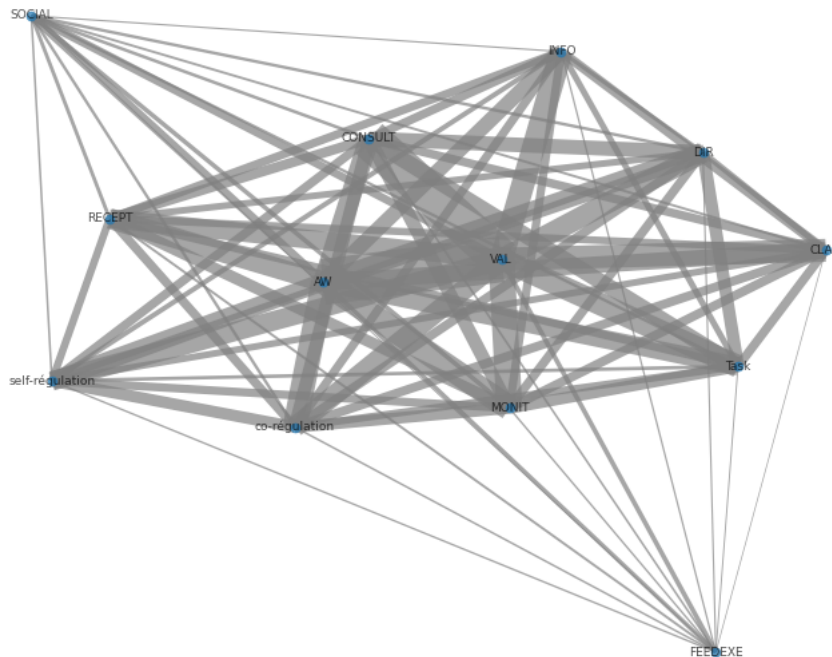


FIGURE 6.2 – Représentation graphique du réseau de co-occurrence regroupant l'ensemble des groupes pour la modalité Audio

6.3.3 Analyse des transitions temporelles entre activités avec les chaînes de Markov

L'analyse des chaînes de Markov nous permet d'examiner la dynamique temporelle des interactions collaboratives, en modélisant les probabilités de transition entre différentes catégories d'activités. Cette approche offre un éclairage complémentaire sur les patterns comportementaux identifiés précédemment dans les modalités chat et audio. Le Tableau 6.5 présente les statistiques des probabilités de transition pour chaque modalité :

TABLEAU 6.5 – Statistiques des probabilités de transition par groupe

Groupe	Probabilité moyenne	Écart-type
Chat	0,084	0,074
Audio	0,083	0,053

L'analyse comparative des chaînes de Markov entre les modalités révèle plusieurs caractéristiques. Les probabilités moyennes de transition présentent des valeurs similaires : 0,084 pour la modalité chat et 0,083 pour la modalité audio. Les écarts-types de ces probabilités de transition diffèrent entre les deux modalités : la modalité chat présente un écart-type de 0,074, tandis que la modalité audio affiche un écart-type de 0,053.

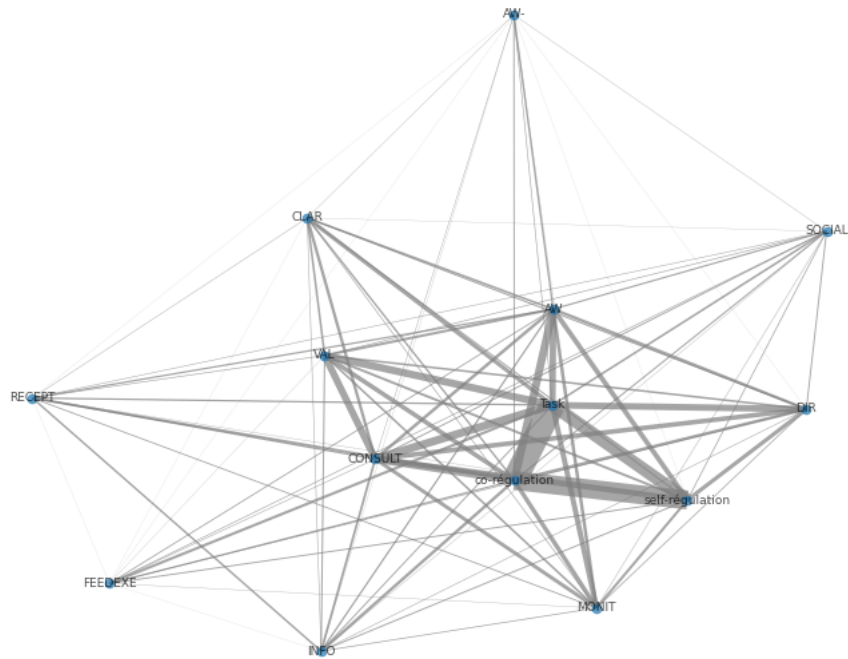


FIGURE 6.3 – Représentation graphique du réseau de co-occurrence regroupant l'ensemble des groupes pour la modalité Chat

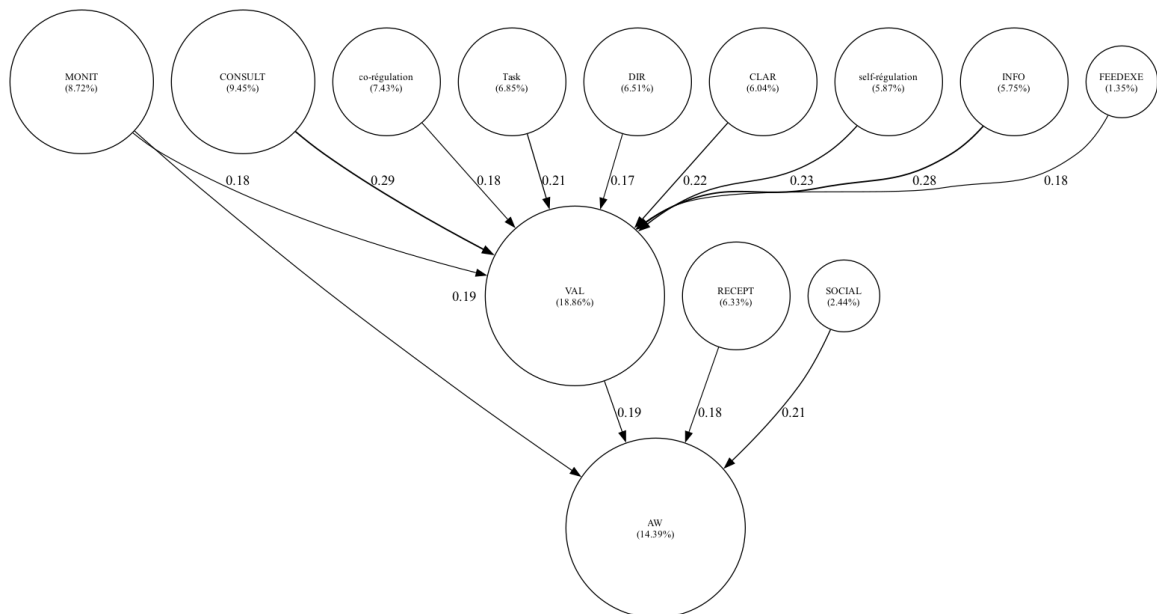


FIGURE 6.4 – Process Map des dynamiques de transition modélisées par les chaînes de Markov pour la modalité Chat

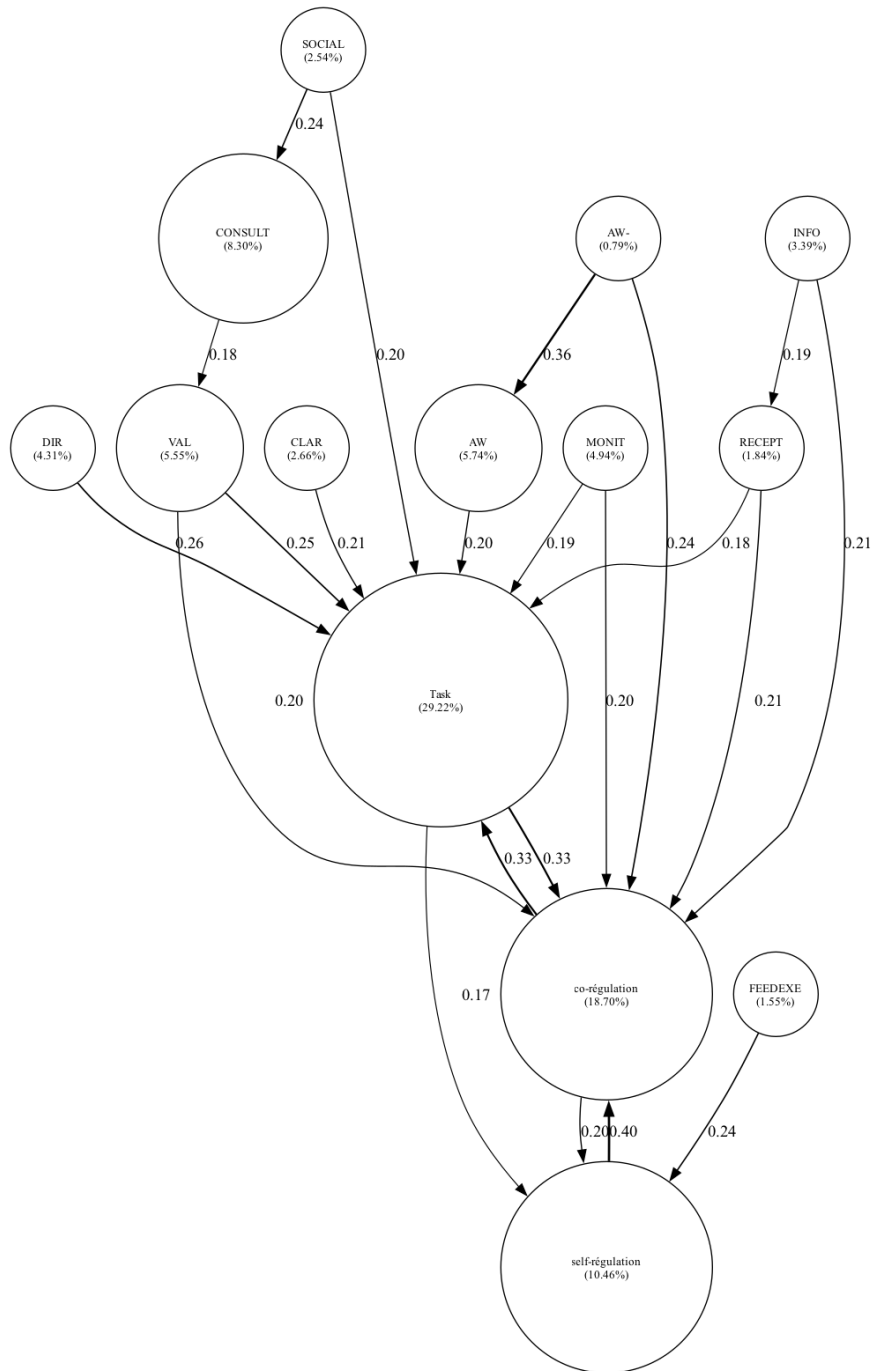


FIGURE 6.5 – Process Map des dynamiques de transition modélisées par les chaînes de Markov pour la modalité Audio

6.3.4 Modélisation visuelle des dynamiques collaboratives

Réseaux de co-occurrence

Les visualisations des réseaux de co-occurrence pour les modalités chat et audio (Figures 6.2 et 6.3 respectivement) offrent une représentation graphique agrégée des dynamiques collaboratives. Contrairement au chapitre précédent qui présentait les réseaux individuels par groupe, ces visualisations synthétisent les données de l'ensemble des groupes pour chaque modalité (7 groupes pour le chat et 8 groupes pour l'audio), permettant ainsi une comparaison globale des patterns d'interaction.

La Figure 6.2 représente le réseau de co-occurrence de la modalité chat. La visualisation montre une distribution spatiale des nœuds où les catégories "Tâche", "co-régulation" et "auto-régulation" occupent des positions centrales dans le graphe. Les liens entre ces nœuds présentent des épaisseurs variables, avec des connections plus marquées entre ces trois catégories centrales. Le graphe fait apparaître des zones de densité différentes, avec des groupes de nœuds plus fortement connectés entre eux. La Figure 6.3 présente le réseau de co-occurrence de la modalité audio. La distribution spatiale des nœuds est caractérisée par une distance plus uniforme entre les catégories. Les liens entre les nœuds montrent des épaisseurs plus homogènes. La visualisation fait apparaître une répartition régulière des connections à travers l'ensemble du réseau, avec une densité de liens plus importante que dans le réseau de la modalité chat.

Cartes de processus (Process Maps)

Les Figures 6.4 et 6.5 présentent les process maps issues de l'analyse des chaînes de Markov pour les modalités chat et audio, avec un seuil de probabilité de transition fixé à 0,16.

La process map de la modalité chat (Figure 6.4) montre une organisation centrée autour de la catégorie "Tâche" (29,22%). Les données révèlent des transitions bidirectionnelles entre "Tâche" et "co-régulation" avec des probabilités de 0,33 dans les deux sens. "Co-régulation" (18,70%) et "auto-régulation" (10,46%) présentent également des connexions directes avec "Tâche", formant une structure triangulaire dans le graphe.

La process map de la modalité audio (Figure 6.5) s'organise autour de la catégorie "VAL" (18,86%). L'analyse quantitative des transitions montre que "VAL" reçoit des connexions entrantes de multiples catégories, avec des probabilités variant de 0,18 à 0,24. Les données indiquent également que la catégorie "AW" (14,39%) est connectée à "VAL" et "MONIT" avec des probabilités respectives de 0,20 et 0,19.

L'analyse comparative des deux process maps met en évidence plusieurs différences structurelles :

1. Structure des transitions :
 - Chat : transitions bidirectionnelles Tâche ↔ co-régulation ($p = 0,33$)
 - Audio : transitions multiples vers VAL ($0,18 \leq p \leq 0,24$)
2. Organisation des séquences :
 - Chat : CONSULT → VAL → Tâche ($p = 0,21 ; 0,23$)
 - Audio : CONSULT → VAL ($p = 0,24$)
3. Connectivité des catégories sociales :

- Chat : "SOCIAL" avec 2 connexions ($p_{moyen} = 0,17$)
- Audio : "SOCIAL" avec 4 connexions ($p_{moyen} = 0,22$)

6.4 Discussion

6.4.1 Analyse de fréquence

Les résultats de l'analyse de fréquence révèlent des différences significatives dans la distribution des catégories d'interaction entre les modalités chat et audio, suggérant que le choix du canal de communication influence profondément la nature et la structure des interactions collaboratives.

Dans la modalité chat, nous observons une prédominance marquée des catégories "Tâche", "co-régulation" et "auto-régulation". Cette distribution suggère une approche plus structurée et orientée vers la tâche dans les interactions. La forte présence de la catégorie "Tâche" fait écho aux résultats du chapitre 3, où nous avons déjà noté une tendance des participants à se concentrer davantage sur l'exécution des tâches dans les environnements textuels. Cette orientation vers la tâche pourrait s'expliquer par la nature asynchrone et permanente du chat, qui permet aux participants de se référer constamment aux instructions et aux contributions précédentes, favorisant ainsi une approche plus méthodique et focalisée [14].

La proportion élevée d'actions liés à la co-régulation et à l'auto-régulation dans le chat souligne l'importance des processus métacognitifs dans cette modalité. Ce résultat corrobore les travaux de Järvelä et al. (2016) [15] sur l'importance de la régulation dans les environnements d'apprentissage collaboratif assisté par ordinateur (CSCL). La nécessité accrue de coordination dans un environnement textuel pourrait expliquer cette prévalence des processus de régulation.

