Elsa Parrot

Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée

----

PARROT Elsa. *Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée*, sous la direction d'Hervé Piegay. - Lyon : Université Jean Moulin (Lyon 3), 2015.
Disponible sur : www.theses.fr/2015LYO30054

Document diffusé sous le contrat Creative Commons « Paternité – 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.

THESE DE DOCTORAT

en

GEOMORPHOLOGIE FLUVIALE

présentée par

PARROT ELSA

ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DE LA MORPHOLOGIE DU CHENAL DU RHÔNE DU LEMAN A LA MEDITERRANEE

Soutenue publiquement le 17 décembre 2015 à 14h à Lyon devant le jury composé de :

Hervé PIEGAY	Directeur de Recherches CNRS, ENS de Lyon	Directeur
Michal TAL	Maître de conférence, Aix-Marseille Université, CEREGE	Encadrante
Gilles ARNAUD-FASSETTA	Professeur, Université Paris-Diderot	Rapporteur
Sylvain REYNAUD	Ingénieur, Compagnie Nationale du Rhône	Examinateur
Stéphane RODRIGUES	Professeur, Université François Rabelais de Tours	Rapporteur
Michaël Bliss SINGER	Lecturer, University of Saint Andrews, Scotland	Examinateur

Résumé

Analyse spatiale et temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée

Cette thèse étudie l'organisation longitudinale du lit du Rhône français et son évolution depuis plus d'un siècle afin d'améliorer la gestion des sédiments du fleuve. Elle décrit d'abord la complexité géographique, géologique, et hydrologique des 512 km du système fluvial. Les extractions, l'endiguement, la chenalisation et les aménagements hydroélectriques ont simplifié le tracé latéral du chenal, incisé et pavé le fond du lit et appauvri les habitats aquatiques et riverains. La thèse caractérise ensuite plus précisément les dynamiques de fond. Elle repose sur des données bathymétriques de 1897-2010 et sur des données granulométriques issues de plus de 300 prélèvements réalisés dans le cadre de ces travaux sur l'ensemble du linéaire. Un protocole d'échantillonnage homogène a été spécialement élaboré. Les variations altimétriques du lit (zones de stockage-érosion et faciès morphologiques) et sa composition granulométrique (zones pavées ou comblées par des fines) ont été caractérisées afin d'évaluer la mobilité potentielle de la charge de fond, les apports des affluents et l'impact des ouvrages sur les conditions de transport. Il ressort 1) que l'incision du lit est principalement due à la chenalisation, 2) que les aménagements hydroélectriques ont compartimenté le continuum en provoquant le stockage de sédiments fins dans certaines retenues et en favorisant le pavage dans les vieux Rhône à l'aval de Lyon et 3) qu'une dynamique résiduelle subsiste lors de crues majeures avec une remobilisation modérée de la charge de fond. Les données des secteurs les plus pavés ont été intégrées dans un modèle hydraulique 1D permettant de quantifier la capacité de transport et le débit solide et confirmant les résultats précédents. Ces travaux permettent de formuler des recommandations de gestion durable et de restauration écologique du fleuve telles que l'ouverture des vannes de fond en crue, la modification des consignes aux barrages ou la réinjection de graviers.

Mots clés : Rhône, profil en long, faciès morphologique, distribution granulométrique, protocole d'échantillonnage, capacité de transport, extractions, barrages, casiers Girardon, restauration écologique.

Abstract

Spatio-temporal analysis of the Rhone channel morphology from Geneva Lake to the Mediterranean Sea.

This thesis studies the French Rhone riverbed longitudinal organisation and its evolution over a century, with a view to improve the management strategy for the sediments. It first describes the geographic, geologic and hydrologic peculiarities of the 512-km long fluvial system. Gravel mining, dikes construction, channelization and dams construction have simplified the lateral pattern of the channel, incised and paved the riverbed and impoverished the aquatic and riparian habitats. The thesis then more precisely characterizes the riverbed dynamics. It relies on bathymetric data collected since 1897 and on grainsize data collected specifically for this study from over 300 samples on the whole 512-km river length. An homogeneous sampling protocol was elaborated on purpose. The vertical bed evolution and grainsize distribution were analysed to assess the riverbed potential mobility, tributaries' sediment recharge and infrastructures' impact on sediment transport. It thus appears that 1) riverbed incision is mainly due to channelization, 2) hydroelectric dams partitioned the continuum with the accumulation of fine sediments in some backwaters and the pavement of bypassed reaches downstream of Lyon and 3) a residual dynamic persists during major floods, with moderate gravels transport. The data of paved reaches were used in a 1D hydraulic model to quantify transport capacity and bedload discharge, confirming the aforementioned results. This study helps formulate such recommendations for sustainable river management and ecological restoration as opening slush gates during floods, changing dams management instructions or reinjecting gravel.

Keywords : Rhone River, long profile, bedforms, grainsize distribution, homogeneous sampling protocol, transport capacity, gravel mining, dams, Girardon groynes system, ecological restoration.

Remerciements

Cette partie est l'occasion pour moi de remercier toutes les personnes que j'ai pu rencontrer durant ma thèse, qui m'ont soutenue, scientifiquement, techniquement ou financièrement, mais qui m'ont aussi encouragée, de près comme de loin. Je tiens donc à saluer ici toutes ces personnes qui ont fait mon quotidien et contribué à l'élaboration de ce manuscrit, qui est avant tout un travail d'équipe.

C'est à mon directeur que vont mes premiers remerciements, Hervé Piégay, sans qui rien de tout cela ne serait arrivé. Merci de m'avoir permis de vivre cette aventure d'avoir dirigé mes travaux et surtout de m'avoir encouragée tout au long de ma thèse. J'aurai beaucoup appris à tes côtés. Grâce à toi, l'hydro-géologue que je suis fait aussi partie du monde des géographes.

La première personne à m'avoir réellement poussée dans l'aventure est Michal Tal, mon encadrante. Merci pour ton aide sur le terrain, au labo et derrière Matlab. Je te remercie pour tous tes conseils, aussi bien en matière de géomorphologie fluviale que de mise en forme, et pour avoir rendu agréable mon quotidien lors de mes déplacements à Aix et à Marseille.

Je remercie Gilles Arnaud-Fassetta et Stéphane Rodrigues d'avoir accepté d'évaluer mon travail en tant que rapporteurs. Merci aussi à Sylvain Reynaud et Michael Bliss Singer d'avoir bien voulu faire partie de mon jury.

Un grand merci aussi à Jean-Marie Garnier (CEREGE) et Magalie Jodeau (EDF) pour m'avoir conseillé de postuler à cette thèse. Je tiens à remercier chaleureusement Mireille Provansal de m'avoir « initiée » au Rhône avant même de commencer ma thèse. Merci d'avoir partagé tes précieuses connaissances sur le fleuve et merci pour tous tes conseils.

Cette thèse n'existerait sans doute pas sans la création de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) et l'appui de tous les partenaires scientifiques, techniques et financiers. C'est à toutes les personnes qui ont fait partie de l'OSR que j'adresse mes remerciements, aussi bien pour les réunions et les discussions scientifiques constructrices, que pour les échanges de données et le soutien technique. Je remercie notamment Anne Clémens (GRAIE), Jérôme Le Coz (IRSTEA), Franck Pressiat (CNR), Pauline Gaydou (OMEAA), Francis Pautras et Eve Sivade (Agence de l'eau), François Sabatier et Olivier Radakovitch (CEREGE), Brice Mourier (ENTPE), et Nicolas Talaska. Je remercie aussi Guillaume Fantino pour toute son aide logistique. Je tiens également à remercier Lauren Valverde et Marc Desmet (Université de Tours), l'équipe Loire, pour nos échanges scientifiques et nos discussions sur les méthodes de terrain.

Tout ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien scientifique, technique et financier de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). Je remercie chaleureusement Sylvain Reynaud de m'avoir ouvert les portes de la compagnie, de m'avoir permis de récupérer des données bathymétriques et d'avoir rendu possible les campagnes de terrain. Merci aussi pour ton soutien et le suivi très constructif de mon travail. Je remercie tout aussi chaleureusement Christophe Moiroud pour avoir mis à disposition le bateau de la CNR, la drague de prélèvement et sa super équipe de terrain. Ton aide m'a été très précieuse. Je remercie également Nicolas Anterion, de m'avoir fait découvrir les techniques de mesure bathymétrique. Merci aussi à Mathieu Rocle de m'avoir permis de tester le matériel de prélèvement et de nous avoir définitivement convertis à la drague CNR.

Je n'aurais pas pu réaliser la moitié de ma thèse sans Christophe Mora et Lionel Meric, l'équipe tout terrain de la CNR, qui m'a permis de naviguer de l'amont du Rhône jusqu'à la mer. Merci pour toutes vos connaissances, aussi bien techniques que scientifiques, et tous ces bons moments passés ensembles. Et comment oublier Ludovic Bultingaire, MacGyver d'EVS, qui m'a accompagnée, aidée et soutenue sur le terrain et derrière les granulo.
Mais du terrain, il y en eût beaucoup… ce qui a demandé une sacrée équipe ! Un grand merci à Vincent Gaertner et Franck Perret (OMEAA) pour leur participation sans faille, à Doriane Sabatier (CEREGE) pour son aide précieuse au labo et sur le terrain, à Guillaume Raccasi pour les cartes anciennes et pour le terrain, à Pascal Roger (IRSTEA) qui nous a permis de déployer tant bien que mal les Cooper Scooper, et toujours dans la bonne humeur. Merci à Michael Bliss Singer pour son expertise et ses conseils granulo. Merci à Margot Chapuis pour ton aide et tes conseils sur le terrain, tous les bons moments passés à Aix, Lyon ou ailleurs. Merci aussi à Véronique Ferrier (VNF) et Marion Ribon pour leur aide. Merci également à Christelle Antonelli (IRSN) de m'avoir emmenée sur le terrain et de m'avoir fait découvrir les techniques de suivi de MES en période de dragage.

Je tiens à rendre hommage à tous les étudiants motivés qui ont été en stage dans le cadre de ces travaux et qui auront apporté leur pierre à l'édifice, à l'ENS ou au CEREGE. Je remercie chaleureusement Tiané Troussier (CEREGE) pour son travail sur la bathymétrie. Merci à Lucile Hammou (ENS), qui a été efficace sur le terrain et derrière l'écran. Merci à Thomas Pégot-Ogier (ENS) pour avoir développé l'analyse par imagerie prise par le Catarob. Merci à Jules Le Guern (CEREGE) pour la modélisation hydraulique 1D sur le Rhône et pour ta forte motivation qui t'aura fait voyager entre Tours, Aix-en-Provence et Lyon. Un grand merci à Luce Reboul (CEREGE) pour ton protocole d'analyse bathymétrique sur ArcGis, ton incroyable dynamisme et ta bonne humeur. Luce et Jules merci aussi pour votre aide sur les granulo ! Merci à Lucie Mathieu et Jordane Ambert (ENS) pour votre excellent travail sur le géoréférencement.
Je remercie également Volodia Petropavlovsky de m'avoir aidée sur le terrain et sur les granulo, et merci aussi pour ton soutien. Merci aussi à Clémentine Périal pour ton efficacité sur les granulo et nos moments Croix-Roussiens.

Et puis, il y a eu le traitement de données, une tâche pas toujours facile. Alors un grand merci à Lise Vaudor (EVS), experte en programmation sur R, pour son aide et son enseignement. Je remercie chaleureusement Benoît Camenen et Violaine Dugué (IRSTEA) pour la modélisation hydraulique sur MAGE.

Je remercie également Jean-Pierre Delannoy (VNF) d'avoir sauvé les cartes anciennes du Rhône.

La partie administrative prend aussi une grande place dans la recherche, c'est pourquoi je remercie Sandy Artero, Patrick Gilbert, Séverine Morin, Lydie Kowet et Monique Noharet pour toute la gestion administrative.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement la réalisatrice Claude-Julie Parisot de m'avoir permis de participer au documentaire Arte sur le Rhône, une aventure cinématographique cette fois, ainsi qu'à l'équipe de tournage pour les bons moments passés ensemble, notamment à Jean-Pierre Rivalain (caméraman) et Christophe Foulon (preneur de son).

Il est maintenant temps de saluer mes camarades lyonnais et de remercier toutes les personnes du labo qu'ils soient encore à l'ENS ou vers d'autres lieux : Dorothée Hoenen (merci infiniment pour ta bonne

humeur et nos discussions), Jérémie Riquier (merci pour nos fous rires, ton soutien continu, les sorties de terrain et ta refonte inégalée de la grammaire), Mélanie Bertrand (toujours là pour discuter et mettre de la bonne humeur, merci pour ton soutien et nos éclats de rires), Elise Wiederkehr (je ne te remercierai jamais assez pour ton soutien et tous tes conseils), Bianca Räpple (de très bons souvenirs de l'Amazonie…oui, c'est déjà loin), Marylise Cottet (c'est toujours un plaisir de parler avec toi), Bertrand Morandi (la Croix-Rousse, c'est beau mais c'est loin…), Kristell Michel (toujours la patate pour aider les autres, merci), Barbara Belletti (tu as égayé mes repas), Kéo Phan (merci pour nos moments à la cafèt), Mathieu Cassel (on le fera finalement ce week-end à la campagne !), Marie-Laure Trémélo (toujours d'un grand soutien, je te remercie), Anne Honegger (merci beaucoup pour ton aide), Fanny Arnaud (as-tu quitté le bureau parce que je n'y étais plus ?), Véronique Benacchio (merci pour ta franchise et ta bonne humeur), David Béal (merci pour ton coup de main sur le terrain et ton humour), Pierre Collery (merci pour ton code et ton rire), Clément Roux, Pierre Lemaire, Stéphanie de Carrara, Emeline Comby, Yves Le Lay, Hervé Parmentier, Vincent Wawrzyniak, Sylvia Flaminio, Janique Valy, Ludivine Ottini, Inès Méliani, Martin Vigan, Helen Mathian, Clément Dodane, Maxime Boivin, Julien Saulas, Sarah Dauvergne, Katka Dzubakova, Jérôme Lejot, Adrien Barra, Sébastien Ah-Leung… Merci aussi à mes colocs Thomas Raso, Marion Geoffre et Germain Antoine qui ont rythmé ma première année de thèse. J'ai aussi une pensée pour Eléonore Paquier et Elodie Brisset (CEREGE).

Je remercie aussi mes amis pour leur présence essentielle : Caroline, Sophie, Sabrina, Mathieu, Florent, Vincent, Pozzo & Sanaz, Max & Marie, Elise & Nico, Gauthier, Louis, Manu. J'ai une pensée pour Cécile et David. Je remercie Patrice Franceschi pour son soutien très précieux. Puis tous ceux rencontrés sur la grande route, aux quatre coins du globe, et qui m'ont encouragée pendant la rédaction, notamment Sophie & Mathieu (en Indonésie), Benjamin Graff (CNR au Laos), Meng (au Laos), Martin Michalon (en Birmanie, mais si, tu vas y arriver), Prafull, Prajakta & Piñak et le Tranquility (en Inde), Ruffik et sa famille (au Bangladesh), Volodia & Co (au Kazakhstan) Irène Mestre (à l'IFEAC au Kirghizistan, c'est toi la prochaine !), Gaël (au Kirghizistan-Tadjikistan, jusqu'où iras-tu avec ton vélo ?), Javid (en Iran, vivement ta visite !)…

Et puis il y a ma famille, forte et unie, toujours présente et derrière moi, pour partager les bons comme les mauvais moments. Je pense à mon frère Arnaud (je crois en toi) et à mes parents (le plus dur est derrière nous), mais aussi à Antoine mon cousin (vivement l'escargot). Une pensée aussi va à la belle-famille (ça y est, c'est fini !), et puis à la cousine Alexandra (merci pour toutes nos soirées et ton aide).

Enfin, je réserve ces dernières lignes à l'homme qui partage ma vie depuis quelques années déjà. Carol, comment te dire merci. Tu as toujours été présent, mon plus grand soutien, celui qui m'a toujours tirée vers le haut. Tu as fait preuve d'une patience inouïe et tu t'es impliqué comme personne. Cette thèse, je te la dois !

RESUME **4**

ABSTRACT **5**

REMERCIEMENTS **6**

PREAMBULE **14**

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE 15
2. ORGANISATION DU TRAVAIL DE THESE 17

1ER **CHAPITRE :** ***CONTEXTE THEMATIQUE ET SCIENTIFIQUE*** **20**

1. LA DYNAMIQUE DU SYSTEME FLUVIAL 22
   1.1. Les variables du système 22
   1.2. Les ajustements d'un cours d'eau 24
      1.2.1. L'équilibre du système fluvial 24
      1.2.2. Les perturbations morphologiques du continuum : vers un discontinuum fluvial ? 25
2. L'ANTHROPISATION DES COURS D'EAU : PRESSIONS ET IMPACTS MORPHOLOGIQUES 26
   2.1. L'occupation des sols au sein du bassin versant 27
   2.2. Les travaux de modification du chenal 28
      2.2.1. La rectification du cours d'eau 29
      2.2.2. Les épis pour corriger et stabiliser le chenal 31
   2.3. L'extraction de matériaux dans le lit mineur 31
   2.4. L'impact des barrages sur le système fluvial 32
      2.4.1. La modification des variables de contrôle 32
      2.4.2. L'incidence sur les variables morphologiques et les rétroactions 33
   2.5. Les échelles temporelles d'ajustement 34
3. CONSEQUENCES ECOLOGIQUES ET ECONOMIQUES ET SOLUTIONS POSSIBLES 36
   3.1. Les modifications des entrées dans le système (liquides et solides) 37
   3.2. Les conséquences de l'incision 38
   3.1. Les différents objectifs des interventions humaines 40
4. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE 42

2E **CHAPITRE :** ***CONTEXTE GENERAL DU RHONE*** **46**

1. CADRE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE 48
   1.1. Le réseau hydrographique du bassin du Rhône 48
      1.1.1. Le Rhône alpestre et le lac Léman 49
      1.1.2. Le Haut Rhône 50
      1.1.3. Le Rhône Moyen 50
      1.1.4. Le Rhône inférieur 50
      1.1.5. Le delta 51
      1.1.6. Les affluents du Rhône 51
   1.2. Le contexte géologique du bassin du Rhône 54
   1.3. Régime hydrologique et climatique 58
   1.4. Les apports sédimentaires des affluents avant aménagements 64
      1.4.1. Le Haut-Rhône 64
      1.4.2. De la Saône à l'Isère 65
      1.4.3. De l'Isère à l'Ardèche 65
      1.4.4. De l'Aval de l'Ardèche à la Durance 65
      1.4.5. A l'aval de la Durance 66
   1.5. Le système fluvial du Rhône avant les grands aménagements 67
2. CONTEXTE HISTORIQUE DE L'ANTHROPISATION DU CONTINUUM RHODANIEN 73
   2.1. La transformation du paysage et l'évolution de l'occupation du sol 73
   2.2. Travaux de rectification et de corrections du chenal 73

2.2.1. La protection de berges : les digues insubmersibles 74
2.2.2. La construction des digues submersibles 75
2.2.3. Les digues basses de resserrement et les premiers épis 76
2.2.4. Les casiers Girardon 76
2.2.5. Impacts sur la morphologie du Rhône 82
2.3. Les grands travaux d'aménagement hydroélectrique 84
2.3.1. Conséquences des barrages sur les débits liquides et solides 90
2.4. La mobilisation du stock sédimentaire 91
2.4.1. Les extractions et les dragages 91
2.4.2. Les chasses 93
2.5. Impact de l'anthropisation sur le Rhône 94