En revanche, la modalité audio présente un profil d'interaction différent, avec une prédominance des catégories "Validation", "Awareness" et "Consultation". Cette distribution plus équilibrée, avec 11 indicateurs dépassant le seuil de 5% (contre 6 pour le chat), suggère des interactions plus variées et potentiellement plus riches dans la modalité audio. La prépondérance des activités de validation et de partage d'awareness dans les échanges vocaux fait écho aux travaux de Clark et Brennan (1991) [43] sur l'importance du "grounding" dans la communication. La richesse des indices paralinguistiques offerts par l'audio (intonation, rythme, etc.) pourrait faciliter ce processus de construction d'un terrain commun, expliquant ainsi la fréquence élevée des activités de validation et de consultation. De plus, la communication orale étant plus rapide que la saisie de texte, les participants en modalité audio disposent de plus de temps pour échanger et valider leur compréhension mutuelle, ce qui pourrait expliquer cette distribution plus variée des catégories d'interaction. Cette efficacité temporelle de la communication orale permet aux participants de maintenir un flux d'échanges plus soutenu tout en conservant du temps pour les activités principales de collaboration.

L'analyse comparative du volume d'interactions entre les modalités a révélé une différence marquante. Les données montrent une nette prédominance des échanges dans la modalité audio par rapport aux messages textuels, avec un volume d'interactions vocales significativement plus élevé. Cette observation s'inscrit dans la lignée des travaux de Kraut et Kiesler. (2003) [179] sur la richesse médiatique, qui suggèrent que les médias plus

riches, comme l'audio, sont propices à une communication plus fluide et spontanée. Cette différence de volume prend une dimension particulièrement significative dans le contexte spécifique d'un jeu chronométré, où la gestion du temps constitue un enjeu crucial. En effet, la modalité chat impose une contrainte cognitive supplémentaire aux participants, qui doivent constamment arbitrer entre le temps dédié à la rédaction de messages et celui consacré aux actions de jeu. En revanche, la modalité audio offre une fluidité naturelle permettant aux participants de maintenir leurs actions tout en communiquant, éliminant ainsi ce compromis temporel. Cette capacité à superposer communication et action représente un avantage notable de la modalité audio dans des contextes où la pression temporelle est importante.

6.4.2 Analyse des réseaux de co-occurrence

L'analyse des réseaux de co-occurrence révèle des patterns structurels distincts entre les modalités chat et audio. Dans la modalité audio, les connexions entre catégories d'activités sont significativement plus nombreuses et plus denses que dans la modalité chat. Concrètement, lorsqu'une activité se produit dans la modalité audio, elle est plus susceptible d'être accompagnée par d'autres types d'activités, créant un tissu d'interactions plus riche et interconnecté. Ce résultat fait écho aux travaux de Suthers et al. (2010) [32] sur l'importance de la cohésion dans les interactions collaboratives et souligne le potentiel de la communication audio pour favoriser des transitions plus naturelles entre différents types d'activités. L'étude de la force des associations entre catégories renforce cette observation. La modalité audio montre des co-occurrences non seulement plus nombreuses, mais aussi plus systématiques : lorsque deux catégories sont associées, elles tendent à apparaître ensemble de manière récurrente plutôt qu'occasionnelle. Cette régularité des associations dans la modalité audio contraste avec le caractère plus sporadique des co-occurrences dans le chat. Cette observation s'aligne avec les travaux de Järvelä et al. (2016) [15] sur l'importance de la cohésion des interactions pour une régulation efficace de l'apprentissage collaboratif. L'analyse de la centralité de degré révèle également des structures d'interaction distinctes entre les deux modalités. Dans la modalité chat, les catégories "co-régulation" et "Tâche" émergent comme des points centraux du réseau, jouant un double rôle : elles sont non seulement dominantes en termes de fréquence, mais servent également de points d'articulation structurels dans le réseau d'interactions. La catégorie "auto-régulation", malgré sa présence notable, montre une centralité plus faible, ce qui s'explique par sa nature plus individuelle et moins collaborative. Cette organisation hiérarchisée des interactions dans le chat semble compenser l'absence d'indices non verbaux dans la communication textuelle, comme le suggèrent les travaux de Walther (1996) [139].

En revanche, la modalité audio présente un profil différent. La distribution uniforme de la centralité de degré indique une structure d'interaction plus homogène, où la position structurelle des catégories dans le réseau ne reflète pas nécessairement leur fréquence d'apparition. Cette configuration fait écho aux travaux de Dillenbourg et Fischer (2007) [180] sur l'importance de la flexibilité dans les scripts collaboratifs et suggère que la modalité audio favorise une collaboration plus adaptative. Cette distinction est renforcée par l'analyse de la centralité d'intermédiarité. Dans le chat, les catégories "Tâche", "co-régulation" et "AW" émergent comme des points de passage importants, jouant un rôle de "pont" dans le réseau. Cette structure de "pivots" pourrait représenter une adaptation collective aux

contraintes du médium textuel, où certains types d'interactions servent à coordonner la collaboration. En revanche, la faible et uniforme centralité d'intermédiation dans la modalité audio indique une structure de réseau plus distribuée, où aucune catégorie ne joue un rôle prédominant de médiation. Cette configuration hautement interconnectée fait écho aux travaux de Stahl (2006) [30] sur la nature émergente et distribuée de la cognition de groupe dans les environnements CSCL. Ces résultats soulignent l'importance de la modalité de communication dans la structuration des activités collaboratives. Les données suggèrent que la modalité audio, caractérisée par un nombre plus élevé de co-occurrences entre catégories d'activités et une plus forte proportion de liens récurrents, serait particulièrement adaptée pour des tâches nécessitant des transitions fréquentes entre différents types d'activités. À l'inverse, la modalité chat, avec sa densité plus faible et sa proportion plus importante de liens non systématiques, pourrait être plus appropriée pour des tâches où certaines séquences d'activités doivent être isolées et clairement identifiables. Ces caractéristiques devraient être prises en compte dans la conception d'environnements d'apprentissage selon la nature des tâches collaboratives visées. Il est important de noter que la structure des interactions dans la modalité audio, caractérisée par une centralité d'intermédiation uniformément faible pour toutes les catégories, présente des implications spécifiques. Cette uniformité indique qu'aucune catégorie ne joue un rôle prépondérant dans la médiation des transitions entre activités, contrairement à la modalité chat où certaines catégories comme 'AW' et 'co-régulation' servent de transitions privilégiées. Cette absence de catégories médiatrices dominantes dans la modalité audio pourrait compliquer le suivi et la coordination explicite des activités collaboratives. Cela souligne l'importance de fournir des outils de support adaptés à chaque modalité pour optimiser la collaboration.

6.4.3 Analyse des chaînes de Markov

Les résultats de l'analyse de Markov révèlent des similitudes et des différences légères entre les modalités chat et audio. La quasi-identité des probabilités moyennes de transition (0,084 pour le chat et 0,083 pour l'audio) suggère que, globalement, la prévisibilité des enchaînements d'actions est comparable entre les deux modalités. Ce constat est intéressant car il nuance les différences observées dans les analyses précédentes, indiquant que malgré des structures relationnelles distinctes, les deux modalités présentent un degré similaire de "prévisibilité" dans les transitions entre activités. Cependant, l'écart-type des probabilités de transition révèle une différence notable pour le chat et l'audio. Cette variabilité plus élevée dans la modalité chat suggère une plus grande hétérogénéité dans les patterns de transition. Ce résultat fait écho aux travaux de Reimann (2009) [34] sur l'analyse des processus dans les CSCL, qui souligne l'importance de considérer non seulement les tendances centrales mais aussi la variabilité des interactions.

Dans la modalité audio, l'écart-type des probabilités de transition est plus faible que dans la modalité chat. Cette différence de variabilité indique que les transitions entre catégories d'activités suivent des patterns plus réguliers et prédictibles dans la modalité audio. Ce résultat s'aligne avec les travaux de Järvelä et al. (2016) [15] sur l'importance de la synchronicité pour une régulation efficace de l'apprentissage collaboratif.

6.4.4 Modélisation visuelle des dynamiques collaboratives

Les visualisations des réseaux de co-occurrence (Figures 6.2 et 6.3) mettent en évidence les différences structurelles entre les modalités chat et audio. La visualisation du réseau de co-occurrence pour la modalité chat révèle une structure où certains nœuds, notamment ceux représentant les catégories 'Tâche', 'co-régulation' et 'auto-régulation', apparaissent plus proéminents avec un nombre plus important de connexions. La représentation graphique montre également des zones de connectivité variable, où certains groupes de nœuds sont plus fortement interconnectés que d'autres. Cette configuration hautement interconnectée fait écho aux travaux de Dourish et Bellotti [181] sur la nature émergente de la conscience mutuelle dans les environnements collaboratifs synchrones, où l'absence de hiérarchie structurelle favorise une distribution plus équilibrée des interactions. En contraste, la visualisation du réseau de co-occurrence pour la modalité audio montre une structure où la quasi-totalité des nœuds sont interconnectés par des liens d'épaisseur similaire. Cette représentation visuelle, où les catégories d'activités apparaissent fortement connectées entre elles de manière uniforme, s'aligne avec les théories de la présence sociale [28] et de la richesse des médias [27], qui postulent que les médias plus riches permettent une plus grande diversité d'interactions simultanées. La visualisation met en évidence cette multiplicité des connexions entre les différentes catégories d'activités dans la modalité audio. Les cartes de processus (Figures 6.4 et 6.5) apportent une dimension temporelle cruciale à notre analyse, révélant des patterns séquentiels distincts entre les modalités. La structure centrée autour de la catégorie "Tâche" dans la modalité chat, avec des transitions fortes vers et depuis "co-régulation" et "auto-régulation", illustre visuellement le rôle pivot de ces processus dans la structuration des interactions textuelles. Ce pattern fait écho aux travaux de Järvelä et al. [134] sur l'importance des processus de régulation dans les environnements d'apprentissage collaboratif. La carte de processus de la modalité audio, centrée autour de la catégorie "VAL" (validation), avec de nombreuses transitions entrantes, illustre le rôle central de la validation dans les interactions vocales. Plusieurs observations clés émergent de la comparaison de ces visualisations :

- Centralité et flux d'activités : La différence de centralité entre 'Tâche' (chat) et 'VAL' (audio) illustre visuellement les différentes approches de la collaboration dans chaque modalité. Cette observation est renforcée par nos analyses de fréquence précédentes, où nous avons constaté une prédominance de la catégorie 'Tâche' dans le chat et de la catégorie 'VAL' dans l'audio. La visualisation reflète cette distribution à travers la taille des nœuds, proportionnelle à leur fréquence d'apparition, tout en révélant leur position structurelle dans le réseau d'interactions. Cette double lecture - fréquentielle et structurelle - confirme que le chat favorise une approche plus orientée vers la tâche, tandis que l'audio privilégie la construction d'un consensus. Cette convergence entre position centrale dans le réseau et fréquence élevée d'apparition suggère que ces caractéristiques ne sont pas simplement des artefacts de la modalité, mais reflètent des stratégies collaboratives distinctes adaptées aux affordances de chaque médium.
- Cycles d'interaction : Les cycles clairs observés dans la modalité chat, notamment entre "Tâche", "co-régulation", et "auto-régulation", contrastent avec les transitions plus dispersées de la modalité audio. Cette différence visuelle renforce notre interprétation d'une collaboration plus structurée dans le chat et plus fluide dans l'audio.
- Rôle de l'awareness : La position plus centrale de "AW" (awareness) dans la modalité

audio, avec ses connexions à "VAL" et "SOCIAL", illustre visuellement l'importance accrue de la conscience mutuelle dans les interactions vocales. Ce résultat s'aligne avec les travaux de Dourish et Bellotti [181] sur le rôle de l'awareness dans la collaboration médiatisée.

- Séquences de communication : Les séquences plus structurées dans le chat (par exemple, "CONSULT" → "VAL" → "Tâche") contrastent avec les transitions plus variées de l'audio, illustrant visuellement les différences dans les processus de prise de décision entre les modalités.
- Intégration des aspects sociaux : La position plus centrale et mieux connectée de "SOCIAL" dans la modalité audio illustre visuellement une meilleure intégration des aspects sociaux dans le flux de travail vocal, faisant écho aux théories de la présence sociale [28].

Ces visualisations renforcent notre compréhension des dynamiques collaboratives propres à chaque modalité, en offrant une représentation intuitive des résultats quantitatifs. Elles soulignent l'importance de considérer non seulement la fréquence des interactions, mais aussi leur structure relationnelle et leur séquence temporelle dans la conception d'environnements d'apprentissage collaboratif.

6.5 Analyse intra-groupes : étude détaillée des dynamiques collaboratives

Après avoir réalisé une comparaison inter-modalité entre le chat et l'audio, nous proposons maintenant d'approfondir notre analyse en examinant les dynamiques intra-groupe pour ces deux modalités. Cette approche s'inscrit dans la continuité de notre démarche méthodologique, visant à offrir une compréhension plus fine et nuancée des processus collaboratifs dans les environnements d'apprentissage médiatisés.

Il est important de noter que notre analyse se concentrera exclusivement sur la partie 1 de chaque session pour tous les groupes. Cette limitation est due aux défis techniques rencontrés lors de la transcription des échanges audio, comme expliqué dans la section méthodologie. Malgré les efforts du laboratoire ICAR pour la transcription manuelle, seule la partie 1 des sessions audio a pu être traitée de manière exhaustive et fiable. Bien que cette restriction puisse sembler limitative, elle offre néanmoins une opportunité unique d'examiner en détail les phases initiales de la collaboration, qui sont souvent cruciales pour établir les dynamiques d'interaction.

En appliquant les mêmes techniques d'analyse (fréquence, réseaux de co-occurrence, et chaînes de Markov) à ces nouvelles données, nous visons à construire une compréhension plus nuancée et comparative des processus collaboratifs initiaux dans les environnements d'apprentissage médiatisés. Cette approche, bien que limitée à la partie 1, nous permettra non seulement d'enrichir notre compréhension théorique des dynamiques de collaboration multimodales, mais aussi de dégager des implications pratiques pour la conception d'interfaces collaboratives plus efficaces et adaptées aux différentes modalités de communication, particulièrement dans les phases critiques de démarrage d'une collaboration.

6.5.1 Analyse de fréquence intra-modalité

Modalité Chat

L'analyse des fréquences d'apparition des différentes catégories de processus collaboratifs dans la modalité chat révèle des patterns d'interaction distincts entre les groupes étudiés. Nous nous concentrerons sur les catégories les plus fréquentes, notamment "Tâche", "Co-régulation", "Consultation" et "auto-régulation".