***3E* CHAPITRE : *EVOLUTION VERTICALE DU LIT DU RHONE ET DYNAMIQUE DES FORMES DEPUIS LE 19EME SIECLE* 100**

1. L'EVOLUTION DU PROFIL EN LONG : QUELQUES ELEMENTS DE DIAGNOSTIC 102
1.1. Le profil en long et l'ajustement vertical 102
1.2. Les faciès morphologiques 105
2. ANALYSE HISTORIQUE DE L'EVOLUTION VERTICALE DU LIT DU RHONE 109
2.1. Matériel et méthodes 109
2.1.1. Extraction de profils en long à partir des données numériques 109
2.1.2. Extraction du profil en long à partir de cartes historiques 111
2.1.3. Profils de synthèse pour étudier l'impact des aménagements en aval de Lyon 113
2.1.4. Recensement des profils en long anciens et récents 115
2.2. Evolution verticale du lit entre 1951 et 2011 de Génissiat à la mer (données CNR) 116
2.2.1. Etude du tronçon de Génissiat à Jons 116
2.2.2. Etude du tronçon de Lyon à la mer 124
2.3. Evolution altimétrique du lit par période entre 1897/1907-08 et 2010, de Lyon à la mer 127
2.3.1. Analyse de la Période 0 : changements globaux 133
2.3.2. Analyse de la Période 1 : chenalisation 133
2.3.3. Analyse de la Période 2 : aménagements CNR 134
2.3.4. Analyse de la Période 3 : réponse aux crues morphogènes 140
2.3.5. Interprétation et limites rencontrées 144
2.4. Evolution verticale entre Jons et Lyon : cas de Miribel-Jonage 145
3. ETUDE DES FACIES INTRA-CHENAUX 149
3.1. Les paramètres physiques des faciès morphologiques 149
3.2. Matériel et méthodes 150
3.2.1. Détection et caractérisation des méso-formes du fond par la moyenne mobile 150
3.2.1.1. Découpage en segments homogènes en termes de pente moyenne 151
3.2.1.2. Classification des tronçons en fonction des caractéristiques des formes du lit 152
3.2.2. La méthode des ondelettes 153
3.3. Evolution longitudinale et temporelle des formes du lit à partir d'une analyse de la moyenne mobile 153
3.3.1. Extraction des méso-formes à partir du profil en long lissé 153
3.3.2. Segmentation des tronçons homogènes en fonction des caractéristiques des faciès 158
3.3.3. Evolution temporelle des formes du fond sur trois secteurs 161
3.4. Evolution générale des formes du lit entre 1897-1907 et 2011 par la méthode des ondelettes 166
4. CONCLUSIONS DE L'ANALYSE DE L'EVOLUTION VERTICALE DU LIT DU RHONE 168

***4E* CHAPITRE : *CARACTERISATION ACTUELLE DE LA GRANULOMETRIE DU LIT ENTRE LE LEMAN ET LA MEDITERRANEE* 170**

1. INTERET DE L'ETUDE DE LA GRANULOMETRIE DES FONDS 172

1.1. Définition de la granulométrie ... 172
1.2. Granulométrie et transport solide ... 173
1.3. Le patron granulométrique ... 175
1.3.1. Spatialité : de l'échelle locale au patron longitudinal ... 175
1.3.1.1. Patron local à l'échelle des faciès morphologiques ... 175
1.3.1.2. Patron longitudinal : l'affinement granulométrique ... 178
1.3.2. Les ajustements du cours d'eau ... 180
2. COMMENT MESURER LA GRANULOMETRIE ? ... 184
2.1. L'échantillonnage par comptage : la méthode de Wolman (1954) ... 184
2.1.1. Echantillonnage de la surface ... 184
2.1.2. Echantillonnage de la subsurface et détermination de l'indice de pavage ... 185
2.2. L'échantillonnage massique ... 186
3. MESURE DE LA GRANULOMETRIE DU LIT DU RHONE ... 187
3.1. Choix des sites d'échantillonnage ... 187
3.1.1. Mesures granulométriques sur les bancs ... 188
3.1.2. Mesures de l'indice de pavage sur les bancs et dans le chenal ... 188
3.2. Contraintes de mesure ... 188
3.3. Choix du matériel et tests réalisés ... 189
3.3.1. Déploiement des Cooper Scooper ... 189
3.3.2. Résultats des tests ... 191
3.3.3. Comparaison des préleveurs et choix du matériel ... 192
3.4. Elaboration d'une méthode de prélèvement uniforme et adaptée ... 193
4. RESULTATS ... 196
4.1. Distribution granulométrique et indices de pavage des bancs et du chenal des vieux Rhône .. 196
4.1.1. Distribution de la granulométrie sur les bancs émergés des vieux Rhône ... 196
4.1.2. Détermination du degré de pavage dans les tronçons court-circuités ... 198
4.2. Caractérisation longitudinale du patron granulométrique du chenal ... 202
4.2.1. Répartition granulométrique longitudinale ... 202
4.2.2. Répartition par rapport aux affluents ... 215
4.2.3. Une organisation par bief : l'élément anthropique dans la répartition granulométrique ... 223
4.2.4. Influence de la pente sur la répartition des sédiments ... 228
5. ETAT DES LIEUX DE LA GRANULOMETRIE DU CHENAL ACTUEL ... 233

***5E* CHAPITRE : *CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ACTUELLE* ... 234**

1. SYNTHESE DES CONNAISSANCES EN MATIERE DE TRANSPORT SOLIDE ... 236
1.1. Eléments bibliographiques ... 236
1.2. Analyse de la mobilité verticale du lit suite aux crues de 2001-2003 ... 246
1.3. Modélisation du transport solide à Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon ... 249
1.3.1. Enjeux de l'étude ... 249
1.3.2. Etat des lieux de l'évolution verticale du lit suite aux crues de 2001-03 ... 253
2. MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE ... 259
2.1. Caractérisation du seuil de mise en mouvement des particules ... 259
2.1.1. Formulation de Manning-Strickler et estimation de la rugosité ... 259
2.1.2. Calcul des forces tractrices ... 260
2.1.3. Détermination du nombre de Shields ... 261
2.1.4. Choix du Shields critique ... 264
2.1.4.1. Seuils critiques de transport solide associés aux D_{50} ... 265
2.1.4.2. Seuils critiques de transport solide associés aux D_{84} ... 266
2.2. Estimation des débits solides ... 267
2.3. Matériels et méthodes ... 274
2.3.1. Données disponibles ... 274
2.3.2. Le modèle hydraulique 1D MAGE ... 275

2.3.2.1. Géométrie du modèle : le maillage 275
2.3.2.2. Calage du modèle par détermination du coefficient de Strickler 279
2.3.2.3. Conditions aux limites par rapport à l'hydrologie 280
2.3.2.4. Gestion des débits par rapport aux ouvrages 281
2.3.2.5. La simulation des lignes d'eau 283
2.4. Résultats 284
2.4.1. Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le secteur de Pierre-Bénite 285
2.4.2. Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le secteur de Donzère-Mondragon 294
2.4.3. Estimation du débit solide dans les vieux Rhône à l'état naturel - Conséquences du laminage sur le transport solide 303
3. SYNTHESE ET DISCUSSION DES CONDITIONS DE MISE EN MOUVEMENT 305

CONCLUSION 308

1. RETOUR SUR LES CONSEQUENCES DE L'ANTHROPISATION DU RHONE 310
1.1. Impacts de la chenalisation 311
1.2. Impacts des aménagements hydroélectriques 311
1.3. Impacts résultant de l'effet cumulé des différentes pressions humaines 313
2. PERSPECTIVES DE CES TRAVAUX 314
2.1. Une base de données essentielle pour la connaissance globale du fleuve… 314
2.2. … qui mériterait d'être complétée à l'avenir 316
2.3. Préconisation pour les gestionnaires : stratégie de gestion du Rhône 317

ANNEXES 320

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 438

TABLE DES FIGURES 456

TABLE DES TABLEAUX 464

TABLE DES ANNEXES 466

Préambule

2. Contexte et objectifs du projet de recherche

Cette thèse contribue aux travaux de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) sur la partie française du fleuve. L'OSR est né en 2009 d'une réflexion menée par des équipes de recherche travaillant sur le fleuve afin de répondre de manière coordonnée à des questions complexes soulevées dans le cadre du Plan Rhône. Le Plan Rhône est un projet de développement durable dont la mise en œuvre nécessite de renouveler les connaissances en termes de prévention des inondations, de préservation de la qualité de l'eau, de la biodiversité et du patrimoine lié au fleuve, et de développement économique afin de réussir une réappropriation du fleuve par les riverains. L'OSR s'est concrétisé sous la forme d'un rapprochement entre chercheurs de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) et de l'ORME (Observatoire Régional Méditerranéen sur l'Environnement), deux zones ateliers du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), et les acteurs du Plan Rhône. Il s'agit d'un programme de recherche cofinancé par l'Union Européenne et par des partenaires régionaux qui peuvent apporter leur soutien tant financier que technique à l'OSR :

- la DREAL Rhône Alpes (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement),
- l'Agence de l'Eau RM&C,
- la CNR (Compagnie Nationale du Rhône),
- la région Rhône-Alpes,
- la région Provence-Alpes-Côte d'Azur,
- la région Languedoc Roussillon,
- et EDF (Électricité de France).

Cette aide technique, notamment de la CNR, l'Agence de l'Eau, la DREAL Rhône Alpes et EDF, se matérialise par la mise à disposition de données, le partage d'équipements ou la conduite d'opérations conjointes sur le terrain. L'OSR regroupe plusieurs équipes de recherche, réparties sur l'ensemble du corridor du fleuve :

- le CNRS UMR 5600 (Unité Mixte de Recherche) - EVS (Environnement, Ville, Société),
- le CNRS UMR 7330-CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement),
- l'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture ; ex-CEMAGREF),
- l'ENTPE (Ecole Nationale des Travaux Publics d'Etat),
- l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire),
- et l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER).

Plate-forme de recherche pluri-partenariale, l'OSR s'inscrit dans une co-construction entre scientifiques et gestionnaires. Les recherches de l'OSR 2 (2010-2013) font suite à l'OSR 1 (2009-2010) et s'articulent autour de 12 actions ayant pour objectif l'étude des bilans et des dynamiques hydro-sédimentaires du Rhône, dans un cadre spatio-temporel emboité. Ce projet est mené sur une échelle de temps large (du siècle à l'instantané) et sur un linéaire de plus de 500 km, du Léman à la Méditerranée. L'intégralité du corridor est considérée (chenal en eau, retenues, marges alluviales). Ces espaces correspondent à différents compartiments d'un même hydrosystème qu'il est nécessaire de comprendre dans son ensemble. La mission de l'OSR est de produire, rassembler et gérer des données pour caractériser la charge sédimentaire en termes de stocks et de flux ainsi que les pollutions

associées. Les études menées visent à apporter aux gestionnaires du fleuve des éléments d'aide à la décision dans le domaine des risques et de la gestion durable des écosystèmes fluviaux et marins.

Cette thèse a été réalisée principalement au sein du laboratoire « Environnement Ville, Société » (EVS) de l'UMR 5600 du CNRS à l'ENS de Lyon, en collaboration étroite avec le CEREGE à Aix-en-Provence (thèse en codirection). La CNR a aussi largement contribué à sa réussite en fournissant de nombreuses données, notamment bathymétriques, et en participant techniquement et financièrement à la collecte des données granulométriques du fond du lit du Rhône sur tout le linéaire.

La thèse s'inscrit dans l'Action 1, ***Analyse de l'évolution géométrique du corridor de Genève à la mer***, et l'Action 2, ***Caractérisation du continuum sédimentaire à large échelle***, de l'OSR, intégrées à l'axe I ***Stockage et déstockage***. Elle vise à comprendre l'organisation longitudinale du lit, de Genève à la Méditerranée, plus particulièrement l'organisation de ses formes fluviales, de ses zones de stockage et d'érosion, et de sa distribution granulométrique, ainsi que leur évolution en lien avec les deux grandes phases d'aménagements et l'anthropisation.

L'étude historique des variations verticales du lit et de l'évolution des formes fluviales, se justifie par l'important impact des processus passés sur le fonctionnement du système fluvial actuel, notamment en matière d'interactions entre les différents compartiments de l'hydrosystème et les effets propres des variables de contrôle sur les différentes échelles du systèmes (Bravard, 1998). Le couplage des approches temporelle et spatiale constitue une démarche bien spécifique de la géomorphologie fluviale, démarche qui la distingue de l'hydraulique (Bravard, 1998). Une analyse diachronique (ou rétrospective) permet de mettre en lumière les conséquences morphologiques et écologiques des aménagements, et d'évaluer la sensibilité du système fluvial aux crues (Gurnell et al., 2003). Cette analyse est ainsi primordiale pour optimiser la gestion actuelle et future des cours d'eau et de leurs aménagements. Le suivi temporel et/ou spatial des évolutions morphologiques et de l'état du fond du lit peut-être réalisé à partir de cartes bathymétriques anciennes (Peiry, 1987 ; Bravard et Bethemont, 1989 ; Poinsart, 1992 ; Gurnell et al., 1994 ; Hohensinner et al., 2004 ; Arnaud, 2012) et de mesures topographiques anciennes et contemporaines (Poinsart, 1992 ; Landon, 1999 ; Arnaud-Fassetta, 2003). Une analyse des données granulométriques (Poinsart, 1992 ; Arnaud-Fassetta et al., 2003 ; Rollet, 2007 ; Lejot, 2008 ; Montané, 2009, 2010 ; Grosprêtre, 2011 ; Arnaud, 2012 ; Chapuis, 2012) constitue un complément important pour le diagnostic, le patron granulométrique longitudinal étant source d'informations pour interpréter la dynamique fluviale, observer, confirmer ou infirmer certaines hypothèses.

L'objectif de ce travail est à la fois scientifique, par l'amélioration de la connaissance du fonctionnement du système fluvial en réponse aux pressions anthropiques, et opérationnel, en termes d'outil d'aide à la décision en vue d'améliorer durablement la stratégie de gestion des sédiments le long d'un linéaire important. L'étude et la compréhension des évolutions morphologiques du chenal durant le dernier siècle ont consisté à quantifier et relocaliser spatialement et temporellement ces changements, dans le but d'identifier localement les impacts des aménagements et les ajustements globaux du système fluvial en réponse aux modifications des variables externes. Afin de pouvoir identifier les ruptures longitudinales et les phénomènes de pavage et de fournir les données nécessaires à la caractérisation du transport solide actuel du Rhône, un descriptif quantifié de l'évolution du continuum sédimentaire a été réalisé par prélèvements granulométriques dans le chenal. Les résultats de cette étude sur le Rhône à long terme et à large échelle devraient permettre, entre autres, d'adopter une approche plus globale de la restauration visant à améliorer les conditions d'habitats aquatiques (Piégay et al., 2000).

Il s'agit d'établir de nouvelles connaissances sur :

- les caractéristiques du transport solide sur l'ensemble du continuum : les sources, les discontinuités et les transferts sableux au littoral ;
- le lien entre les apports sédimentaires et le risque inondation : la question de la gestion des excès/déficits sédimentaires et les enjeux en matière d'entretien du chenal ;
- les habitats aquatiques par la mise en évidence des secteurs mobiles ou fixes.

3. Organisation du travail de thèse

La thèse s'articule en six chapitres, comprenant trois parties analytiques. Le plan de la thèse est détaillé ci-dessous et illustré par la Figure-1. Il met en évidence les liens entre les deux premiers chapitres qui permettent de replacer le contexte à la fois méthodologique et opérationnel, et entre les deux suivants qui permettent de décrire les processus dans leur organisation spatiale et temporelle. Ces observations sont ensuite synthétisées et interprétées dans le chapitre 5 et de conclure ainsi dans le chapitre 6.

Le chapitre 1 recontextualise la notion de système fluvial anthropisé et les impacts des interventions humaines sur le fonctionnement hydro-sédimentaire général d'un cours d'eau. Il aborde aussi les conséquences écologiques et socio-économiques de ces actions.

Le chapitre 2 fait un état des lieux de la géographie, de la géologie et du fonctionnement hydrologique du Rhône dans sa partie française. Il retrace l'historique des interventions humaines sur le Rhône en évoquant les conséquences sur le fond du lit et les flux sédimentaires, ainsi que les modes de gestion engagés. Il précise aussi la méthodologie de l'étude du profil en long qui sera utilisée dans les trois chapitres analytiques qui font suite.

Le chapitre 3 traite de l'évolution historique de la géomorphologie du chenal du Rhône depuis le 19ème siècle, c'est-à-dire l'implantation des premiers aménagements Girardon, pour la chenalisation du Rhône en vue de faciliter la navigation, jusqu'à la construction des barrages et des usines hydro-électriques sur un canal en dérivation court-circuitant le chenal principal. Cette partie comporte une analyse historique détaillée des variations verticales du lit du fleuve suite à trois grandes perturbations hydrauliques successives induites par la chenalisation, l'aménagement hydro-électrique et les grandes crues de 2001, 2002 et 2003. Elle est complétée par une étude diachronique des faciès morphologiques du fond du lit qui permet de caractériser l'état de la dynamique du corridor et de pronostiquer son devenir. La définition des formes fluviales permet d'établir la stratégie de prélèvement granulométrique du chapitre 4.

Le chapitre 4 est consacré à la caractérisation granulométrique du chenal du Rhône sur tout le linéaire, du Léman à la Méditerranée, soit plus de 500 km. Plusieurs protocoles de prélèvements ont été mis en place afin de déterminer le patron granulométrique longitudinal du Rhône et notamment le degré de pavage dans les tronçons court-circuités, dans le but d'améliorer les connaissances sur le potentiel de mobilité de la charge de fond.

Le chapitre 5 synthétise et lie les résultats des deux chapitres précédents, c'est-à-dire les variations altimétriques et la caractérisation granulométrique, afin de localiser les zones potentiellement mobiles ou au contraire celles en cours de pavage ou fixées, et de dresser un bilan du niveau d'altération de l'état morphologique du fleuve. Afin de comprendre les processus à l'origine des changements observés et la sensibilité des tronçons aux ajustements futurs, les débits-seuils de mise en mouvement

et le transport solide potentiel ont été estimés grâce à la modélisation 1D de l'écoulement du Rhône pour différents débits de crues (périodes de retour de 2 à 100 ans).

Le chapitre 6 permet de conclure sur la dynamique sédimentaire du Rhône et l'état du fond de son lit en vue d'une perspective de gestion durable et intégrée de l'ensemble du corridor et de préconisations en matière de gestion des risques fluviaux ou du potentiel écologique.

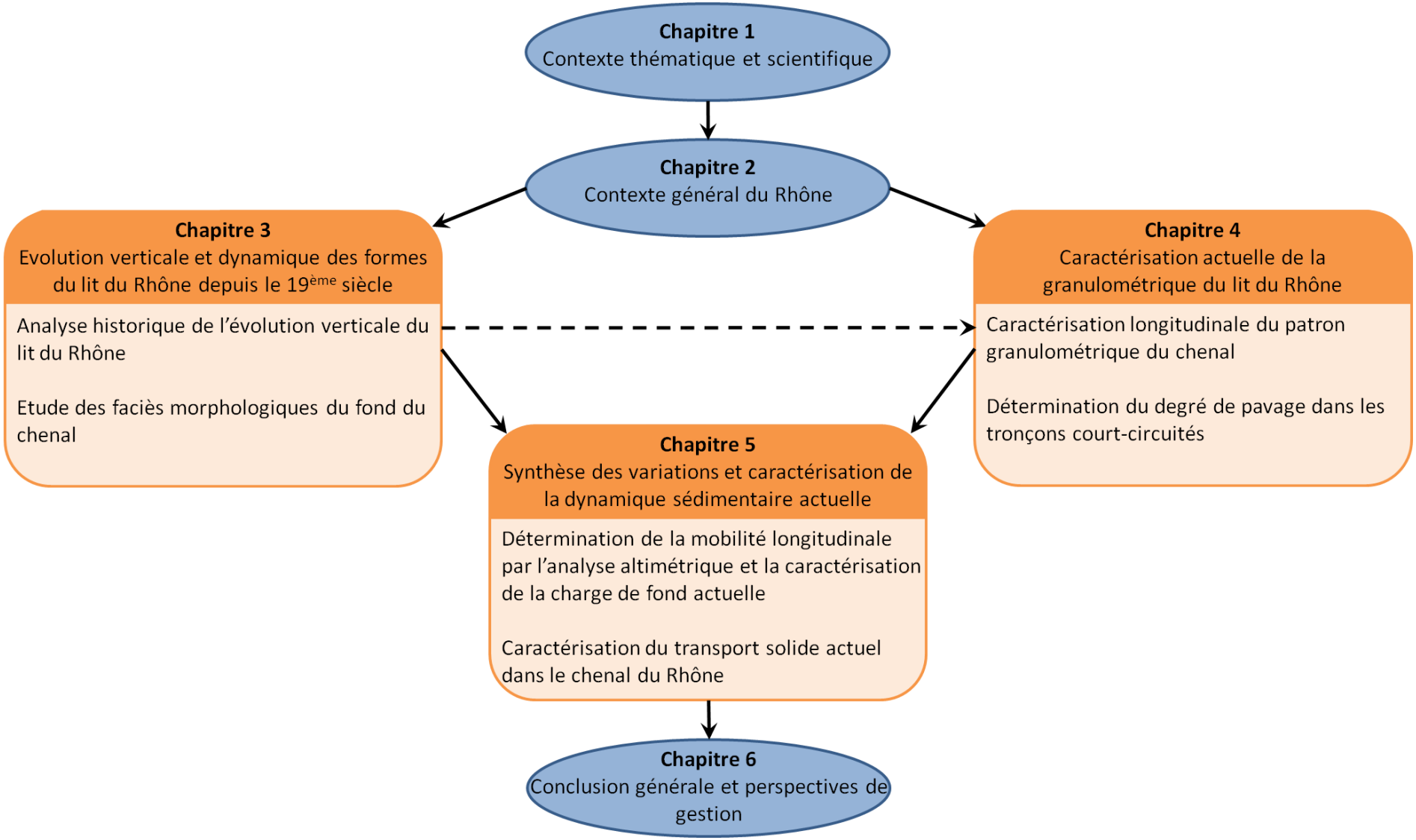


Figure-1 : Schéma de l'organisation générale des travaux de thèse

1er Chapitre : *Contexte thématique et scientifique*

1. La dynamique du système fluvial

Le concept d'hydrosystème est défini comme un système complexe à trois dimensions (Figure 1-1) dans lequel s'effectuent des transferts d'énergie, de matériaux et de facteurs biotiques (Piégay et Schumm, 2003) :