TABLEAU 6.6 – Distribution des catégories les plus fréquentes pour la modalité chat

Groupe	Tâche	Co-régulation	Consultation	auto-régulation	Indicateurs > 5%
G1	21,40%	13,85%	12,41%	8,63%	8
G2	20,88%	16,67%	11,17%	9,52%	7
G3	29,05%	11,36%	8,75%	9,31%	7
G4	27,23%	28,32%	7,63%	12,20%	4
G6	40,21%	26,46%	3,09%	18,21%	3
G7	44,92%	28,00%	0,62%	12,92%	4
G8	32,88%	14,29%	8,84%	6,58%	6

TABLEAU 6.7 – Distribution des catégories les plus fréquentes pour la modalité audio

Groupe	Validation	Awareness	Tâche	Co-régulation	Indicateurs > 5%
A1	16,89%	16,00%	10,67%	8,67%	8
A2	18,19%	15,59%	6,03%	7,07%	11
A3	16,40%	15,73%	7,20%	7,47%	9
A4	18,52%	13,25%	7,80%	8,74%	9
A5	23,66%	15,88%	4,40%	5,58%	8
A6	19,12%	16,64%	8,32%	4,16%	8
A7	19,27%	14,12%	5,63%	7,10%	11
A8	16,10%	9,96%	8,01%	10,68%	10

L'analyse des fréquences d'apparition des catégories dans la modalité chat révèle une distribution des interactions entre les sept groupes étudiés. Le Tableau 6.6 présente la répartition des quatre catégories principales : Tâche, Co-régulation, Consultation et auto-régulation, ainsi que le nombre d'indicateurs dépassant le seuil de 5% pour chaque groupe. La catégorie Tâche présente une variation importante entre les groupes, avec des valeurs s'échelonnant de 20,88% (G2) à 44,92% (G7). La Co-régulation montre également des variations substantielles, allant de 11,36% (G3) à 28,32% (G4). La Consultation varie de 0,62% (G7) à 12,41% (G1), tandis que la auto-régulation s'étend de 6,58% (G8) à 18,21% (G6). L'analyse révèle une variation dans le nombre d'indicateurs dépassant le seuil de 5%. Les groupes G1, G2, G3 et G8 présentent entre 6 et 8 indicateurs, tandis que les groupes G4, G6 et G7 en comptent entre 3 et 4. Les données montrent une distinction dans la distribution des catégories. Les groupes G1, G2, G3, G4 et G8 présentent une répartition où la catégorie Tâche occupe entre 20,88% et 32,88% des interactions. En contraste, les groupes G6 et G7 montrent une proportion plus élevée de la catégorie Tâche (40,21% et 44,92% respectivement) et une proportion plus faible de Consultation (3,09% et 0,62%

respectivement). Le groupe G4 présente des caractéristiques particulières avec 27,23% de Tâche et 28,32% de Co-régulation, le plaçant à l'interface des deux patterns de distribution observés.

Modalité Audio

L'analyse des fréquences des catégories dans la modalité audio est présentée dans le Tableau 6.7, montrant la distribution des quatre catégories principales (VAL, AW, Tâche, Co-régulation) pour les huit groupes étudiés. La catégorie VAL présente des valeurs comprises entre 16,10% (A8) et 23,66% (A5). La catégorie AW affiche des proportions allant de 9,96% (A8) à 16,64% (A6). Les catégories Tâche et Co-régulation montrent des proportions plus faibles. Tâche varie de 4,40% (A5) à 10,67% (A1), tandis que la Co-régulation s'étend de 4,16% (A6) à 10,68% (A8). Le nombre d'indicateurs dépassant le seuil de 5% varie de 8 à 11 selon les groupes. Les groupes A2 et A7 présentent le plus grand nombre d'indicateurs (11), suivis par A8 (10), puis A3 et A4 (9). Les groupes A1, A5 et A6 comptabilisent 8 indicateurs. Les distributions observées dans la modalité audio diffèrent quantitativement de celles de la modalité chat présentées précédemment, notamment en termes de proportion des catégories dominantes et du nombre d'indicateurs dépassant le seuil de 5%.

6.5.2 Analyse des réseaux de co-occurrence

L'analyse des réseaux de co-occurrence nous permet d'examiner la structure relationnelle des activités collaboratives au sein des groupes pour chaque modalité. Cette approche révèle des patterns d'interaction distincts, complétant les observations issues de l'analyse de fréquence.

Modalité Chat

TABLEAU 6.8 – Densité des réseaux de co-occurrence pour la modalité chat

Groupe	Densité
G1	0,81
G2	0,82
G3	0,78
G4	0,63
G6	0,42
G7	0,33
G8	0,71

Le Tableau 6.8 présente les densités des réseaux de co-occurrence calculées pour les sept groupes de la modalité chat. Les valeurs de densité s'échelonnent de 0,33 à 0,82, avec une moyenne de 0,64 et un écart-type de 0,19.

Les groupes G1 et G2 présentent les densités les plus élevées (0,81 et 0,82 respectivement), suivis par G3 (0,78) et G8 (0,71). Le groupe G4 montre une densité intermédiaire de 0,63. Les groupes G6 et G7 affichent les densités les plus faibles (0,42 et 0,33 respectivement).

La distribution des densités peut être caractérisée en trois intervalles :

- Densité supérieure à 0,75 : G1, G2, G3
- Densité entre 0,60 et 0,75 : G4, G8
- Densité inférieure à 0,45 : G6, G7

Modalité Audio

TABLEAU 6.9 – Densité des réseaux de co-occurrence pour la modalité audio

Groupe	Densité
A1	0,90
A2	0,95
A3	0,96
A4	0,99
A5	0,96
A6	0,96
A7	0,97
A8	0,97

L'analyse des réseaux de co-occurrence pour la modalité audio est présentée dans le Tableau 6.9, détaillant les densités de réseau pour les huit groupes étudiés. Les mesures de densité montrent des valeurs élevées pour l'ensemble des groupes. Le groupe A4 présente la densité la plus élevée avec 0,99, tandis que le groupe A1 affiche la densité la plus faible avec 0,90. Les groupes A3, A5 et A6 partagent une densité identique de 0,96. Les groupes A7 et A8 présentent également une même densité de 0,97. L'analyse statistique des densités révèle une moyenne de 0,96 et un écart-type de 0,025. L'amplitude de variation entre la valeur minimale et maximale est de 0,09. La distribution des densités est relativement uniforme, avec 75% des groupes (6 sur 8) présentant des valeurs comprises entre 0,95 et 0,99. En termes de structure du réseau, ces valeurs de densité indiquent un nombre élevé de connexions entre les différentes catégories d'activités. Pour chaque groupe, le ratio entre les liens existants et le nombre maximum de liens possibles est supérieur à 0,90. Ces mesures de densité diffèrent quantitativement de celles observées dans la modalité chat, où les valeurs présentaient une plus grande amplitude de variation.

Comparaison inter-modalités

L'analyse comparative des densités de réseau entre les modalités chat et audio met en évidence plusieurs différences quantitatives significatives. Les valeurs de densité pour la modalité chat s'étendent de 0,33 à 0,82, tandis que celles de la modalité audio se situent entre 0,90 et 0,99, révélant une différence marquée dans la distribution des connexions entre les deux modalités. La structure des réseaux présente également des caractéristiques distinctes. Dans la modalité chat, les densités se distribuent en trois groupes distincts : faible densité (0,30-0,50), densité moyenne (0,60-0,70), et haute densité (0,70-0,85), montrant une variabilité importante dans la structure des interactions. En revanche, la modalité audio montre une forte homogénéité, avec la grande majorité des groupes (six sur huit) présentant des densités très élevées, supérieures à 0,95.

6.5.3 Analyse des chaînes de Markov

L'analyse des chaînes de Markov nous permet d'examiner la dynamique temporelle des interactions collaboratives, en modélisant les probabilités de transition entre différentes catégories d'activités. Cette approche offre un éclairage complémentaire sur les patterns comportementaux identifiés précédemment.

Modalité Chat

TABLEAU 6.10 – Statistiques des chaînes de Markov pour la modalité chat

Groupe	Transitions uniques	Probabilité moyenne	Écart-type
G1	127	0,110	0,084
G2	132	0,106	0,074
G3	113	0,124	0,087
G4	93	0,151	0,164
G6	38	0,316	0,284
G7	38	0,316	0,323
G8	105	0,133	0,108

L'analyse des chaînes de Markov pour la modalité chat est présentée dans le Tableau 6.10, détaillant pour chaque groupe le nombre de transitions uniques, les probabilités moyennes de transition et les écarts-types associés. Le nombre de transitions uniques varie considérablement entre les groupes. Les valeurs les plus élevées sont observées pour G2 (132 transitions) et G1 (127 transitions), suivies par G3 (113 transitions). Les groupes G8 et G4 présentent des valeurs intermédiaires avec respectivement 105 et 93 transitions. Les groupes G6 et G7 montrent le nombre le plus faible avec 38 transitions chacun. Les probabilités moyennes de transition se répartissent en deux catégories distinctes : un premier ensemble comprenant G1, G2, G3, G4 et G8 avec des valeurs entre 0,106 et 0,151, et un second ensemble composé de G6 et G7 présentant des valeurs identiques de 0,316. Les écarts-types suivent une distribution similaire. Les groupes G1, G2 et G3 présentent les écarts-types les plus faibles (entre 0,074 et 0,087). Les groupes G4 et G8 montrent des valeurs intermédiaires (0,164 et 0,108 respectivement). Les groupes G6 et G7 affichent les écarts-types les plus élevés (0,284 et 0,323). L'analyse statistique révèle une moyenne globale de 92,29 transitions uniques (écart-type = 37,85) et une probabilité moyenne de transition de 0,179 (écart-type = 0,092) sur l'ensemble des groupes.

Modalité Audio

L'analyse des chaînes de Markov pour la modalité audio est présentée dans le Tableau 6.11, détaillant pour chaque groupe le nombre de transitions uniques, les probabilités moyennes de transition et leurs écarts-types associés. Le nombre de transitions uniques varie entre 116 et 145 pour l'ensemble des groupes. Le groupe A7 présente le nombre le plus élevé (145 transitions), suivi par A8 (142 transitions) et A6 (141 transitions). Les groupes A2 et A4 montrent des valeurs identiques (136 transitions). Le groupe A1 présente le nombre le plus faible avec 116 transitions. Les probabilités moyennes de transition montrent une distribution resserrée, comprise entre 0,090 et 0,112. Le groupe A1 présente

TABLEAU 6.11 – Statistiques des chaînes de Markov pour la modalité audio

Groupe	Transitions uniques	Probabilité moyenne	Écart-type
A1	116	0,112	0,074
A2	136	0,096	0,064
A3	140	0,093	0,063
A4	136	0,096	0,061
A5	138	0,094	0,076
A6	141	0,092	0,067
A7	145	0,090	0,059
A8	142	0,092	0,053

la probabilité la plus élevée (0,112), tandis que le groupe A7 montre la plus faible (0,090). Six groupes sur huit présentent des probabilités comprises entre 0,092 et 0,096. Les écarts-types des probabilités de transition varient entre 0,053 et 0,076. Le groupe A5 présente l'écart-type le plus élevé (0,076), tandis que le groupe A8 montre l'écart-type le plus faible (0,053). L'analyse statistique révèle une moyenne de 136,75 transitions uniques (écart-type = 9,27) et une probabilité moyenne de transition de 0,096 (écart-type = 0,007) sur l'ensemble des groupes. Le coefficient de variation est de 6,78% pour le nombre de transitions uniques et de 7,29% pour les probabilités moyennes.

Comparaison inter-modalités

L'analyse comparative des chaînes de Markov entre les modalités chat et audio révèle des patterns d'interaction distincts. En ce qui concerne les transitions uniques, la modalité chat montre une forte variabilité entre les groupes, avec des valeurs s'échelonnant de 38 à 132 transitions. Cette distribution se caractérise par trois profils distincts : des groupes présentant un nombre élevé de transitions (G1 et G2, avec respectivement 127 et 132 transitions), des groupes avec un nombre intermédiaire de transitions (G3, G4 et G8, entre 93 et 113 transitions), et des groupes avec un nombre significativement plus faible de transitions (G6 et G7, 38 transitions chacun). En contraste, la modalité audio présente une distribution plus homogène des transitions uniques, variant de 116 à 145 transitions. La majorité des groupes se situe au-dessus de 135 transitions, avec une variation relativement faible entre les groupes. Les probabilités de transition reflètent également cette différence de structure entre les modalités. Dans la modalité chat, ces probabilités varient considérablement, de 0,106 à 0,316, avec une démarcation notable entre deux groupes (G6 et G7) présentant des probabilités élevées (0,316) et les autres groupes dont les probabilités sont plus modérées (entre 0,106 et 0,151). La modalité audio, en revanche, présente des probabilités de transition plus uniformes, comprises entre 0,090 et 0,112.

6.6 Discussion

Notre analyse comparative des modalités chat et audio dans les phases initiales de collaboration révèle des différences significatives dans les dynamiques d'interaction, offrant des perspectives nouvelles sur l'impact des modalités de communication dans les

environnements d'apprentissage collaboratif médiatisés par ordinateur (CSCL).

6.6.1 Divergence des patterns collaboratifs entre modalités

L'analyse de fréquence a mis en évidence des profils de collaboration nettement contrastés entre les modalités chat et audio. Dans la modalité chat, nous avons observé une variabilité importante dans la distribution des activités, avec une prédominance marquée des catégories Tâche et co-régulation. Cette distribution hétérogène suggère une adaptation variable des groupes aux contraintes de la communication textuelle. En revanche, la modalité audio a révélé une approche plus homogène, caractérisée par une forte présence des activités de validation (VAL) et d'awareness (AW). Les variations entre les groupes dans cette modalité sont apparues nettement plus faibles, suggérant un pattern d'interaction plus stable et uniforme. Cette différence dans la répartition des activités souligne l'influence cruciale de la modalité de communication sur la structuration des processus collaboratifs.

Il est important de noter que ces différences pourraient être fondamentalement liées à la nature unimodale du chat versus multimodale de l'audio. Dans la condition chat, les participants doivent partager le même canal pour la communication et les actions d'organisation, créant potentiellement une compétition pour les ressources attentionnelles. Ceci pourrait expliquer la nécessité d'une structuration plus forte des interactions et la prédominance des activités liées aux tâches. En revanche, la condition audio, en séparant physiquement le canal de communication (vocal) du canal d'action (interface), permet une parallélisation naturelle des activités. Cette séparation modale pourrait faciliter l'émergence d'interactions plus fluides et d'une validation continue, les participants pouvant communiquer sans interrompre leurs actions dans l'interface.

La prépondérance de la validation et de l'awareness dans la modalité audio fait écho aux travaux de Clark et Brennan (1991) [43] sur l'importance du "grounding" dans la communication. Nos résultats suggèrent que la richesse des indices paralinguistiques offerts par l'audio facilite ce processus de construction d'un terrain commun, corroborant ainsi la théorie de la richesse des médias [27]. Cependant, contrairement aux prédictions de cette théorie, la modalité audio n'a pas nécessairement conduit à une collaboration plus efficace, mais plutôt à une approche différente, centrée sur la validation mutuelle et le maintien d'une conscience partagée de la situation.

6.6.2 Structure relationnelle des interactions

L'analyse des réseaux de co-occurrence a révélé des différences structurelles marquées entre les modalités. La modalité chat a montré une forte variabilité dans la densité des réseaux. Cette variation importante dans la connectivité des interactions corrobore les observations de Saqr et Alamro (2019) [170] sur la diversité des patterns d'interaction dans les environnements CSCL. En revanche, la modalité audio a systématiquement présenté des réseaux hautement connectés, avec des densités remarquablement élevées et homogènes. Cette différence structurelle fondamentale entre les modalités semble suggérer dans notre contexte que la communication audio favorise naturellement une structuration plus uniforme et fortement interconnectée des interactions, tandis que le chat permet l'émergence de structures d'interaction plus diversifiées.

Cette différence structurelle pourrait s'expliquer par la nature synchrone et éphémère de la communication audio, qui encourage une intégration plus forte des différentes activités collaboratives. Nos résultats étendent ainsi les travaux de Stahl (2006) [182] sur la nature émergente et distribuée de la cognition de groupe dans les CSCL, en montrant comment la modalité de communication peut influencer la structure même de cette cognition collective.