- longitudinal : amont ↔ aval
- latéral : chenal ↔ marges
- vertical : surface ↔ souterrain

Ces transferts sont en réalité des flux (solides et liquides) se propageant de façon bidirectionnelle dans le système selon les pressions imposées. Ces flux constituent des variables qui influencent fortement les caractéristiques physiques de l'hydrosystème.

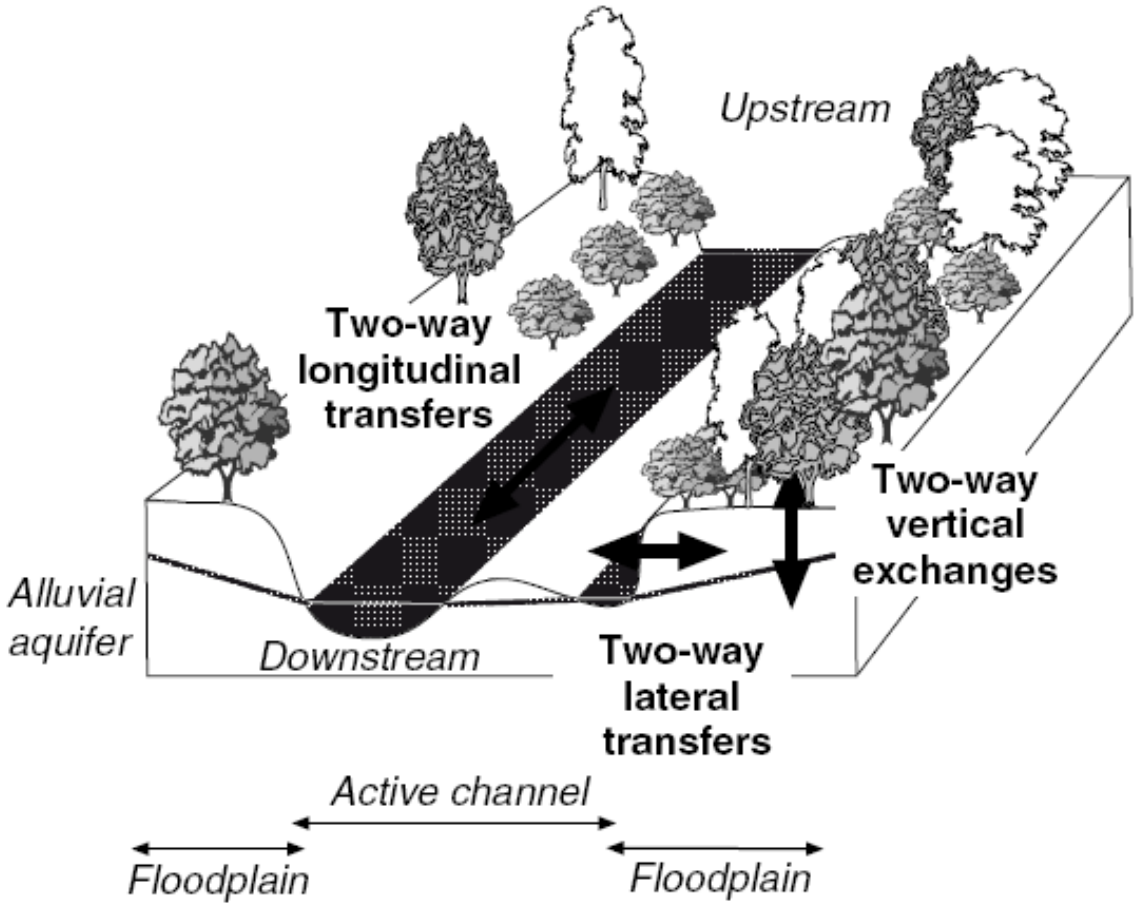


Figure 1-1 : L'hydrosystème, un système complexe à trois dimensions bidirectionnelles : amont-aval, chenal-marges, surface-souterrain (Piégay et Schumm, 2003)

1.1. Les variables du système

Selon Schumm (1977), la dynamique d'un cours d'eau résulte de l'interaction entre plusieurs variables hiérarchisées (Figure 1-2). Les caractéristiques morphologiques telles que la pente, la largeur ou la profondeur sont contrôlées par les débits absolus liquides (Q_L) et solides (Q_S) qui transitent dans l'hydrosystème, et le rapport entre ces deux débits. Sur les rivières à fond mobile, le style fluvial (tracé

en plan du chenal) et la géométrie du lit sont ajustés en fonction de l'intensité et de la fréquence de ces débits (Schumm, 1969). Ces flux constituent les variables de contrôle, ou variables externes, qui dépendent des variables dominantes que sont le climat, le relief, la géologie et l'occupation du sol au sein du bassin versant.

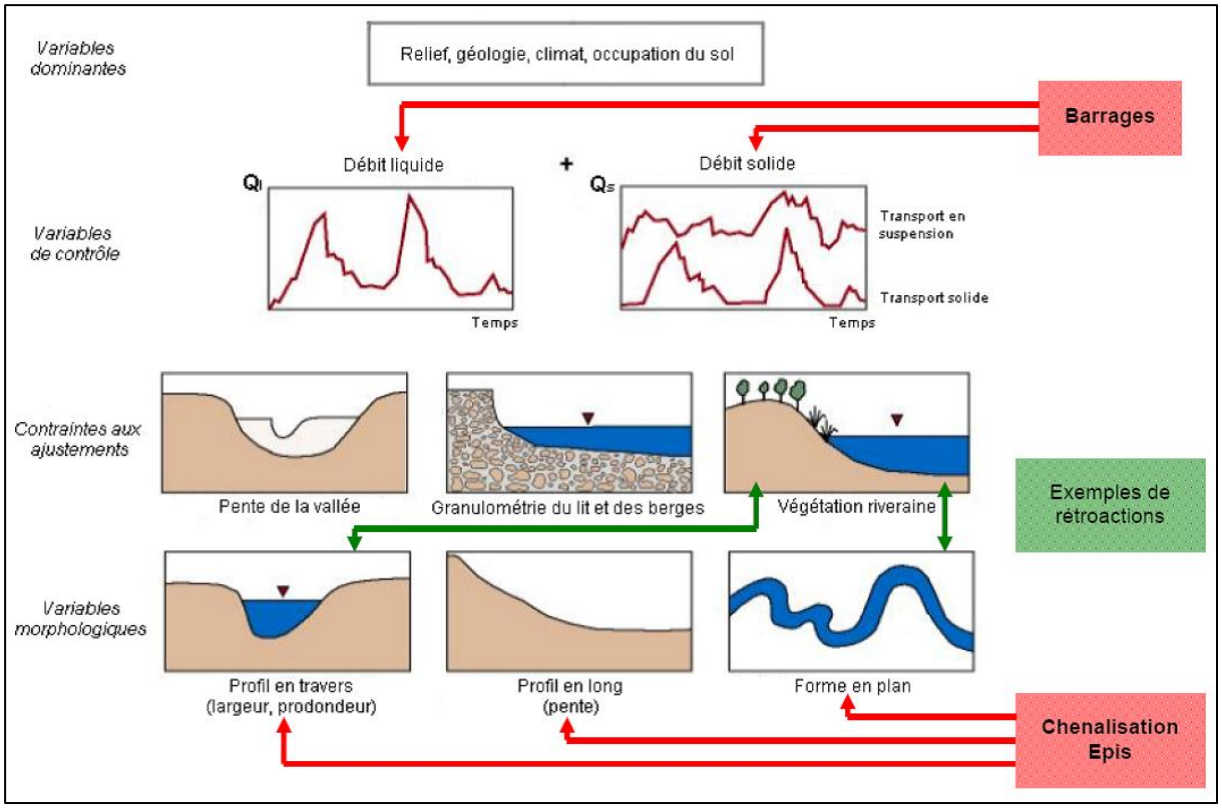


Figure 1-2 : Interactions entre les variables hiérarchisées du système fluvial, rétroactions (flèches vertes) et les actions anthropiques (flèches rouges) (d'après Thorne, 1997 et Bledsoe, 2010, modifié par Arnaud, 2012).

Les variables de contrôle affectent l'évolution des variables d'ajustement à savoir la géométrie du lit décrite par la pente, la largeur, la profondeur et la sinuosité du lit (Figure 1-2). Ces ajustements sont plus ou moins marqués en fonction de contraintes locales que sont la granulométrie, la pente de la vallée et la végétation des berges. Ces contraintes aux ajustements ont la capacité de limiter ou de favoriser les ajustements morphologiques, provoqués par la modification des variables de contrôle (Petts, 1979 ; Thorne, 1997). La granulométrie est aussi une variable d'ajustement : la distribution du patron granulométrique longitudinal dépend directement des variables de contrôle que sont les débits liquides et solides.

Le système fluvial est ainsi défini par Schumm (1969) comme un système à processus-réponses, présentant des capacités d'autorégulation. Il existe, au sein du système fluvial, des mécanismes d'interactions et de rétroactions entre les différentes variables, qui modèrent les effets de facteurs externes afin de maintenir un équilibre dynamique correspondant à l'état moyen autour duquel les variables morphologiques fluctuent et au sein duquel un certain degré de stabilité existe (Schumm, 1977 ; Knighton, 1984).

La colonisation des berges par la végétation, par exemple, contribue à limiter la mobilité latérale et à réduire la largeur du lit mineur (Thorne, 1997). Le fait que les bancs latéraux (Figure 1-2) soient alors perchés résulte d'une rétroaction aux contraintes d'ajustement. Dans ce cas, l'enfoncement du lit entraîne une réduction de la fréquence des inondations de ses marges et favorise ainsi leur

végétalisation par les espèces pionnières (Liébault et Piégay, 2002 ; Dufour, 2005). La bande active se trouve alors rétrécie, concentrant les écoulements dans un chenal plus étroit et favorisant ainsi l'incision en cours.

1.2. Les ajustements d'un cours d'eau

1.2.1. L'équilibre du système fluvial

La représentation de l'équilibre du système fluvial peut être illustrée par la balance de Lane (1955) qui lie la fourniture sédimentaire (débit solide Q_S, granulométrie γ) à la puissance fluviale (débit liquide Q_L, pente α) capable de la mobiliser (Figure 1-3). Lorsqu'un système est en équilibre, les sédiments sont transportés vers l'aval sans dépôt ou érosion nets significatifs. On parle d'équilibre dynamique lorsque le système fluvial est capable de retrouver des conditions proches de son état avant perturbation. Un système est dit résilient lorsqu'il revient rapidement à son état pré-perturbé.

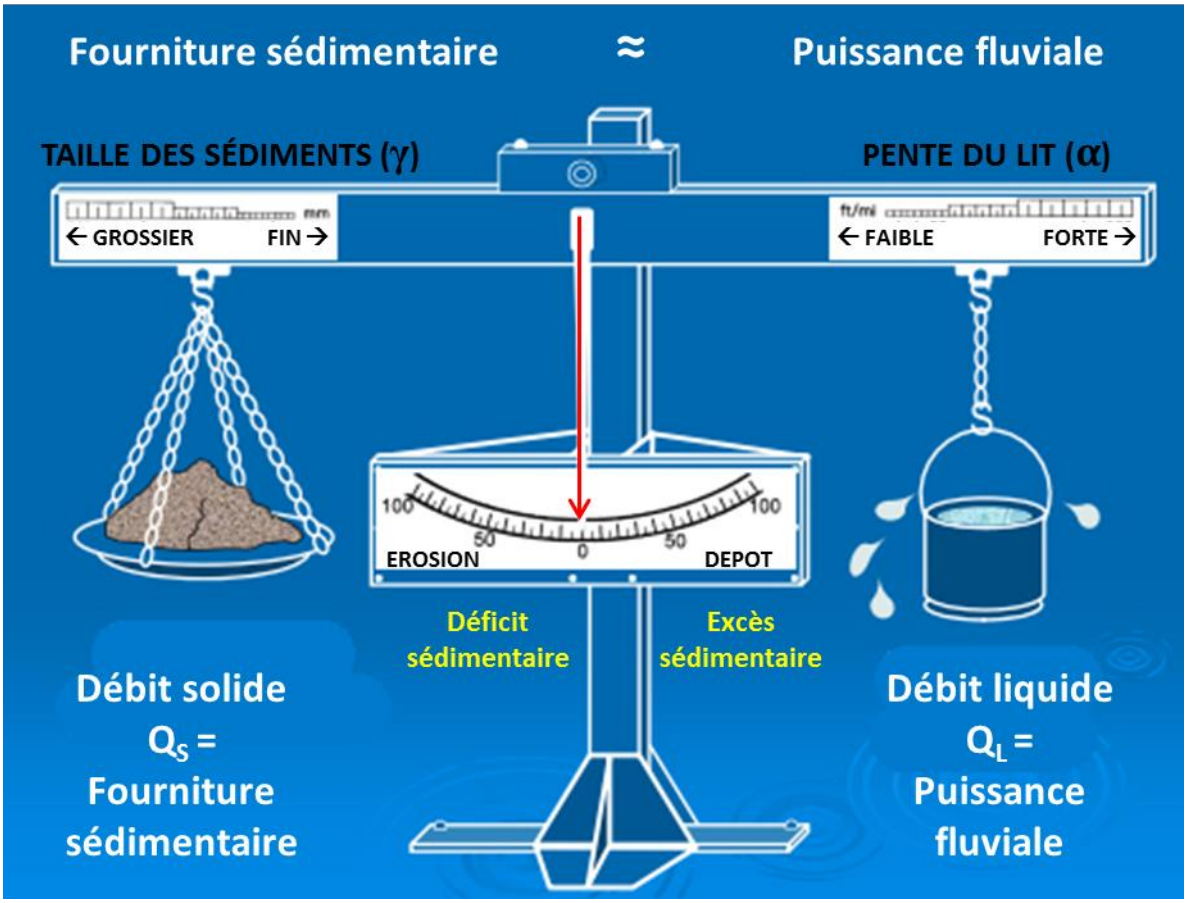


Figure 1-3 : Balance de Lane (1955) illustrée par Borland (1960) (modifié, d'après Bledsoe, 2010 et Arnaud, 2012)

Selon Brunsden (1980), la réponse d'un système fluvial à une modification des variables de contrôle se décompose en trois temps distincts (Figure 1-4) :

1. le temps de réaction pendant lequel l'ajustement se fait,

2. le temps de résilience (de relaxation ou de récupération) correspondant au rétablissement des conditions d'équilibre dynamique, c'est-à-dire sont état originel avant perturbation,
3. le temps ajusté aux nouvelles conditions, c'est-à-dire à partir duquel un nouvel état d'équilibre est amené à persister.

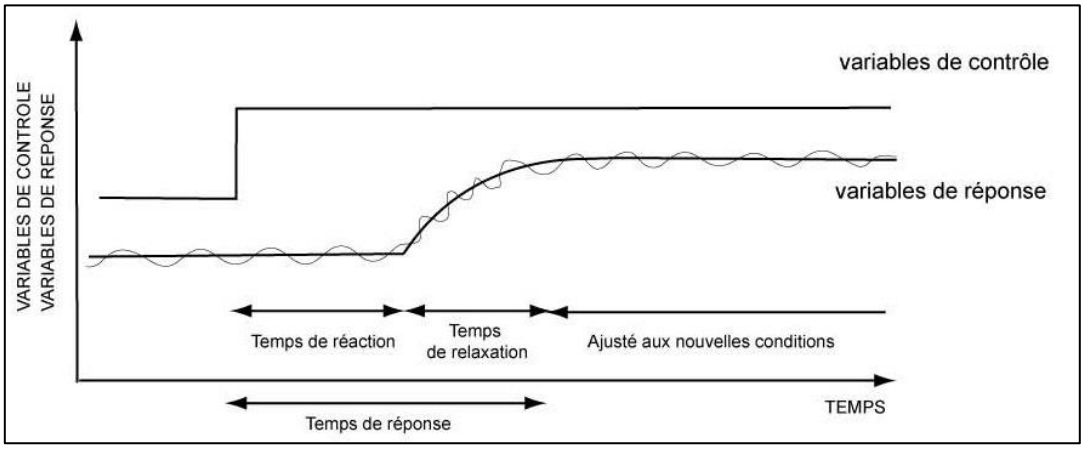


Figure 1-4 : Représentation théorique de la réponse d'un système fluvial suite à la modification soudaine d'une variable de contrôle (d'après Knighton, 1984, modifié par Rollet, 2007)

1.2.2. Les perturbations morphologiques du continuum : vers un discontinuum fluvial ?

Au cours des derniers siècles, notamment avec l'essor industriel du 19ème siècle, les perturbations des variables de contrôle ne sont plus dues aux seules fluctuations climatiques ou géologiques mais aussi à la pression grandissante des activités humaines. L'impact anthropique (chenalisation, épis, barrages…), tient un rôle non négligeable, et même parfois prépondérant au sein des perturbations qui laissent des empruntes durables dans le système fluvial (Figure 1-5). Les aménagements humains ont un impact spécifique sur les différentes variables affectées : ils sont susceptibles de modifier de façon complexe les débits liquides et solides d'un cours d'eau et d'entraîner des modifications géomorphologiques et écologiques d'intensités très différentes selon les contextes. Les discontinuités induites dans le système ont essentiellement des origines artificielles liées aux activités humaines et aux aménagements. Parmi les plus importants figurent : **l'occupation du sol**, avec notamment la déforestation ou la reforestation qui affectent directement les apports solides des bassins versants, **les barrages**, qui influent sur les débits liquides et solides, **la chenalisation** ou encore **les épis**, qui impactent directement les variables morphologiques.
La modification d'une ou plusieurs variables de contrôle est donc susceptible d'affecter cet équilibre de façon durable, comme l'illustre le déséquilibre de la balance de Lane (Figure 1-5), et parfois irréversible (Simon et Darby, 1999). Un nouvel équilibre peut alors se mettre en place, et ce après transformation du style fluvial, qualifiée alors de métamorphose fluviale (Schumm, 1977).