6.6.3 Dynamique temporelle des interactions

L'analyse des chaînes de Markov a mis en lumière des différences significatives dans la dynamique temporelle des interactions. La modalité chat a présenté une grande variabilité dans les patterns de transition, avec un nombre de transitions uniques variant de 38 à 132 (moyenne de 92,29, écart-type de 37,85) et des probabilités moyennes de transition s'étendant de 0,106 à 0,316 (écart-type de 0,092). En revanche, la modalité audio a montré une remarquable uniformité, avec un nombre de transitions uniques plus élevé et plus stable (116 à 145, moyenne de 136,75, écart-type de 9,27) et des probabilités de transition plus homogènes (0,090 à 0,112, écart-type de 0,007). Ces observations nuancent les résultats de Reimann (2009) [34] sur l'analyse des processus dans les CSCL, en démontrant quantitativement comment la modalité de communication influence non seulement la nature des interactions, mais aussi leur séquençement temporel et leur prévisibilité.

La flexibilité uniformément élevée observée dans la modalité audio pourrait être attribuée à la richesse des indices contextuels et à la rapidité des échanges qu'elle permet. Cependant, contrairement à ce que l'on pourrait attendre selon la théorie de la synchronicité des médias [183], cette flexibilité n'a pas conduit à une structuration plus forte des interactions, mais plutôt à une diversité constante des séquences d'activités.

6.6.4 Conclusion

Notre étude montre l'impact de la modalité de communication sur les dynamiques collaboratives dans les environnements CSCL. En révélant des tendances comportementales différentes entre les modalités chat et audio en termes de structure, de contenu et de séquençement des interactions, nos résultats soulignent l'importance de considérer attentivement le choix et la conception des outils de communication dans les environnements d'apprentissage collaboratif. Cette recherche ouvre de nouvelles perspectives pour le développement d'environnements CSCL plus adaptés et efficaces, capables de soutenir une variété de styles collaboratifs et de s'adapter dynamiquement aux besoins changeants des apprenants.

Conclusion

"Si écrire une thèse était un jeu vidéo, ce dernier chapitre serait le boss final. Spoiler : je gagne à la fin."

Un doctorant à plat.

7.1 Synthèse et contributions

Ce travail de thèse s'est attaché à explorer les mécanismes sous-jacents à la collaboration dans les environnements d'apprentissage médiatisés par ordinateur, avec un focus particulier sur les jeux sérieux collaboratifs. À travers une approche méthodologique mixte combinant études expérimentales et analyses computationnelles, nos recherches ont permis d'éclairer la façon dont les caractéristiques de l'environnement virtuel façonnent les interactions entre apprenants et leur expérience collective. Le chapitre 3 a mis en évidence l'influence déterminante du point de vue (première vs troisième personne) sur les processus collaboratifs dans un jeu sérieux multi-joueurs. Nos résultats ont démontré que le point de vue à la première personne favorise un partage d'informations plus important entre les joueurs et renforce leur capacité à coordonner leurs actions. Ces observations soulignent l'importance des modalités de perception et d'interaction dans la conception d'expériences d'apprentissage collaboratif en environnement virtuel. Le chapitre 4 a approfondi notre compréhension de l'impact des modalités de communication (texte, audio, vidéo) sur la mise en œuvre des processus de régulation individuelle et collective. Les résultats ont révélé la supériorité de la modalité audio pour la co-régulation, se traduisant par des temps de tour plus courts et une coordination plus efficace. La modalité texte, quant à elle, a présenté des patterns de régulation spécifiques qui évoluent distinctement au fil du temps. Ces observations nuancent les approches traditionnelles de la richesse médiatique en soulignant la complexité des relations entre modalités de communication et régulation. Le chapitre 5 a proposé une analyse approfondie des dynamiques collaboratives en combinant l'étude des traces d'interaction et du contenu des échanges. Cette approche a permis d'identifier des profils de collaboration contrastés entre les groupes et de mettre au jour des structures relationnelles spécifiques entre les différents processus collaboratifs. L'utilisation successive de techniques d'analyse de fréquence, de réseaux de co-occurrences et de

chaînes de Markov a offert une vision intégrée des patterns d'interaction. Enfin, le chapitre 6 a étendu cette démarche analytique à la modalité de communication audio en exploitant les avancées récentes en traitement automatique du langage. Les résultats ont mis en évidence des différences significatives dans la structure et la séquence des interactions selon les modalités, avec notamment une plus grande homogénéité des comportements collaboratifs dans la modalité audio. Cette analyse systématique a également révélé des patterns d'évolution temporelle distincts pour chaque modalité. L'articulation de ces différents résultats permet d'enrichir notre compréhension des mécanismes qui sous-tendent la collaboration en environnement virtuel. Nos travaux soulignent notamment l'importance d'une approche intégrée prenant en compte à la fois les aspects technologiques (point de vue, modalités de communication) et les processus sociocognitifs (régulation, coordination) dans l'analyse des interactions médiatisées. Cette perspective contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine des environnements d'apprentissage collaboratif et ouvre des pistes prometteuses pour leur conception.

7.2 Implications pratiques

Les résultats de nos travaux, riches et multidimensionnels, ouvrent des perspectives concrètes pour la conception d'environnements d'apprentissage collaboratifs médiatisés plus efficaces et engageants. Ces implications se déclinent en plusieurs recommandations pratiques, chacune ciblant un aspect spécifique de l'expérience collaborative et s'appuyant sur les analyses empiriques présentées dans les chapitres précédents.

7.2.1 Choix du point de vue

L'une des contributions majeures de notre thèse réside dans la mise en évidence de l'impact significatif du point de vue sur les dynamiques collaboratives (Chapitre 3). Nos analyses suggèrent qu'un point de vue à la première personne, en favorisant une immersion plus profonde et une incarnation plus forte de l'utilisateur, est particulièrement propice à l'émergence d'interactions collaboratives de qualité. Plus précisément, ce point de vue semble renforcer le sentiment d'accessibilité psycho-comportementale, c'est-à-dire la capacité à percevoir et à comprendre les états mentaux et émotionnels des autres participants. Il favorise également une symétrie subjective perçue plus forte, où les apprenants ont le sentiment que leurs perceptions et leurs intentions sont mieux comprises par leurs partenaires. Enfin, le point de vue à la première personne encourage un partage d'informations plus spontané et plus riche entre les participants.

Forts de ces observations, nous recommandons aux concepteurs d'environnements virtuels collaboratifs de privilégier, par défaut, une vue à la première personne. Cependant, il est important de préserver la flexibilité de l'interface en offrant la possibilité de basculer temporairement vers une vue à la troisième personne. Ce mode de visualisation, en offrant une perspective plus globale de l'environnement et des actions des autres participants, peut s'avérer particulièrement utile pour des tâches spécifiques nécessitant une coordination spatiale ou une compréhension d'ensemble de la situation.

7.2.2 Modalités de communication

Le chapitre 4 de notre thèse a exploré en profondeur l'influence des différentes modalités de communication (texte, audio, vidéo) sur les processus collaboratifs. Nos résultats mettent en évidence des avantages et des inconvénients spécifiques à chaque modalité, soulignant ainsi l'importance d'un choix éclairé et d'une articulation judicieuse de ces outils.

La communication audio, en particulier, s'est révélée particulièrement efficace pour favoriser un sentiment de présence sociale élevé et une co-régulation fluide et rapide. La richesse des indices vocaux (intonation, rythme, etc.) semble faciliter la construction d'un terrain commun et la compréhension mutuelle des intentions et des émotions. Cependant, la communication audio peut être moins adaptée aux situations nécessitant une forte structuration des échanges ou une traçabilité précise des décisions.

La communication textuelle, quant à elle, offre des avantages distincts. Elle permet une meilleure traçabilité des échanges, facilitant ainsi le suivi des décisions et la référence ultérieure aux informations partagées. De plus, la nature asynchrone du chat peut favoriser une réflexion plus approfondie et une planification plus méthodique des actions. Cependant, la communication textuelle peut s'avérer moins spontanée et moins propice à l'expression des émotions et des nuances.

Face à cette complémentarité des modalités, nous préconisons une approche flexible et adaptative dans la conception des interfaces collaboratives. Plutôt que d'imposer une modalité unique, il serait pertinent de permettre aux utilisateurs de choisir la modalité la plus adaptée à leurs besoins et à la nature de la tâche en cours. Mieux encore, des interfaces intelligentes pourraient suggérer, voire orchestrer, des transitions entre les modalités en fonction du contexte d'interaction. Par exemple, le système pourrait recommander un passage à la communication audio pour une phase de brainstorming ou de résolution de conflit, et un retour au chat pour une phase de structuration ou de documentation des décisions.

7.2.3 Support à la régulation

Les chapitres 4 et 5 de notre thèse ont mis en évidence le rôle crucial des processus de régulation (autorégulation, co-régulation, régulation partagée) dans la réussite des activités collaboratives. Pour soutenir efficacement ces processus, il est essentiel de concevoir des outils d'accompagnement intégrés à l'environnement d'apprentissage.

L'une des pistes prometteuses réside dans l'intégration d'outils de visualisation en temps réel de l'activité collaborative. Des tableaux de bord, par exemple, pourraient représenter visuellement la distribution des rôles, l'équilibre des contributions, ou encore les patterns d'interaction dominants au sein du groupe. Ces visualisations, en offrant une représentation concrète et synthétique de la dynamique collaborative, permettraient aux apprenants de développer une conscience mutuelle plus forte et de mieux coordonner leurs actions.

Parallèlement, il serait pertinent de proposer des fonctionnalités de planification et de suivi des objectifs partagés. Ces outils, en permettant aux groupes de définir explicitement leurs buts, de les décomposer en sous-tâches et de suivre leur progression, faciliteraient la régulation collective et l'alignement des efforts individuels.

Enfin, la conception de "prompts" adaptatifs, c'est-à-dire de messages ou de suggestions contextuelles, pourrait encourager la réflexion métacognitive et l'autorégulation des apprenants. Ces prompts, déclenchés par des événements spécifiques (par exemple, une période d'inactivité, une divergence d'opinions, une difficulté rencontrée) inviteraient les apprenants à prendre du recul sur leurs actions, à évaluer leur propre compréhension et à ajuster leurs stratégies si nécessaire.

Il est crucial que ces outils de support à la régulation soient conçus de manière non intrusive, afin de ne pas surcharger cognitivement les utilisateurs ni de perturber le déroulement naturel des interactions. L'enjeu est de trouver un équilibre subtil entre guidage et autonomie, en offrant un accompagnement pertinent sans pour autant brider la créativité et la spontanéité des échanges.

7.2.4 Analyse et feedback des interactions

Les approches d'analyse multi-niveaux que nous avons développées dans les chapitres 5 et 6 ouvrent des perspectives intéressantes pour la conception d'outils d'analyse et de feedback, tant pour les apprenants que pour les enseignants.

L'un des axes prometteurs réside dans le développement de systèmes de feedback automatisé. Ces systèmes, en s'appuyant sur les modèles d'interaction que nous avons construits, seraient capables d'identifier en temps réel des patterns d'interaction sous-optimaux (par exemple, une faible participation de certains membres, une absence de validation mutuelle, une focalisation excessive sur la tâche au détriment de la régulation). En signalant ces patterns aux apprenants et en leur suggérant des pistes d'amélioration, ces systèmes pourraient favoriser une prise de conscience et une régulation plus efficace de la dynamique collaborative.

Parallèlement, la mise en place d'outils d'analyse post-hoc à destination des enseignants permettrait d'enrichir l'évaluation des compétences collaboratives. Ces outils, en offrant une visualisation synthétique des interactions et en mettant en évidence les patterns d'interaction dominants, faciliteraient l'identification des forces et des faiblesses de chaque groupe, ainsi que des besoins d'accompagnement spécifiques.

Enfin, le développement d'interfaces de visualisation des dynamiques collaboratives, destinées cette fois aux apprenants eux-mêmes, constituerait un outil puissant de réflexion et d'auto-évaluation. Ces interfaces, en offrant une représentation visuelle de leurs propres interactions et de celles de leurs partenaires, permettraient aux apprenants de prendre du recul sur leurs pratiques collaboratives, d'identifier leurs points forts et leurs axes d'amélioration, et d'ajuster leurs stratégies en conséquence.

Il est essentiel que ces outils d'analyse et de feedback soient conçus dans une optique de personnalisation. Les utilisateurs (apprenants et enseignants) devraient pouvoir paramétrer les indicateurs suivis, les seuils d'alerte, et les modalités de visualisation en fonction de leurs besoins et de leurs objectifs spécifiques.

7.2.5 Prise en compte des différents style de collaboration dans la conception

Enfin, nos travaux soulignent l'importance de prendre en compte :

- L'évolution des besoins des apprenants au fil de leur progression dans l'environnement collaboratif
- La nécessité d'un équilibre entre guidage et autonomie dans le support à la collaboration

D'après ces résultats, il semble pertinent de prévoir des mécanismes d'adaptation dynamique des interfaces en fonction des profils et des contextes d'utilisation. La conception des environnements d'apprentissage collaboratif doit également tenir compte des spécificités observées dans les différentes modalités d'interaction. Nos résultats mettent en avant la pertinence de se diriger vers une approche intégrative et adaptative. Premièrement, les interfaces devraient pouvoir s'adapter dynamiques collectives qui émergent, notamment par l'intégration d'outils de visualisation permettant aux groupes de développer une conscience commune de leurs patterns d'interaction et de co-réguler leurs stratégies collaboratives. Ces outils pourraient par exemple représenter en temps réel la distribution des rôles, l'équilibre des contributions ou les cycles d'interaction dominants au sein du groupe. Deuxièmement, le développement d'outils spécifiques pour faciliter la construction d'un terrain commun et maintenir la conscience mutuelle (*awareness*) s'avère crucial, particulièrement dans les interactions audio. Ces fonctionnalités devraient permettre au groupe dans son ensemble de valider collectivement les actions et de maintenir une compréhension partagée de l'état de la collaboration. Enfin, plutôt que de privilégier une modalité sur l'autre, nos observations suggèrent l'importance d'une approche multimodale permettant au groupe de basculer collectivement entre différentes modalités selon l'évolution de leurs besoins collaboratifs. Cette flexibilité permettrait aux équipes d'adapter leurs modes d'interaction aux différentes phases de leur travail collectif, qu'il s'agisse de phases de planification, de coordination ou d'exécution.

Ces implications pratiques, dérivées de nos résultats empiriques et de notre analyse approfondie des dynamiques collaboratives, visent à guider les concepteurs d'environnements d'apprentissage collaboratif médiatisés vers des solutions plus efficaces et engageantes. Leur mise en œuvre devrait contribuer à optimiser l'expérience utilisateur, à renforcer le sentiment de présence sociale et à favoriser des interactions collaboratives plus riches et productives dans le contexte des jeux sérieux et au-delà.

7.3 Limites et perspectives futures

Bien que notre travail ait apporté des contributions significatives à la compréhension des dynamiques collaboratives dans les environnements d'apprentissage médiatisés, il présente certaines limites qui ouvrent autant de perspectives pour de futures recherches.

7.3.1 Limites méthodologiques

Protocole expérimental et généralisation

Notre étude s'est concentrée sur un jeu sérieux spécifique, avec des sessions d'expérimentation relativement courtes et des échantillons limités. Cette configuration soulève plusieurs questions de généralisation. D'abord, l'utilisation d'un unique jeu sérieux, bien que permettant un contrôle expérimental précis, limite la portée de nos conclusions sur

l'impact des modalités de communication et du point de vue dans d'autres contextes d'apprentissage collaboratif. La nature même de la tâche collaborative proposée dans notre jeu - la réparation d'un sous-marin avec une pression temporelle - pourrait avoir influencé les patterns d'interaction observés d'une manière spécifique au contexte. La durée limitée des sessions expérimentales constitue une autre limitation importante. Bien que nos analyses aient révélé des différences significatives entre les modalités de communication, notamment dans les processus de régulation et le sentiment de présence sociale, nous n'avons pu observer ces effets que sur des périodes relativement courtes. Les phénomènes d'adaptation aux modalités de communication, particulièrement visibles dans nos analyses des interactions textuelles, suggèrent que des observations sur le long terme pourraient révéler des patterns d'évolution différents. L'influence des caractéristiques individuelles sur les comportements collaboratifs, bien qu'identifiée dans nos analyses des réseaux de co-occurrence et des chaînes de Markov, n'a pas été systématiquement contrôlée. Les variations dans l'expérience préalable des outils de communication numérique, les styles d'apprentissage, ou encore les compétences techniques des participants ont pu influencer leur capacité à tirer parti des différentes modalités d'interaction proposées.