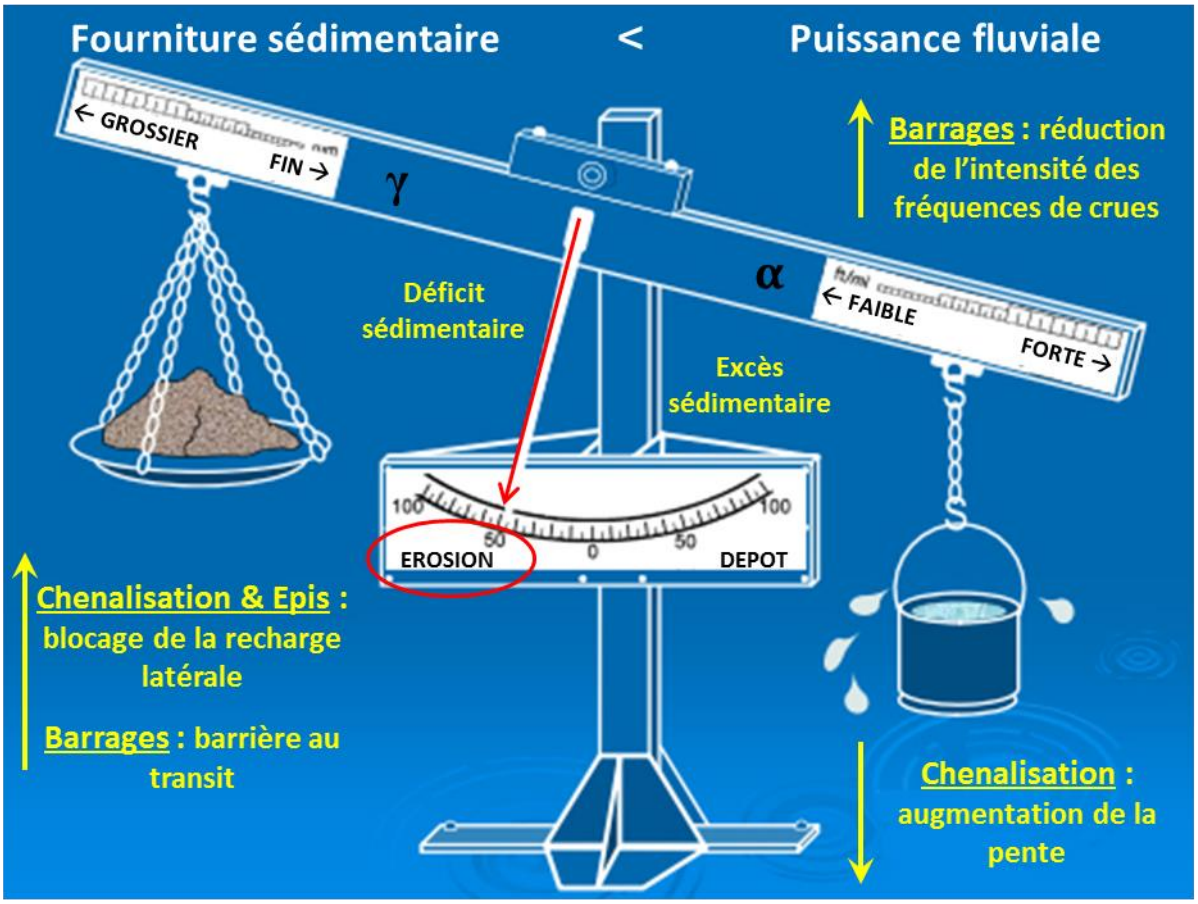


Figure 1-5 : Déséquilibre de la balance avec l'anthropisation des cours d'eau (modifié, d'après Bledsoe, 2010 et Arnaud, 2012)

La balance de Lane est directement ou indirectement déséquilibrée par les pressions humaines exercées sur le système fluvial. Celles-ci peuvent être à l'origine d'une modification (davantage détaillé dans le paragraphe 2) :

- du régime de crue,
- de la pente du chenal au droit des aménagements (rectification, barrages, seuils),
- du transport sédimentaire (quantité et granulométrie) influencé par une modification des apports sédimentaires amont provenant des versants et des affluents ou encore par les modifications du lit et des berges (radiers, enrochements),
- de la rugosité hydraulique (taille des sédiments et pente de la ligne d'eau) des chenaux de façon durable (chenalisation, pavage du lit) ou régulière (entretien de la végétation aquatique, des bancs et des bords de berges, enlèvement des embâcles, curages).

2. L'anthropisation des cours d'eau : pressions et impacts morphologiques

Les cours d'eau des pays industrialisés ont été largement artificialisés durant la deuxième moitié du 19ème siècle et tout au long du 20ème siècle (Petts, 1984 ; Brookes, 1988). Leurs fonctionnements hydro-sédimentaires ont été bouleversés, parfois de façon irréversible, par les modifications de

l'occupation des sols des bassins versants, qui sont à l'origine des flux, et de leur transfert (liquide et solide), associé au contrôle du réseau hydrographique.

Trois principales interventions anthropiques directes dans le chenal en eau et sur les berges ont été bien souvent observées (Tableau 1-1) :

- la chenalisation et la protection des berges,
- l'extraction de matériaux dans le lit mineur,
- l'implantation d'ouvrages hydrauliques transversaux (seuils et barrages).

Interventions	Périodes	Intensité	Objectif(s) / Usages
Chenalisation (recalibrage, rectification, rescindement de méandres)	- Dés les 18e et 19e siècles	+	- Réduire les conséquences des inondations et l'érosion des terres riveraines, - Navigation
	- Début années 1950 / fin années 1980	+++	Réduire les conséquences des inondations et l'érosion des terres riveraines
Extractions de matériaux en lit mineur	- Depuis l'Antiquité	+	Matériaux de construction « bon marché » (bâtiment, voirie, etc.)
	- 19e siècle	++	
	- 20e siècle	+++ (mécanisation des outils)	
Implantation de barrages et de seuils	- Moyen Âge au 19e siècle	+++	Usages initiaux[1] : meunerie, forge, irrigation, flottage, pisciculture, etc. + débuts de l'hydroélectricité (19e)
	- 20e siècle	+	Abandon des usages initiaux et développement de l'hydroélectricité (barrages) + stabilisation des lits (seuils)
	- Années 1980	+	Seuils de compensation et de résorption des impacts physiques et écologiques du recalibrage

Tableau 1-1 : Principales interventions humaines directes sur la morphologie des cours d'eau et leur intensité de modérée (+) à forte (+) (Malavoi, 2007)

2.1. L'occupation des sols au sein du bassin versant

Dans les années 1840, une campagne de reboisement des versants alpins et du contrôle de l'érosion en tête du réseau hydrographique a été menée pour limiter la fréquence d'apparition des crues et des glissements de terrain. Le service Restauration des Terrains de Montagne (RTM), rattaché aux Eaux et Forêts, fut créé dans le but d'entreprendre des travaux pour mieux contrôler ces catastrophes naturelles de grande ampleur (Chondroyannis, 1992). Entre les années 1880 et la Première Guerre mondiale, de nombreux ouvrages hydrauliques ont été réalisés, tels que des barrages retenant les alluvions, des tunnels de dérivation ou encore des travaux de terrassement et de plantation. La Drôme et ses affluents (Landon, 1999 ; Liébault, 2003), le Fier et l'Isère (Bravard, 1991) et, plus globalement, l'ensemble des rivières alpines (Rinaldi et Simon, 1998) ont été concernés par les travaux du service RTM. A cela, s'ajoute une colonisation végétale naturelle qui a touché les versants et les fonds de vallée à la suite d'une déprise agro-pastorale. Ceci a conduit à un tarissement des entrées sédimentaires à l'origine d'une incision des chenaux qui s'est propagée vers l'aval. Cette incision a été exacerbée aussi par la végétalisation des marges fluviales résultant de la déprise et qui a provoqué une augmentation de la

capacité de transport du chenal. Ainsi, de nombreuses rivières de montagne et de piémont ont vu une diminution de leur bande active et une végétalisation de leurs bancs (Peiry, 1988 ; Liébault et Piégay, 2002 ; Dufour, 2005 ; Rollet, 2007). Ces modifications d'occupation du sol ont eu un impact important sur la réduction de l'activité torrentielle et sur le transfert des sédiments, modifiant les flux à la source.

2.2. Les travaux de modification du chenal

Les travaux de chenalisation consistent en un ensemble d'interventions humaines modifiant directement la géométrie du lit mineur. Brookes (1985, 1988) distingue cinq types d'interventions principales, parmi les méthodes couramment employées pour la chenalisation (Tableau 1-2) :

Intervention	Méthode	Conséquence directe sur le lit
Recalibrage	Elargissement et approfondissement du chenal	Augmentation de la capacité d'évacuation des débits de crue du lit
Réalignement Rectification	Raccourcissement d'une portion sinueuse ou méandriforme par recoupements artificiels des coudes	Augmentation de la vitesse du courant par augmentation de la pente.
Endiguement	Augmentation localisée ou étendue de la hauteur des berges	Limitation des débordements, protection des espaces agricoles et urbanisés contre les crues et contre les érosions dues à l'ajustement des rivières, augmentation de la capacité hydraulique du lit en hautes eaux.
Protection de berges	Aménagements localisés de structures fixes telles que les épis, implantés dans les concavités des sinuosités	Contrôle de l'érosion des berges
Entretien Curage	Enlèvement des obstructions, curage des matériaux du lit	Réduction de la rugosité du lit et de la pente de la ligne d'eau

Tableau 1-2 : Principaux types d'interventions en rivière relevant de la chenalisation, modifié d'après Brookes (1988) et Wasson et al. (1995).

Les premiers travaux ont consisté à endiguer les cours d'eau (Tableau 1-2). L'objectif était de protéger les terres riveraines contre les inondations et les érosions de berges, principalement en réponse à des besoins agricoles, industriels et urbains, mais aussi pour protéger des sites nouvellement exposés aux crues en raison d'une pression urbaine de plus en plus forte le long des rivières. C'est pour cette raison que ces ouvrages ont d'abord été construits sur des secteurs présentant un style fluvial en tresses où la largeur du lit majeur pouvait atteindre plusieurs centaines de mètres de largeur, comme cela était le cas pour le Haut-Rhône, le Haut-Rhin et la Durance. Les travaux d'endiguement, entre les 18ème et 19ème siècles, ont provoqué la disparition du tressage fluvial sur une part importante des cours d'eau alpins français : l'Arve, la Drôme, la Durance, l'Isère, le Rhône et le Var (Bravard et Peiry, 1993 ; Peiry et al., 1994). En effet, les digues contraignent le chenal et stoppent l'érosion des berges à l'origine d'échanges sédimentaires importants latéralement et d'une bande active présentant de nombreux bancs. Le confinement des écoulements dans le lit mineur, ne permettant plus la dissipation de leur énergie, augmente la capacité hydraulique du lit, engendrant une érosion verticale du lit et une rétraction de la bande active (Peiry, 1987 ; Wasson et al., 1998), comme la basse vallée de la Drôme (Landon, 1999), la basse vallée de la Durance (Delahaye, 2000), le Haut-Rhône en Chautagne (Klingeman et al., 1994) ou encore le Rhône Moyen à Péage de Roussillon (Fruget, 1989). Le cours d'eau voyant sa largeur réduite par la chenalisation et son débordement dans la plaine alluviale n'étant

plus permis par le confinement et la sédimentation fine sur les marges, les maxima instantanés de crues et le risque d'inondation sont fortement augmentés à l'aval (Wasson et al., 1998).