Mesures et évaluation

Nos méthodes d'évaluation, bien qu'ayant permis une analyse approfondie des processus collaboratifs (partage d'informations, régulation, etc.) à travers diverses techniques (analyse de fréquence, réseaux, chaînes de Markov), présentent une limitation significative. L'absence de mesures systématiques des compétences collaboratives visées (leadership partagé, écoute active, communication constructive, coordination, résolution de problèmes, flexibilité) restreint notre compréhension de l'efficacité réelle des différentes configurations d'interaction sur le développement de ces aptitudes générales et transférables. Des mesures spécifiques de ces compétences, distinctes de l'observation des processus, auraient été nécessaires pour établir un lien direct entre nos observations et l'objectif d'apprentissage central du jeu sérieux. La mesure de la présence sociale à travers des questionnaires auto-rapportés, bien que standard dans le domaine, présente des limites inhérentes. Les résultats observés, notamment concernant l'impact différencié des modalités de communication sur les dimensions de co-présence et d'accessibilité psycho-comportementale, auraient bénéficié d'une validation par des mesures comportementales objectives. L'absence d'indicateurs temps réel de la présence sociale limite également notre compréhension de son évolution au cours des sessions. Notre approche expérimentale, bien que permettant d'identifier des effets significatifs des modalités de communication et du point de vue, n'a pas permis d'isoler complètement leur contribution respective. Les interactions potentielles entre ces caractéristiques de l'environnement, particulièrement visibles dans nos analyses des dynamiques collaboratives du chapitre 6, suggèrent des relations complexes qu'un design expérimental plus sophistiqué aurait pu mieux capturer. Ces limitations soulignent l'importance d'adopter des approches méthodologiques plus intégratives dans les futures recherches sur les environnements d'apprentissage collaboratif médiatisés.

Choix et limites des modèles d'analyse

Il est important de souligner que nos méthodes d'analyse, bien qu'ayant permis de mettre en évidence des patterns d'interaction significatifs, présentent certaines limites

inhérentes. Les chaînes de Markov, en particulier, reposent sur l'hypothèse de Markov (dépendance uniquement de l'état précédent), qui constitue une simplification de la complexité des interactions humaines. Des dépendances à plus long terme, influencées par des facteurs contextuels ou des stratégies individuelles, peuvent ne pas être capturées par ce type de modèle. De même, les réseaux de co-occurrence, bien qu'utiles pour visualiser la structure des relations entre catégories d'activités, ne rendent pas compte de la dynamique temporelle ni du contenu sémantique des échanges. Ces modèles offrent donc une représentation nécessairement partielle et simplifiée des processus collaboratifs. Une interprétation prudente des résultats, en gardant à l'esprit ces limitations, est donc essentielle. Des approches complémentaires, intégrant par exemple des analyses qualitatives ou des techniques de traitement automatique du langage naturel pour explorer la dimension sémantique des interactions, pourraient enrichir notre compréhension des phénomènes étudiés.

7.3.2 Limites techniques

Capture et traitement des données

Les contraintes techniques ont significativement impacté notre capacité d'analyse, en particulier concernant la comparaison entre les modalités. La qualité variable des enregistrements audio a fortement affecté la fiabilité des transcriptions automatiques générées par le modèle Whisper. Cette limitation nous a contraints à recourir à des transcriptions manuelles, un processus extrêmement chronophage, réduisant ainsi considérablement la quantité de données audio analysables. Par conséquent, notre analyse comparative s'est limitée à la première partie des sessions pour la modalité audio. De plus, en raison de ressources limitées et de cette problématique, nous n'avons pas pu exploiter les données de la modalité vidéo dans cette étude. Cette modalité n'a donc pas été incluse dans les comparaisons inter-modalités. Ces contraintes techniques, bien qu'indépendantes de notre volonté, limitent la portée de nos comparaisons entre les différentes modalités de communication. L'absence d'outils permettant une analyse en temps réel des interactions, notamment mise en évidence lors de nos tentatives de modélisation des dynamiques collaboratives dans le chapitre 6, constitue une limitation technique importante. Les différences de qualité entre les modalités de communication, particulièrement évidentes dans la comparaison entre le chat et l'audio présentée au chapitre 4, ont également pu influencer les patterns d'interaction observés. Les limitations liées à l'interface du jeu sérieux, identifiées dès le chapitre 3 lors de notre première étude expérimentale, méritent également d'être soulignées. La rigidité de certains aspects de l'interface, notamment dans la visualisation des informations partagées et la coordination des actions, a pu contraindre artificiellement les modalités de collaboration. Les évolutions du prototype décrites dans le chapitre 3, bien qu'apportant des améliorations significatives, n'ont pas pu intégrer l'ensemble des fonctionnalités souhaitées en raison de contraintes techniques. Par ailleurs, les défis liés à la stabilité et à la performance du système, particulièrement lors des sessions multimodales combinant audio, vidéo et interactions synchrones, ont parfois impacté la fluidité des échanges, un aspect crucial pour l'étude des dynamiques collaboratives analysées dans les chapitres 5 et 6.

7.3.3 Perspectives de recherche

Les limites méthodologiques et techniques précédemment évoquées ouvrent des perspectives de recherche que nous pouvons structurer selon un horizon temporel, distinguant les actions à court terme, directement liées au projet BODEGA, et les explorations à plus long terme.

Perspectives à court terme (liées au projet BODEGA)

Dans le prolongement direct de nos travaux et dans le cadre du projet BODEGA, deux axes de recherche prioritaires se dégagent. Le premier concerne l'extension de nos analyses à la modalité vidéo. En effet, les contraintes techniques rencontrées lors de la collecte et du traitement des données, détaillées dans la section "Limites", nous ont empêchés d'exploiter pleinement le potentiel de cette modalité. Or, la comparaison systématique des trois modalités de communication (chat, audio, vidéo) constitue un enjeu crucial pour une compréhension fine de leur impact respectif sur les dynamiques collaboratives. Pour surmonter cette limitation, plusieurs stratégies sont envisageables : investir dans des solutions de transcription automatique de pointe, spécifiquement entraînées pour des environnements bruités et des interactions multilocuteurs ; allouer des ressources humaines supplémentaires à la transcription manuelle, en adoptant une approche progressive et ciblée ; ou encore, explorer des techniques d'analyse de la vidéo (e.g., détection automatique d'expressions faciales, de postures) qui pourraient compléter l'analyse des échanges verbaux. L'intégration des données vidéo permettrait d'enrichir considérablement nos conclusions et d'affiner nos recommandations pour la conception d'environnements d'apprentissage collaboratifs.

Le second axe prioritaire, étroitement lié au précédent, porte sur la conception et l'évaluation d'outils de feedback et de visualisation intégrés au jeu sérieux. En s'appuyant sur les patterns d'interaction identifiés grâce à nos analyses multi-niveaux, il s'agirait de développer des tableaux de bord et des mécanismes de feedback en temps réel, destinés à la fois aux apprenants et aux enseignants. Ces outils auraient pour objectif de favoriser la prise de conscience des dynamiques collaboratives, en rendant visibles les processus de régulation (autorégulation, co-régulation, régulation socialement partagée), en fournissant un retour d'information personnalisé sur les performances individuelles et collectives, et en permettant un pilotage plus fin des activités d'apprentissage. L'enjeu serait de concevoir des visualisations intuitives et des indicateurs pertinents, capables de rendre compte de la complexité des interactions sans pour autant surcharger cognitivement les utilisateurs. Une évaluation rigoureuse de l'impact de ces outils sur l'engagement des apprenants, la qualité de la collaboration et les apprentissages réalisés constituerait une contribution majeure à la recherche sur les environnements d'apprentissage collaboratifs médiatisés.

Extensions méthodologiques

Pour répondre aux limites identifiées, plusieurs directions de recherche apparaissent prometteuses. La conduite d'études longitudinales permettrait d'observer l'évolution des comportements collaboratifs dans le temps, en particulier les phénomènes d'adaptation aux différentes modalités de communication mis en évidence dans nos travaux. Ces études à plus long terme offriraient une compréhension plus fine de la façon dont les groupes

développent des stratégies de régulation collective et s'approprient progressivement les affordances de l'environnement virtuel. L'élargissement de l'expérimentation à différents contextes d'apprentissage, notamment professionnels et informels, et à des populations plus diversifiées permettrait de valider la généralisation de nos observations sur l'impact du point de vue et des modalités de communication. L'intégration de mesures physiologiques enrichirait significativement notre compréhension des mécanismes sous-jacents à la collaboration médiatisée. L'eye-tracking permettrait notamment d'analyser les patterns d'attention visuelle lors des phases de coordination identifiées dans nos analyses de séquences d'interaction, tandis que l'EEG fournirait des indicateurs objectifs de la charge cognitive associée aux différentes modalités de communication. Ces données physiologiques, couplées à nos analyses des traces d'interaction et du contenu des échanges, offriraient une vision plus complète des processus attentionnels et cognitifs qui sous-tendent la construction de la présence sociale et la mise en œuvre des mécanismes de régulation collective.

Approfondissement de l'analyse des interactions

Une perspective de recherche prometteuse consisterait à dépasser la simple catégorisation des énoncés pour intégrer une analyse plus fine de leur contenu sémantique et de leur fonction pragmatique. Si nos travaux ont permis de mettre en évidence des patterns d'interaction et des différences entre modalités, ils restent limités dans leur capacité à rendre compte de la richesse et de la complexité des échanges verbaux. L'application de techniques de traitement automatique du langage naturel (TALN) permettrait d'enrichir considérablement notre compréhension des processus collaboratifs. Cette perspective pourrait être particulièrement fructueuse en collaboration avec le laboratoire ICAR, dont l'expertise en analyse du discours et des interactions permettrait d'explorer des dimensions complémentaires : analyse de sentiments, détection de thèmes, modélisation des arguments. Par exemple, il serait intéressant d'examiner comment le ton des échanges (positif, négatif, neutre), la nature des arguments (faits, opinions, hypothèses), ou la présence de marqueurs de co-construction (reformulation, questionnement, accord/désaccord) influencent la dynamique de la collaboration et la qualité des apprentissages. Une telle approche permettrait de relier plus finement les formes d'interaction (observables dans les traces et les catégories) et leur contenu (accessible via l'analyse sémantique), ouvrant ainsi la voie à une modélisation plus complète et plus nuancée des comportements collaboratifs.

Développements analytiques

Les perspectives d'amélioration de nos méthodes d'analyse sont nombreuses et prometteuses. Si nos travaux ont permis de mettre en évidence des patterns collaboratifs à travers l'analyse des réseaux de co-occurrence et des chaînes de Markov, l'utilisation de modèles plus sophistiqués comme les Hidden Markov Models (HMM) permettrait de mieux capturer la nature stochastique des interactions et d'identifier des états latents dans les séquences comportementales. Ces modèles pourraient notamment révéler des phases de collaboration caractéristiques qui ne sont pas directement observables à travers nos analyses actuelles de transitions. L'application d'architectures de deep learning, en particulier les réseaux LSTM (Long Short-Term Memory) ou les Transformers, pourrait enrichir notre compréhension des dynamiques temporelles, mais nécessiterait un volume

de données beaucoup plus important que celui collecté dans notre étude. En effet, ces approches requièrent généralement des milliers voire des dizaines de milliers de séquences d'interaction pour l'entraînement, alors que notre corpus se limite à quelques dizaines de sessions. Une perspective plus réaliste serait d'abord d'étendre la collecte de données à plus grande échelle, par exemple en déployant le jeu sérieux dans plusieurs établissements sur une période prolongée. Une fois un corpus suffisant constitué, ces techniques pourraient alors être utilisées pour modéliser des dépendances à long terme dans les séquences d'interaction, capturant ainsi des patterns collaboratifs plus complexes que ceux identifiés par notre approche basée sur les chaînes de Markov

Le développement d'approches véritablement multi-modales constitue une autre direction prometteuse. Au-delà de l'analyse parallèle des différentes sources de données (traces d'interaction, contenu des échanges, indicateurs de présence sociale) réalisée dans nos travaux, des architectures d'apprentissage profond multi-modal permettraient d'intégrer simultanément :

- Les patterns d'interaction dans l'interface
- Le contenu linguistique des échanges
- Les caractéristiques prosodiques de la communication audio
- Les indices non-verbaux issus de la vidéo
- Les mesures de performance collaborative

Cette fusion précoce des modalités offrirait une compréhension plus holistique des dynamiques collaboratives, permettant notamment d'identifier comment les différents canaux de communication se complètent ou se compensent au cours de l'interaction. Enfin, l'application de techniques d'analyse des réseaux sociaux temporels (temporal social network analysis) permettrait d'étudier l'évolution des structures relationnelles au sein des groupes. Ces approches, combinées à nos analyses de co-occurrence, offriraient une vision plus dynamique de la façon dont les rôles et les relations évoluent au cours des sessions collaboratives.

Innovation technologique

Les axes de développement technique incluent la conception d'interfaces adaptatives capables d'ajuster automatiquement leurs caractéristiques selon les besoins des utilisateurs. Nos résultats sur l'impact différencié des modalités de communication suggèrent notamment la pertinence d'interfaces capables de basculer dynamiquement entre les modes d'interaction (textuel, audio, vidéo) selon la nature des tâches collaboratives et les préférences des utilisateurs. L'implémentation de systèmes de feedback en temps réel constitue une autre direction prometteuse, permettant de visualiser les patterns d'interaction identifiés dans nos analyses et d'orienter les groupes vers des dynamiques collaboratives plus efficaces. L'intégration de modalités d'interaction émergentes, telles que la réalité augmentée ou les interfaces tangibles, pourrait enrichir l'expérience collaborative en offrant de nouvelles façons de matérialiser la présence sociale et de supporter les processus de régulation collective. Les résultats de nos travaux sur l'impact du point de vue suggèrent également l'intérêt d'explorer des modes de visualisation hybrides, combinant différentes perspectives pour optimiser à la fois l'immersion individuelle et la conscience collective de l'activité. Ces développements technologiques devront s'accompagner d'une réflexion sur

l'équilibre entre le guidage automatique et l'autonomie des apprenants, un aspect crucial mis en évidence par nos analyses des processus de régulation.

Applications pédagogiques

Le développement d'outils d'analyse destinés aux enseignants représente une perspective d'application particulièrement intéressante. Ces outils faciliteraient le suivi et l'évaluation des activités collaboratives, permettant une meilleure adaptation des interventions pédagogiques. La création de nouveaux formats d'activités pédagogiques exploitant les résultats de nos recherches constitue également une piste féconde pour l'innovation éducative. Une autre direction de recherche pertinente consisterait à explorer l'impact d'interventions pédagogiques ciblées et de mécanismes de guidage adaptatif sur les dynamiques collaboratives. Nos travaux ont mis en évidence des différences significatives entre les modalités de communication et entre les groupes en termes de patterns d'interaction et de processus de régulation. Ces résultats suggèrent qu'un accompagnement "taille unique" pourrait ne pas être optimal pour tous les apprenants et dans tous les contextes. Il serait donc pertinent de concevoir des environnements d'apprentissage capables d'analyser en temps réel les interactions des apprenants, d'identifier les difficultés ou les besoins spécifiques, et de proposer des interventions adaptées. Ces interventions pourraient prendre différentes formes : suggestions de stratégies collaboratives, rappels d'objectifs, reformulation de consignes, modification dynamique des modalités de communication, etc. L'enjeu serait de déterminer quelles formes d'intervention sont les plus efficaces pour soutenir quels types d'apprenants, dans quelles phases de l'activité collaborative, et en fonction de quelles modalités de communication. Une telle approche, combinant analyse fine des interactions et interventions pédagogiques ciblées, ouvrirait la voie à des environnements d'apprentissage collaboratifs plus intelligents et plus personnalisés.

7.3.4 Conclusion

Ces perspectives de recherche s'inscrivent dans une vision à long terme visant à améliorer significativement l'efficacité et l'engagement dans les environnements d'apprentissage collaboratif. L'intégration des avancées technologiques récentes en intelligence artificielle et en interfaces homme-machine, combinée à une meilleure compréhension des processus collaboratifs, ouvre la voie à une nouvelle génération d'environnements d'apprentissage plus intelligents et adaptatifs.

La poursuite de ces pistes de recherche nécessitera une approche interdisciplinaire, combinant les apports des sciences de l'éducation, de l'informatique, des sciences cognitives et du design d'interaction. Cette convergence des approches et des expertises constitue un défi majeur mais prometteur pour l'avenir des environnements d'apprentissage collaboratif médiatisés.

Ces perspectives de recherche, en répondant aux limites identifiées et en s'appuyant sur les contributions de notre travail, ouvrent des voies prometteuses pour approfondir notre compréhension des processus collaboratifs médiatisés. Elles soulignent le caractère interdisciplinaire de ce champ de recherche, à l'intersection de l'IHM, des sciences cognitives, de l'intelligence artificielle et des sciences de l'éducation. En poursuivant ces pistes, la communauté scientifique pourra développer des environnements d'apprentissage collaboratif toujours plus efficaces, engageants et adaptés aux besoins des apprenants du 21e

siècle.

Bibliographie

- [1] M. Merleau-Ponty, *Phenomenology of Perception*. London : Routledge, 1962. (Œuvre originale publiée en 1945).
- [2] G. Lakoff and M. Johnson, *Philosophy in the Flesh : The Embodied Mind and Its Challenge to Western Thought*. New York : Basic Books, 1999.
- [3] F. J. Varela, E. Thompson, and E. Rosch, *The Embodied Mind : Cognitive Science and Human Experience*. Cambridge, MA : MIT Press, 1991.
- [4] A. Damasio, *The Feeling of What Happens : Body and Emotion in the Making of Consciousness*. New York : Harcourt Brace, 1999.
- [5] N. Yee and J. Bailenson, “The proteus effect : The effect of transformed self-representation on behavior,” *Human Communication Research*, vol. 33, no. 3, pp. 271–290, 2007.
- [6] C. Kivunja, “Exploring the Pedagogical Meaning and Implications of the 4Cs "Super Skills" for the 21st Century through Bruner’s 5E Lenses of Knowledge Construction to Improve Pedagogies of the New Learning Paradigm,” 2015. Accepted : 2015-02-19T13 :40 :00Z Publisher : Scientific Research Publishing, Inc.
- [7] C. Dede, “Comparing frameworks for 21st century skills,” in *In J. Bellanca & R. Brandt (Eds.). 21st Century Skills : Rethinking How Students Learn*. Bloomington, IN : Solution Tree Press ; 2010 : 51 – 75.
- [8] M. Romero, M. Usart, and M. Ott, “Can Serious Games Contribute to Developing and Sustaining 21st-Century Skills?,” *Games and Culture*, vol. 10, pp. 148–177, Jan. 2015.
- [9] P. Dillenbourg, *Collaborative Learning : Cognitive and Computational Approaches. Advances in Learning and Instruction Series*. Elsevier Science, Inc, 1999. ERIC Number : ED437928.
- [10] W. Westera, R. Nadolski, H. Hummel, and I. Wopereis, “Serious games for higher education : a framework for reducing design complexity,” *Journal of Computer Assisted Learning*, vol. 24, no. 5, pp. 420–432, 2008.
- [11] J. Alvarez, *Du jeu vidéo au serious game*. Theses, Université Toulouse, Dec. 2007.
- [12] D. Vlachopoulos and A. Makri, “The effect of games and simulations on higher education : a systematic literature review,” *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, vol. 14, July 2017.

- [13] D. Marocco, D. Pacella, E. Dell'Aquila, and A. Di Ferdinando, "Grounding serious game design on scientific findings : The case of ENACT on soft skills training and assessment," in *European Conference on Technology Enhanced Learning*, vol. 9307, pp. 441–446, Springer, 2015.
- [14] L. Tong, *Designing and analyzing collaborative activities in multi-surface environments*. PhD thesis, Université de Lyon, May 2017.
- [15] S. Järvelä, J. Malmberg, and M. Koivuniemi, "Recognizing socially shared regulation by using the temporal sequences of online chat and logs in CSCL," *Learning and Instruction*, vol. 42, pp. 1–11, 2016.
- [16] K. Kreijns, P. A. Kirschner, and W. Jochems, "Identifying the pitfalls for social interaction in computer-supported collaborative learning environments : a review of the research," *Computers in Human Behavior*, vol. 19, pp. 335–353, May 2003.
- [17] A. Denisova and P. Cairns, "First Person vs. Third Person Perspective in Digital Games : Do Player Preferences Affect Immersion?," in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, (New York, NY, USA), pp. 145–148, Association for Computing Machinery, Apr. 2015.
- [18] W. Huang, R. D. Roscoe, S. D. Craig, and M. C. Johnson-Glenberg, "Extending the Cognitive-Affective Theory of Learning with Media in Virtual Reality Learning : A Structural Equation Modeling Approach," *Journal of Educational Computing Research*, vol. 60, no. 4, pp. 807–842, 2022. Publisher : SAGE Publications Inc.
- [19] M. Prensky, "The Emerging Online Life of the Digital Native," *Retrieved August*, vol. 7, no. 2008, pp. 253–263, 2004.
- [20] B. Trilling and C. Fadel, *21st century skills : Learning for life in our times*. Hoboken, NJ, US : Jossey-Bass/Wiley, 2009.
- [21] A. F. Hadwin, S. Järvelä, and M. Miller, "Self-regulated, co-regulated, and socially shared regulation of learning," in *Handbook of self-regulation of learning and performance*, Educational psychology handbook series, pp. 65–84, New York, NY, US : Routledge/Taylor & Francis Group, 2011.
- [22] S. De Freitas, G. Rebollo-Mendez, F. Liarakapis, G. Magoulas, and A. Poulouvassilis, "Learning as immersive experiences : Using the four-dimensional framework for designing and evaluating immersive learning experiences in a virtual world," *British Journal of Educational Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 69–85, 2010.
- [23] Z. Akyol and D. Garrison, "The development of a Community of Inquiry over time in an online course : Understanding the progression and integration of social, cognitive and teaching presence," *Journal of Asynchronous Learning Networks*, vol. 12, pp. 3–22, Dec. 2008.
- [24] H. Zhao, K. P. H. Sullivan, and I. Mellenius, "Participation, interaction and social presence : An exploratory study of collaboration in online peer review groups," *British Journal of Educational Technology*, vol. 45, pp. 807–819, Sept. 2014. Number : 5 Publisher : Wiley.
- [25] E. F. Churchill and D. Snowdon, "Collaborative virtual environments : An introductory review of issues and systems," *Virtual Reality*, vol. 3, pp. 3–15, Mar. 1998.

-
- [26] M. Slater, B. Spanlang, M. V. Sanchez-Vives, and O. Blanke, "First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality," *PLOS ONE*, vol. 5, p. e10564, May 2010.
- [27] R. L. Daft and R. H. Lengel, "Organizational information requirements, media richness and structural design," *Management Science*, vol. 32, no. 5, pp. 554–571, 1986.
- [28] J. Short, E. Williams, and B. Christie, "The social psychology of telecommunications," (*No Title*), 1976.
- [29] P. Bouvier, E. Lavoué, and K. Sehaba, "Defining engagement and characterizing engaged-behaviors in digital gaming," *Simulation & Gaming*, vol. 45, pp. 491–507, 2014.
- [30] G. Stahl, T. D. Koschmann, and D. D. Suthers, "Cscl : An historical perspective.," 2006.
- [31] F. Biocca, C. Harms, and J. K. Burgoon, "Toward a More Robust Theory and Measure of Social Presence : Review and Suggested Criteria," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 12, no. 5, pp. 456–480, 2003.
- [32] D. D. Suthers, N. Dwyer, R. Medina, and R. Vatrapi, "A framework for conceptualizing, representing, and analyzing distributed interaction," *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, vol. 5, pp. 5–42, 2010.
- [33] C. E. Hmelo-Silver, "Analyzing collaborative knowledge construction : Multiple methods for integrated understanding," *Computers & Education*, vol. 41, no. 4, pp. 397–420, 2003.
- [34] P. Reimann, "Time is precious : Variable-and event-centred approaches to process analysis in cscl research," *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, vol. 4, pp. 239–257, 2009.
- [35] E. Duval, "Attention please! learning analytics for visualization and recommendation," in *Proceedings of the 1st international conference on learning analytics and knowledge*, pp. 9–17, 2011.
- [36] J. Roschelle, "The construction of shared knowledge in collaborative problem solving," *Computer Supported Collaborative Learning/Springer-Verlag*, 1995.
- [37] C. A. Ellis, S. J. Gibbs, and G. Rein, "Groupware : some issues and experiences," *Communications of the ACM*, vol. 34, no. 1, pp. 39–58, 1991.
- [38] M. Laal and M. Laal, "Collaborative learning : what is it?," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 31, pp. 491–495, Jan. 2012.
- [39] D. W. Johnson and R. T. Johnson, *Learning together and alone : Cooperative, competitive, and individualistic learning*, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ, US. : Prentice-Hall, Inc, 1987.
- [40] K. Schmidt, "The problem with 'awareness' : Introductory remarks on 'awareness in CSCW,'" *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, vol. 11, no. 3, pp. 285–298, 2002.
- [41] N. Yuill and Y. Rogers, "Mechanisms for collaboration : A design and evaluation framework for multi-user interfaces," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 19, no. 1, pp. 1–25, 2012.

- [42] M. Vauras, T. Iiskala, A. Kajamies, R. Kinnunen, and E. Lehtinen, “Shared-regulation and motivation of collaborating peers : A case analysis,” *Psychologia : An International Journal of Psychology in the Orient*, vol. 46, no. 1, pp. 19–37, 2003. Place : Japan Publisher : Psychologia Society.
- [43] H. H. Clark and S. E. Brennan, “Grounding in communication,” in *Perspectives on socially shared cognition*, pp. 127–149, American Psychological Association, 1991.
- [44] D. H. Schunk and B. J. Zimmerman, *Motivation and self-regulated learning : Theory, research, and applications*. Motivation and self-regulated learning : Theory, research, and applications, Mahwah, NJ, US : Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2008. Pages : xi, 416.
- [45] S. JÄRVELÄ, S. VOLET, and H. JÄRVENOJA, “Research on Motivation in Collaborative Learning : Moving Beyond the Cognitive–Situative Divide and Combining Individual and Social Processes,” *Educational Psychologist*, vol. 45, pp. 15–27, Jan. 2010. Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/00461520903433539>.
- [46] A. Hadwin, S. Järvelä, and M. Miller, “Self-regulation, co-regulation and shared regulation in collaborative learning environments.,” Jan. 2017.
- [47] B. J. Zimmerman, “Self-Regulated Learning and Academic Achievement : An Overview,” *Educational Psychologist*, vol. 25, no. 1, pp. 3–17, 1990.
- [48] S. Järvelä and A. F. Hadwin, “New Frontiers : Regulating Learning in CSCL,” *Educational Psychologist*, vol. 48, no. 1, pp. 25–39, 2013.
- [49] F. Biocca and C. Harms, “Defining and measuring social presence : Contribution to the networked minds theory and measure,” in *In F.R. Gouveia, & F. Biocca (Eds). Proceedings of the 5th International Workshop on Presence*, pp. 7–36, 2002.
- [50] C. Heeter, “Being There : The Subjective Experience of Presence,” *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 1, p. 262, Jan. 1992.
- [51] M. Slater, M. Usoh, and A. Steed, “Depth of Presence in Virtual Environments,” *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 3, pp. 130–144, May 1994.
- [52] M. Lombard and T. Ditton, “At the Heart of It All : The Concept of Presence,” *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 3, no. 2, 1997.
- [53] K. E. Bystrom, W. Barfield, and C. Hendrix, “A conceptual model of the sense of presence in virtual environments,” *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 8, no. 2, pp. 241–244, 1999.
- [54] G. Gorisse, O. Christmann, E. A. Amato, and S. Richir, “First- and Third-Person Perspectives in Immersive Virtual Environments : Presence and Performance Analysis of Embodied Users,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 4, no. Article 33, p. 12, 2017. Publisher : Frontiers Media S.A.
- [55] R. E. Mayer, “Multimedia Learning,” July 2020. ISBN : 9781316941355 Publisher : Cambridge University Press.
- [56] A. Sacau, J. Laarni, and T. Hartmann, “Influence of individual factors on presence,” *Computers in Human Behavior*, vol. 24, pp. 2255–2273, Sept. 2008.
- [57] L. Caroux, K. Isbister, L. Le Bigot, and N. Vibert, “Player–video game interaction : A systematic review of current concepts,” *Computers in Human Behavior*, vol. 48, pp. 366–381, July 2015.

-
- [58] F. Biocca, “The Cyborg’s Dilemma : Progressive Embodiment in Virtual Environments [1],” *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 3, p. JCMC324, Sept. 1997.
 - [59] K. M. Lee, “Presence, Explicated,” *Communication Theory*, vol. 14, no. 1, pp. 27–50, 2004. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1468-2885.2004.tb00302.x>.
 - [60] S. E. Power, “Relative and Absolute Temporal Presence,” in *Philosophy and Psychology of Time* (B. Mölder, V. Arstila, and P. Øhrstrøm, eds.), Studies in Brain and Mind, pp. 69–100, Cham : Springer International Publishing, 2016.
 - [61] K. Nowak and F. Biocca, “Understanding The Influence of Agency and Anthropomorphism on Copresence, Social Presence and Physical Presence With Virtual Humans Kristine Nowak,” Nov. 2001.
 - [62] G. Botterill and P. Carruthers, *The philosophy of psychology*. Cambridge, U.K. ; New York : Cambridge University Press, 1999.
 - [63] P. Carruthers and P. K. Smith, *Theories of Theories of Mind*. Cambridge University Press, 1996.
 - [64] S. Planalp and J. M. Honeycutt, “Events that Increase Uncertainty in Personal Relationships,” *Human Communication Research*, vol. 11, pp. 593–604, June 1985.
 - [65] J. v. Brocke, A. Simons, B. Niehaves, B. Niehaves, and K. Reimer, “Reconstructing the giant : On the importance of rigour in documenting the literature search process.,” 2009.
 - [66] P. Brereton, B. A. Kitchenham, D. Budgen, M. Turner, and M. Khalil, “Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain,” *Journal of Systems and Software*, vol. 80, no. 4, pp. 571–583, 2007.
 - [67] C. Schrader, “The relation between virtual presence and learning outcomes in serious games - The mediating effect of motivation,” *Interaction Design and Architecture(s)*, vol. 19, no. 1, pp. 38–46, 2014.
 - [68] J. Rowe, L. Shores, B. Mott, and J. Lester, “Integrating learning, problem solving, and engagement in narrative-centered learning environments,” *Proceedings of the 28th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science*, vol. 21, no. 1-2, pp. 115–133, 2011.
 - [69] C. Uz-Bilgin and M. Thompson, “Processing presence : how users develop spatial presence through an immersive virtual reality game,” *Virtual Reality*, vol. 26, no. 2, pp. 649–658, 2022. Publisher : Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
 - [70] M. C. Johnson-Glenberg, H. Bartolomea, and E. Kalina, “Platform is not destiny : Embodied learning effects comparing 2D desktop to 3D virtual reality STEM experiences,” *Journal of Computer Assisted Learning*, vol. 37, pp. 1263–1284, Oct. 2021.
 - [71] V. Souza, A. Maciel, L. Nedel, R. Kopper, K. Loges, and E. Schlemmer, “The Effect of Virtual Reality on Knowledge Transfer and Retention in Collaborative Group-Based Learning for Neuroanatomy Students,” in *Proc. - Symp. Virtual Augment. Real., SVR*, pp. 92–101, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. Journal Abbreviation : Proc. - Symp. Virtual Augment. Real., SVR.

- [72] Z.-H. Chen, H.-D. Lu, and C.-H. Lu, "The Effects of Human Factors on the Use of Avatars in Game-Based Learning : Customization vs. Non-Customization," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 35, no. 4-5, pp. 384–394, 2019. Publisher : Taylor and Francis Inc.
- [73] P. Apostolellis and D. Bowman, "Audience involvement and agency in digital games : Effects on learning, game experience, and social presence," in *Proceedings of the The 15th International Conference on Interaction Design and Children*, pp. 299–310, 2016.
- [74] K. Oksanen and R. Hämmäläinen, "Perceived sociability and social presence in a collaborative serious game," *International Journal of Game-Based Learning (IJGBL)*, vol. 3, no. 1, pp. 34–50, 2013.
- [75] R. Martey, K. Kenski, J. Folkestad, L. Feldman, E. Gordis, A. Shaw, J. Stromer-Galley, B. Clegg, H. Zhang, N. Kaufman, A. Rabkin, S. Shaikh, and T. Strzalkowski, "Measuring Game Engagement : Multiple Methods and Construct Complexity," *Simulation and Gaming*, vol. 45, pp. 528–547, 2014.
- [76] F. Corelli, E. Battegazzorre, F. Strada, A. Bottino, and G. Cimellaro, "Assessing the usability of different virtual reality systems for firefighter training," in *VISIGRAPP*, vol. 2, pp. 146–153, SciTePress, 2020.
- [77] G. De Leo, L. Diggs, E. Radici, and T. Mastaglio, "Measuring sense of presence and user characteristics to predict effective training in an online simulated virtual environment," *Simulation in Healthcare*, vol. 9, no. 1, pp. 1–6, 2014.
- [78] C. Bachen, P. Hernández-Ramos, C. Raphael, and A. Waldron, "How do presence, flow, and character identification affect players' empathy and interest in learning from a serious computer game?," *Computers in Human Behavior*, vol. 64, pp. 77–87, 2016.
- [79] H.-G. Lee, S. Chun, and W.-H. Lee, "Presence in virtual golf simulators : The effects of presence on perceived enjoyment, perceived value, and behavioral intention," *New media society*, vol. 15, no. 6, pp. 930–946, 2013.
- [80] O. Caldas, O. Aviles, and C. Rodriguez-Guerrero, "Effects of Presence and Challenge Variations on Emotional Engagement in Immersive Virtual Environments," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 1109–1116, 2020. Publisher : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [81] W. Oliveira, M. Tizuka, E. Chua, D. Trevisan, and L. Salgado, *Virtual and Real Body Representation in Mixed Reality : An Analysis of Self-presence and Immersive Environments*, vol. 11863 LNCS. Springer, 2019. Journal Abbreviation : Lect. Notes Comput. Sci. Pages : 54 Publication Title : Lect. Notes Comput. Sci.
- [82] H. Zarglayoun, J. Laurendeau-Martin, A. Tato, E. Vera-Estay, A. Blondin, A. Lamy-Brunelle, S. Chaieb, F. Morasse, A. Dufresne, R. Nkambou, and M. Beauchamp, "Assessing and Optimizing Socio-Moral Reasoning Skills : Findings From the MoralALERT Serious Video Game," *Frontiers in Psychology*, vol. 12, 2022. Publisher : Frontiers Media S.A.
- [83] H. Lane, M. Hays, D. Auerbach, and M. Core, "Investigating the relationship between presence and learning in a serious game," *Intelligent Tutoring Systems : 10th International Conference,,* 2010.

-
- [84] A. Basille, E. Lavoué, and A. Serna, “Impact of viewpoint on social presence and collaborative processes in a collaborative serious game,” in *International Conference on Computer Supported Education, CSEDU*, vol. 2, p. 614 – 621, 2022.
 - [85] C. S. Oh, J. N. Bailenson, and G. F. Welch, “A Systematic Review of Social Presence : Definition, Antecedents, and Implications,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 5, 2018.
 - [86] H. G. Debarba, E. Molla, B. Herbelin, and R. Boulic, “Characterizing embodied interaction in First and Third Person Perspective viewpoints,” in *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 67–72, IEEE, Mar. 2015.
 - [87] B. E. Insko, “Measuring presence : Subjective, behavioral and physiological methods,” in *Being there : Concepts, effects and measurements of user presence in synthetic environments*, Studies in new technologies and practices in communication, pp. 109–119, Amsterdam, Netherlands : IOS Press, 2003.
 - [88] S. Grassini and K. Laumann, “Questionnaire Measures and Physiological Correlates of Presence : A Systematic Review,” *Frontiers in Psychology*, vol. 11, 2020.
 - [89] J. Lessiter, J. Freeman, E. Keogh, and J. Davidoff, “A Cross-Media Presence Questionnaire : The ITC-Sense of Presence Inventory,” *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 10, pp. 282–297, June 2001.
 - [90] R. S. Kalawsky, “VRUSE—a computerised diagnostic tool : for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems,” *Applied Ergonomics*, vol. 30, pp. 11–25, Feb. 1999.
 - [91] d. Kort, Y.A.W., W. IJsselsteijn, and K. Poels, “Digital games as social presence technology : development of the social presence in gaming questionnaire (SPGQ) : 10th Annual International Workshop on Presence (PRESENCE 2007), October 25–27, 2007, Barcelona, Spain,” *Proceedings of the 10th Annual International Workshop on Presence, October 25-27, 2007*, pp. 195–203, 2007. Place : Barcelona Publisher : Starlab.
 - [92] M. Lombard, T. B. Ditton, and L. Weinstein, “Measuring Presence : The Temple Presence Inventory,” *Proceedings of the 12th annual international workshop on presence*, p. 15, 2009.
 - [93] B. G. Witmer and M. J. Singer, “Measuring Presence in Virtual Environments : A Presence Questionnaire,” *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 7, pp. 225–240, June 1998.
 - [94] M.-T. Cheng, H.-C. She, and L. Annetta, “Game immersion experience : its hierarchical structure and impact on game-based science learning,” *Journal of Computer Assisted Learning*, vol. 31, no. 3, pp. 232–253, 2015. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jcal.12066>.
 - [95] P. Vorderer, W. Wirth, F. R. Gouveia, F. Biocca, T. Saari, and L. Jäncke, “Mec spatial presence questionnaire (mec-spq) short documentation and instructions for application,” *Technical report, Report for the European Comission*, vol. IST Programme ‘Presence Research Activites, p. 14, 2004.
 - [96] W. IJsselsteijn, Y. de Kort, and K. Poels, *The Game Experience Questionnaire*. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2013.

- [97] M. Slater, C. Guger, G. Edlinger, R. Leeb, G. Pfurtscheller, A. Antley, M. Garau, A. Brogni, and D. Friedman, "Analysis of Physiological Responses to a Social Situation in an Immersive Virtual Environment," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 15, pp. 553–569, Oct. 2006.
- [98] T. Baumgartner, D. Speck, D. Wettstein, O. Masnari, G. Beeli, and L. Jäncke, "Feeling Present in Arousing Virtual Reality Worlds : Prefrontal Brain Regions Differentially Orchestrate Presence Experience in Adults and Children," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 2, p. 8, Aug. 2008.
- [99] P. Bouvier, E. Lavoué, K. Sehaba, and S. George, "Identifying learner's engagement in learning games : A qualitative approach based on learner's traces of interaction," in *5th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2013)*, pp. 339–350, 2013.
- [100] E. Lavoué, Q. Ju, S. Hallifax, and A. Serna, "Analyzing the relationships between learners' motivation and observable engaged behaviors in a gamified learning environment," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 154, p. 102670, 2021. Publisher : Elsevier.
- [101] C. I. Johnson, S. K. T. Bailey, B. L. Schroeder, and M. D. Marraffino, "Procedural Learning in Virtual Reality : The Role of Immersion, Interactivity, and Spatial Ability," *Technology, Mind, and Behavior*, vol. 3, nov 9 2022. <https://tmb.apaopen.org/pub/yfb3jhhq8>.
- [102] G. Makransky and G. B. Petersen, "The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL) : a Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality," *Educational Psychology Review*, vol. 33, pp. 937–958, Sept. 2021.
- [103] K. A. Fletcher, V. L. Hicks, R. H. Johnson, D. M. Laverentz, C. J. Phillips, L. N. Pierce, D. L. Wilhoite, and J. E. Gay, "A Concept Analysis of Conceptual Learning : A Guide for Educators," *Journal of Nursing Education*, vol. 58, no. 1, pp. 7–15, 2019.
- [104] F. Cornali, "Training and developing soft skills in higher education," *Fourth International Conference on Higher Education Advances*, pp. 961–967, May 2018.
- [105] Z. Zainuddin, S. K. W. Chu, M. Shujahat, and C. J. Perera, "The impact of gamification on learning and instruction : A systematic review of empirical evidence," *Educational Research Review*, vol. 30, p. 100326, June 2020.
- [106] D. Garrison, M. Cleveland-Innes, and T. Fung, "Exploring causal relationships among teaching, cognitive and social presence : student perceptions of the Community of Inquiry framework," *The Internet and Higher Education*, vol. 13, pp. 31–36, Jan. 2010.
- [107] K. Kreijns, P. Kirschner, W. Jochems, and H. Buuren, "Measuring perceived sociability of computer-supported collaborative learning environments," *Computers & Education*, vol. 49, pp. 176–192, Sept. 2007.
- [108] G. Bente, S. Rüggenberg, N. C. Krämer, and F. Eschenburg, "Avatar-Mediated Networking : Increasing Social Presence and Interpersonal Trust in Net-Based Collaborations," *Human Communication Research*, vol. 34, no. 2, pp. 287–318, 2008.
- [109] R. Rouse, "What's your perspective?," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 33, pp. 9–12, Aug. 1999.

-
- [110] L. N. Taylor, "VIDEO GAMES : PERSPECTIVE, POINT-OF-VIEW, AND IMMERSION," 2002.
 - [111] V. I. Petkova, M. Khoshnevis, and H. H. Ehrsson, "The Perspective Matters! Multisensory Integration in Ego-Centric Reference Frames Determines Full-Body Ownership," *Frontiers in Psychology*, vol. 2, 2011. Publisher : Frontiers.
 - [112] P. F. Biocca and P. C. Harms, "Networked minds social presence inventory : |(scales only, version 1.2) measures of co-presence, social presence, subjective symmetry, and intersubjective symmetry." 2003.
 - [113] H. Kim, K.-S. Suh, and U.-K. Lee, "Effects of collaborative online shopping on shopping experience through social and relational perspectives," *Information & Management*, vol. 50, no. 4, pp. 169–180, 2013.
 - [114] M. T. H. Chi, "Active-Constructive-Interactive : A Conceptual Framework for Differentiating Learning Activities," *Topics in Cognitive Science*, vol. 1, pp. 73–105, Jan. 2009.
 - [115] P. H. Winne, A. F. Hadwin, and C. Gress, "The learning kit project : Software tools for supporting and researching regulation of collaborative learning," *Computers in Human Behavior*, vol. 26, pp. 787–793, Sept. 2010.
 - [116] P. A. Kirschner, F. Kirschner, and J. Janssen, "The Collaboration Principle in Multimedia Learning," in *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (R. E. Mayer, ed.), Cambridge Handbooks in Psychology, pp. 547–575, Cambridge : Cambridge University Press, 2 ed., 2014.
 - [117] D. W. Johnson and R. T. Johnson, *Learning Together and Alone : Cooperative, Competitive, and Individualistic Learning*. Allyn and Bacon, 5th ed. ed., 1999. Google-Books-ID : lh8iAQAAIAAJ.
 - [118] G. Stahl, "Building Collaborative Knowing : elements of a social theory of CSCL.," in *What We Know About CSCL : And Implementing It In Higher Education* (J.-W. Strijbos, P. A. Kirschner, and R. L. Martens, eds.), Computer-Supported Collaborative Learning Series, pp. 53–85, Dordrecht : Springer Netherlands, 2004.
 - [119] Y. Fu, "Improve collaboration skills using cyber-enabled learning environment," in *Curriculum Design and Classroom Management : Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, pp. 1419–1435, IGI Global, 2015.
 - [120] R. Hertz-Lazarowitz and I. Bar-Natan, "Writing development of Arab and Jewish students using cooperative learning (CL) and computer-mediated communication (CMC)," *Computers & Education*, vol. 39, pp. 19–36, Aug. 2002.
 - [121] J. Fjermestad, "An analysis of communication mode in group support systems research," *Decision Support Systems*, vol. 37, pp. 239–263, May 2004.
 - [122] J. Janssen, G. Erkens, G. Kanselaar, and J. Jaspers, "Visualization of participation : Does it contribute to successful computer-supported collaborative learning?," *Computers & Education*, vol. 49, pp. 1037–1065, Dec. 2007.
 - [123] S. Järvelä, H. Järvenoja, and M. Veermans, "Understanding the dynamics of motivation in socially shared learning," *International Journal of Educational Research*, vol. 47, pp. 122–135, Jan. 2008.

- [124] L. F. Thompson and M. D. Coovert, “Teamwork online : The effects of computer conferencing on perceived confusion, satisfaction and postdiscussion accuracy,” *Group Dynamics : Theory, Research, and Practice*, vol. 7, no. 2, pp. 135–151, 2003. Place : US Publisher : Educational Publishing Foundation.
- [125] S. G. Straus, “Technology, Group Process, and Group Outcomes : Testing the Connections in Computer-Mediated and Face-to-Face Groups,” *Human-Computer Interaction*, vol. 12, pp. 227–266, Jan. 1997. Publisher : Taylor & Francis _eprint : https://doi.org/10.1207/s15327051hci1203_1.
- [126] L. Lipponen, M. Rahikainen, J. Lallimo, and K. Hakkarainen, “Patterns of participation and discourse in elementary students’ computer-supported collaborative learning,” *Learning and Instruction*, vol. 13, pp. 487–509, Oct. 2003.
- [127] S. G. Straus and J. E. McGrath, “Does the medium matter ? The interaction of task type and technology on group performance and member reactions,” *Journal of Applied Psychology*, vol. 79, no. 1, pp. 87–97, 1994. Place : US Publisher : American Psychological Association.
- [128] B. B. Baltes, M. W. Dickson, M. P. Sherman, C. C. Bauer, and J. S. La-Ganke, “Computer-Mediated Communication and Group Decision Making : A Meta-Analysis,” *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol. 87, pp. 156–179, Jan. 2002.
- [129] B. Gros, “Instructional design for Computer-Supported Collaborative Learning in primary and secondary school,” *Computers in Human Behavior*, vol. 17, pp. 439–451, Sept. 2001.
- [130] X. Huang, “Improving Communicative Competence through Synchronous Communication in Computer-Supported Collaborative Learning Environments : A Systematic Review,” *Education Sciences*, vol. 8, p. 15, Mar. 2018. Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [131] P. De Greef and W. A. Ijsselsteijn, “Social Presence in a Home Tele-Application,” *CyberPsychology & Behavior*, vol. 4, no. 2, pp. 307–315, 2001.
- [132] P. De Greef, “Video communication best for female friends ? : ISPR 2014 : 15th International Workshop on Presence (PRESENCE 2014),” *Challenging Presence : Proceedings of the International Society for Presence Research (ISPR 2014), 17-19 March 2014, Wien, Austria*, pp. 187–193, 2014.
- [133] C. Bullard, A. Kansal, and J. Freeman, “Comparing Chat Methods for Remote Collaborative Live-Coding Music,” in *Proceedings of the 16th International Audio Mostly Conference*, AM ’21, (New York, NY, USA), pp. 200–203, Association for Computing Machinery, 2021.
- [134] S. Järvelä, P. A. Kirschner, E. Panadero, J. Malmberg, C. Phielix, J. Jaspers, M. Koivuniemi, and H. Järvenoja, “Enhancing Socially Shared Regulation in Collaborative Learning Groups : Designing for CSCL Regulation Tools,” *Educational Technology Research and Development*, vol. 63, pp. 125–142, Feb. 2015.
- [135] S. Casale, G. Fiovaranti, and S. Caplan, “Online Disinhibition,” *Journal of Media Psychology*, vol. 27, no. 4, pp. 170–177, 2015.

- [136] S. Kiesler, J. Siegel, and T. W. McGuire, "Social psychological aspects of computer-mediated communication," *American Psychologist*, vol. 39, no. 10, pp. 1123–1134, 1984.
- [137] S. Wu, T.-C. Lin, and J.-F. Shih, "Examining the antecedents of online disinhibition," *Information Technology & People*, vol. 30, no. 1, pp. 189–209, 2017.
- [138] L. C. Tidwell and J. B. Walther, "Computer-Mediated Communication Effects on Disclosure, Impressions, and Interpersonal Evaluations : Getting to Know One Another a Bit at a Time," *Human Communication Research*, vol. 28, no. 3, pp. 317–348, 2002.
- [139] J. B. Walther, "Computer-Mediated Communication : Impersonal, Interpersonal, and Hyperpersonal Interaction," *Communication Research*, vol. 23, no. 1, pp. 3–43, 1996.
- [140] S. Järvelä, J. Malmberg, E. Haataja, M. Sobocinski, and P. A. Kirschner, "What multimodal data can tell us about the students' regulation of their learning process?," *Learning and Instruction*, vol. 72, p. 101203, 2021.
- [141] J. B. Walther, "Interpersonal effects in computer-mediated interaction : A relational perspective," *Communication Research*, vol. 19, no. 1, pp. 52–90, 1992.
- [142] P. Skalski and R. Tamborini, "The Role of Social Presence in Interactive Agent-Based Persuasion," *Media Psychology*, vol. 10, no. 3, pp. 385–413, 2007.
- [143] P. Skalski and R. Whitbred, "Image versus sound : A comparison of formal feature effects on presence and video game enjoyment," *PsychNology Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 67–84, 2010. Place : Italy Publisher : PsychNology Journal.
- [144] J. Kim, H. Kim, B. K. Tay, M. Muniyandi, M. A. Srinivasan, J. Jordan, J. Mortensen, M. Oliveira, and M. Slater, "Transatlantic Touch : A Study of Haptic Collaboration over Long Distance," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 13, no. 3, pp. 328–337, 2004.
- [145] M.-H. Cho and D. Shen, "Self-regulation in online learning," *Distance education*, vol. 34, no. 3, pp. 290–301, 2013.
- [146] C. N. Gunawardena, "Social presence theory and implications for interaction and collaborative learning in computer conferences," *International journal of educational telecommunications*, vol. 1, no. 2, pp. 147–166, 1995.
- [147] I. Molenaar and M. M. Chiu, "Dissecting sequences of regulation and cognition : statistical discourse analysis of primary school children's collaborative learning," *Metacognition and Learning*, vol. 9, pp. 137–160, Aug. 2014.
- [148] N. Nistor and Hernández-García, "What types of data are used in learning analytics ? An overview of six cases," *Computers in Human Behavior*, vol. 89, pp. 335–338, Dec. 2018.
- [149] O. Viberg, M. Hatakka, O. Bälter, and A. Mavroudi, "The current landscape of learning analytics in higher education," *Computers in Human Behavior*, vol. 89, pp. 98–110, Dec. 2018.
- [150] S. Chandrasegaran, C. Bryan, H. Shidara, T.-Y. Chuang, and K.-L. Ma, "Talk-Traces : Real-Time Capture and Visualization of Verbal Content in Meetings," in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, (Glasgow Scotland Uk), pp. 1–14, ACM, May 2019.

- [151] S. Praharaj, M. Scheffel, M. Schmitz, M. Specht, and H. Drachsler, "Towards Automatic Collaboration Analytics for Group Speech Data Using Learning Analytics," *Sensors*, vol. 21, p. 3156, Jan. 2021. Number : 9 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [152] T. Kim, A. Chang, L. Holland, and A. S. Pentland, "Meeting mediator : enhancing group collaboration using sociometric feedback," in *Proceedings of the 2008 ACM conference on Computer supported cooperative work, CSCW '08*, (New York, NY, USA), pp. 457–466, Association for Computing Machinery, Nov. 2008.
- [153] K. Bachour, F. Kaplan, and P. Dillenbourg, "An Interactive Table for Supporting Participation Balance in Face-to-Face Collaborative Learning," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 3, pp. 203–213, July 2010. Conference Name : IEEE Transactions on Learning Technologies.
- [154] T. Bergstrom and K. Karahalios, "Conversation Clock : Visualizing audio patterns in co-located groups," in *2007 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'07)*, pp. 78–78, Jan. 2007. ISSN : 1530-1605.
- [155] S. Praharaj, M. Scheffel, H. Drachsler, and M. Specht, "Group Coach for Co-located Collaboration," in *Transforming Learning with Meaningful Technologies* (M. Scheffel, J. Broisin, V. Pammer-Schindler, A. Ioannou, and J. Schneider, eds.), Lecture Notes in Computer Science, (Cham), pp. 732–736, Springer International Publishing, 2019.
- [156] J. Kim, K. P. Truong, V. Charisi, C. Zaga, M. Lohse, D. Heylen, and V. Evers, "Vocal turn-taking patterns in groups of children performing collaborative tasks : an exploratory study," in *Interspeech 2015*, pp. 1645–1649, ISCA, Sept. 2015.
- [157] C. Sun, V. J. Shute, A. Stewart, J. Yonehiro, N. Duran, and S. D'Mello, "Towards a generalized competency model of collaborative problem solving," *Computers Education*, vol. 143, p. 103672, 2020.
- [158] D. Sidtis and J. Kreiman, "In the Beginning Was the Familiar Voice : Personally Familiar Voices in the Evolutionary and Contemporary Biology of Communication," *Integrative Psychological and Behavioral Science*, vol. 46, pp. 146–159, June 2012.
- [159] J. Appel, A. von der Pütten, N. C. Krämer, and J. Gratch, "Does Humanity Matter ? Analyzing the Importance of Social Cues and Perceived Agency of a Computer System for the Emergence of Social Reactions during Human-Computer Interaction," *Advances in Human-Computer Interaction*, vol. 2012, 2012.
- [160] B. E. Erlandson, B. C. Nelson, and W. C. Savenye, "Collaboration modality, cognitive load, and science inquiry learning in virtual inquiry environments," *Educational Technology Research and Development*, vol. 58, no. 6, pp. 693–710, 2010.
- [161] J. N. Bailenson, N. Yee, D. Merget, and R. Schroeder, "The Effect of Behavioral Realism and Form Realism of Real-Time Avatar Faces on Verbal Disclosure, Non-verbal Disclosure, Emotion Recognition, and Copresence in Dyadic Interaction," *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 15, no. 4, pp. 359–372, 2006.
- [162] B. D. Homer, J. L. Plass, and L. Blake, "The effects of video on cognitive load and social presence in multimedia-learning," *Computers in Human Behavior*, vol. 24, no. 3, pp. 786–797, 2008.

-
- [163] E.-L. Sallnäs, “Effects of Communication Mode on Social Presence, Virtual Presence, and Performance in Collaborative Virtual Environments,” *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 14, no. 4, pp. 434–449, 2005.
 - [164] J. L. Plass, R. Moreno, and R. Brünken, *Cognitive Load Theory*. Cambridge University Press, Apr. 2010. Google-Books-ID : mFJe8ZnAb3EC.
 - [165] K. Sekiyama and Y. Sugita, “Auditory-visual speech perception examined by functional MRI and reaction time,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, p. 2706, Nov. 2001.
 - [166] R. Brünken, J. L. Plass, and D. Leutner, “Assessment of Cognitive Load in Multimedia Learning with Dual-Task Methodology : Auditory Load and Modality Effects,” *Instructional Science*, vol. 32, no. 1/2, pp. 115–132, 2004.
 - [167] C. A. Roos, T. Postmes, and N. Koudenburg, “The microdynamics of social regulation : Comparing the navigation of disagreements in text-based online and face-to-face discussions,” *Group Processes & Intergroup Relations*, vol. 23, no. 6, pp. 902–917, 2020.
 - [168] A. Ramirez, Jr., J. B. Walther, J. K. Burgoon, and M. Sunnafrank, “Information-Seeking Strategies, Uncertainty, and Computer-Mediated Communication : Toward a Conceptual Model,” *Human Communication Research*, vol. 28, no. 2, pp. 213–228, 2002.
 - [169] D. W. Johnson and R. T. Johnson, “An Educational Psychology Success Story : Social Interdependence Theory and Cooperative Learning,” *Educational Researcher*, vol. 38, no. 5, pp. 365–379, 2009.
 - [170] M. Saqr and A. Alamro, “The role of social network analysis as a learning analytics tool in online problem based learning,” *BMC medical education*, vol. 19, pp. 1–11, 2019.
 - [171] H. Jeong, G. Biswas, J. Johnson, and L. Howard, “Analysis of productive learning behaviors in a structured inquiry cycle using hidden markov models,” in *Educational Data Mining 2010*, 2010.
 - [172] M. Köck and A. Paramythis, “Activity sequence modelling and dynamic clustering for personalized e-learning,” *User Modeling and User-Adapted Interaction*, vol. 21, pp. 51–97, 2011.
 - [173] A. Hawlitschek and V. Köppen, “Analyzing player behavior in digital game-based learning : Advantages and challenges,” in *8th European Conference on Games Based Learning : ECGBL2014*, pp. 199–206, 2014.
 - [174] A. Gabbiadini and T. Greitemeyer, “Uncovering the association between strategy video games and self-regulation : A correlational study,” *Personality and Individual Differences*, vol. 104, pp. 129–136, 2017.
 - [175] A. Drachen, A. Canossa, and J. R. M. Sørensen, “Gameplay metrics in game user research : Examples from the trenches,” in *Game analytics : Maximizing the value of player data*, pp. 285–319, Springer, 2013.
 - [176] A. Radford, J. W. Kim, T. Xu, G. Brockman, C. McLeavey, and I. Sutskever, “Robust speech recognition via large-scale weak supervision,” in *International conference on machine learning*, pp. 28492–28518, PMLR, 2023.

- [177] L. Martin, B. Muller, P. J. O. Suárez, Y. Dupont, L. Romary, E. V. de La Clergerie, B. Sagot, and D. Seddah, “Les modèles de langue contextuels camembert pour le français : impact de la taille et de l’hétérogénéité des données d’entraînement,” in *JEP-TALN-RECITAL 2020-33ème Journées d’Études sur la Parole, 27ème Conférence sur le Traitement Automatique des Langues Naturelles, 22ème Rencontre des Étudiants Chercheurs en Informatique pour le Traitement Automatique des Langues*, pp. 54–65, ATALA ; AFCP, 2020.
- [178] I. Herman, G. Melançon, and M. S. Marshall, “Graph visualization and navigation in information visualization : A survey,” *IEEE Transactions on visualization and computer graphics*, vol. 6, no. 1, pp. 24–43, 2000.
- [179] R. Kraut and S. Kiesler, “The social impact of internet use,” *Psychological Science Agenda*, vol. 16, no. 3, pp. 8–10, 2003.
- [180] P. Dillenbourg and P. Tchounikine, “Flexibility in macro-scripts for computer-supported collaborative learning,” *Journal of computer assisted learning*, vol. 23, no. 1, pp. 1–13, 2007.
- [181] P. Dourish and V. Bellotti, “Awareness and coordination in shared workspaces,” in *Proceedings of the 1992 ACM conference on Computer-supported cooperative work*, pp. 107–114, 1992.
- [182] G. Stahl, *Group cognition : Computer support for building collaborative knowledge (acting with technology)*. The MIT Press, 2006.
- [183] A. R. Dennis, R. M. Fuller, and J. S. Valacich, “Media, tasks, and communication processes : A theory of media synchronicity,” *MIS quarterly*, pp. 575–600, 2008.

Abstract :

In the context of computer-mediated collaborative learning environments, the effectiveness of learner interactions remains a central concern. This thesis investigates the factors influencing collaboration and the sense of social presence in collaborative serious games, with a particular focus on the impact of virtual environment characteristics.

Two experimental studies examined the effects of perspective (first-person vs. third-person) and communication modalities (text, audio, video). The first-person perspective fostered more effective information sharing, while the audio modality enhanced social presence and co-regulation.

To better understand collaborative dynamics, we developed an analytical approach combining interaction trace analysis, content analysis, and machine learning techniques. A sequence of frequency analyses, co-occurrence network analysis, and Markov chain modeling revealed specific patterns in the organization of collaborative activities. This methodology enabled a fine-grained comparison of communication modalities.

The findings highlight the crucial role of social presence as a mediator between the properties of virtual environments and collaborative behaviors, opening new avenues for the design of learning environments that more effectively support collaboration.

Résumé :

Dans le contexte des environnements d'apprentissage collaboratif médiatisés par ordinateur, la question de l'efficacité des interactions entre apprenants reste centrale. Cette thèse explore les facteurs influençant la collaboration et le sentiment de présence sociale dans les jeux sérieux collaboratifs, en s'intéressant à l'impact des caractéristiques de l'environnement virtuel.

Deux études expérimentales ont examiné l'effet du point de vue (1re vs 3e personne) et des modalités de communication (texte, audio, vidéo). Le point de vue à la première personne a favorisé un meilleur partage d'informations, tandis que la modalité audio a renforcé la présence sociale et la co-régulation.

Pour mieux comprendre les dynamiques collaboratives, nous avons conçu une approche analytique alliant l'analyse des traces d'interaction, du contenu des échanges, et des méthodes d'apprentissage automatique. L'enchaînement d'analyses fréquentielles, de réseaux de co-occurrences et de modélisation par chaînes de Markov a permis de dégager des schémas spécifiques d'organisation des activités. Cette méthodologie a permis une comparaison fine des modalités de communication.

Les résultats soulignent le rôle déterminant de la présence sociale comme médiateur entre les propriétés des environnements virtuels et les comportements collaboratifs, ouvrant des pistes pour la conception d'environnements d'apprentissage plus propices à la collaboration.