Les impacts hydromorphologiques et écologiques de la chenalisation sur le système fluvial sont très complexes et dépendent du type d'aménagement mis en place. Par exemple, le blocage de la dynamique latérale entraîne une réduction de la diversité morphologique du corridor fluvial et de sa qualité écologique (déconnexion des marges alluviales et du chenal principal, réduction de la capacité d'auto-épuration). La diminution des apports latéraux peut aussi provoquer un déséquilibre entre débit solide et débit liquide conduisant à la diminution de la diversité des faciès morphologiques et donc des habitats aquatiques.

2.2.1. La rectification du cours d'eau

La chenalisation d'un cours d'eau induit généralement une modification de la géométrie du lit, de la granulométrie du fond et des faciès d'écoulement dans la section chenalisée (Wasson et al., 1995). Ces modifications peuvent s'étendre au-delà de la section touchée, entraînant des effets à long terme après l'intervention, et aboutissant à une altération irréversible du milieu physique. Parmi les cinq types d'intervention visant à la chenalisation, la rectification est le type d'intervention privilégié conduisant à une diminution de la longueur développée du cours d'eau, c'est-à-dire sa canalisation. La pente se voit ainsi augmentée, entraînant une élévation des forces tractrices (ou contrainte de cisaillement ou encore *shear stress*) et de la puissance fluviale (ou *stream power*), donc de la capacité de transport, provoquant alors une incision. Ici, l'incision est inscrite dans le temps, souvent sur plusieurs décennies, et bien souvent sur de longues sections du réseau hydrographique, se propageant à l'amont des sections rectifiées (Galay, 1983 ; Simon et Darby, 1999). Cette incision est souvent amplifiée par l'artificialisation des berges qui empêche la recharge par érosion latérale et par la perte de connectivité transversale entre le chenal et le lit majeur, notamment lors des crues (Peiry, 2003). L'enfoncement du profil en long ne se cantonne pas à la section rectifiée ; l'incision progresse vers l'amont par érosion régressive et entraîne le dépôt des sédiments érodés vers l'aval (Park, 1977 ; Brookes, 1988).

L'impact majeur le plus fréquent de la chenalisation est la mise en place d'une morphologie homogène, opposée à celle des cours d'eau naturels plutôt diversifiée (Wasson et al., 1995). Cette situation se traduit par une homogénéisation des conditions d'écoulement et une disparition des structures d'abris. La Figure 1-6 compare la morphologie d'un segment de cours d'eau naturel, comportant des conditions d'habitat diversifiées et une alternance seuils-mouilles, et celle d'un segment artificiel, caractérisée par l'homogénéisation de l'habitat. Les conditions physiques du système fluvial sont aggravées suite aux épisodes de crues (accélération et homogénéisation des vitesses, disparition des abris, déstabilisation du substrat).

Pour ce qui concerne le substrat, un ajustement de la granulométrie suite à la chenalisation de cours d'eau peut être observé par la mise en place d'un processus d'armurage ou de pavage sur un plus long terme (Brookes, 1988). Il s'agit de la ségrégation des matériaux du lit due à une érosion verticale, par laquelle les fines sont transportées en aval et les grossiers laissés sur place, qui forment une couche protectrice limitant l'encaissement du lit et provoquant sa stabilisation (son immobilisation dans le cas d'un pavage).

Les ajustements suite à la chenalisation d'un cours d'eau interviennent sur de longues périodes, parfois de l'ordre du siècle.

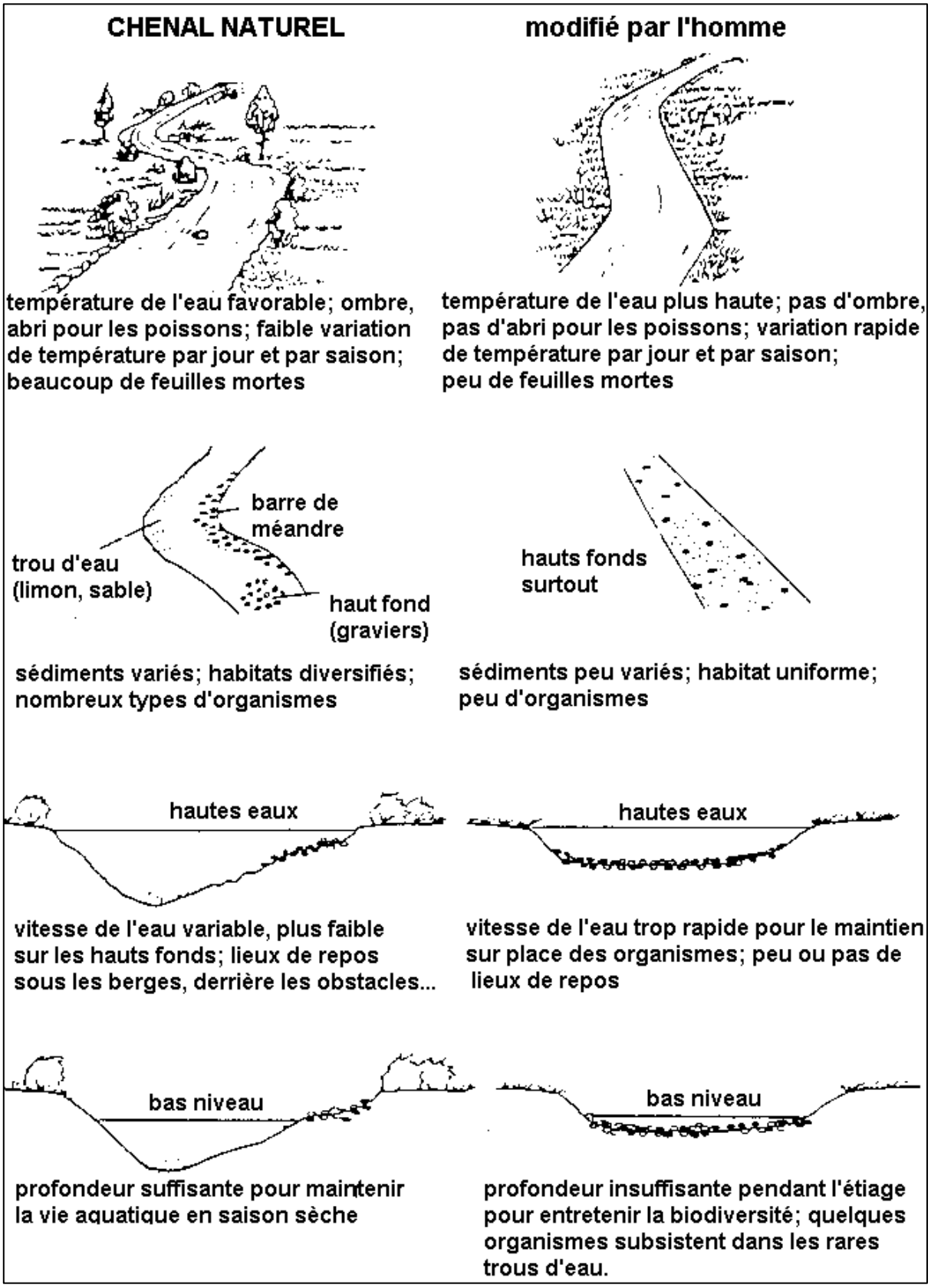


Figure 1-6 : Conséquences de la régularisation d'un cours d'eau : comparaison des morphologies et des paramètres hydrodynamiques entre un segment naturel et un segment chenalisé. Modifié d'après Corning (1975) et Wasson et al. (1995).

2.2.2. Les épis pour corriger et stabiliser le chenal

Les épis sont des ouvrages disposés dans le chenal soit perpendiculairement, soit transversalement (orientés vers l'amont) à la berge. Ils induisent une géométrie bien spécifique des tronçons sur lesquels ils ont été construits (Weitbrecht, 2004). Les écoulements entre les épis sont plus faibles que dans le chenal principal, favorisant le dépôt des fractions les plus fines. Le resserrement du chenal imposé par les épis augmente les forces tractrices et provoque l'incision du lit, maintenant le transit de la fraction grossière dans le chenal.

Les champs d'épis s'atterrissent progressivement lorsque le cours d'eau maintient la dynamique hydro-sédimentaire et n'enregistre pas de modification de son rayon de courbure (Yossef et De Vriend, 2010). La végétalisation tend à accélérer le processus d'atterrissement, tel qu'il est question dans les sections court-circuitées du Rhône, où la colonisation végétale des casiers Girardon (ensemble d'épis et de digues décrits dans le chapitre suivant) a abouti à leur exhaussement par piégeage des sédiments fins (Raccasi, 2008).

2.3. L'extraction de matériaux dans le lit mineur

L'extraction de granulats en lit mineur, existant depuis l'Antiquité (Malavoi, 2007), a vu son activité augmenté au 19ème siècle et atteindre son paroxysme durant la deuxième moitié du 20ème siècle lorsqu'il s'agissait de répondre aux besoins croissants en matériaux de construction (Bravard et Petts 1993 ; Landon, 1999). Considérant la ressource comme inépuisable, les opérateurs ont effectué des prélèvements excessifs au sein du lit, qui ont eu un impact direct sur la variété des faciès fluviaux, appauvrissant les écosystèmes et entraînant des modifications plus ou moins durables des processus érosion-dépôt. Le profil en long est modifié par le piégeage de la charge de fond dans la fosse d'extraction (Kondolf, 1997), interrompant alors le transfert des sédiments vers l'aval et abaissant le fond du lit par érosion (Figure 1-7). Au niveau de la fosse d'extraction, dans le cas d'un déficit en matériaux, deux types d'érosion peuvent intervenir : une érosion progressive vers l'aval de celle-ci et une érosion régressive vers l'amont, forçant le cours d'eau à s'ajuster à son nouveau profil d'équilibre (Figure 1-8). L'interruption de l'érosion est possible à condition de rencontrer des affleurements rocheux ou bien des seuils artificiels (Piégay et Peiry, 1997). Outre le déséquilibre de l'hydrosystème fluvial, ces ajustements morphologiques par érosion régressive et progressive ne sont pas sans conséquence sur les aménagements existants puisqu'ils provoquent des surcreusements au droit de ceux-ci (Kondolf, 1997). Ces enfoncements ont parfois des impacts irréversibles sur les plaines alluviales et leur biocénose (Bravard et al. 1997, 1999).

Figure 1-7 : Processus de piégeage de la charge de fond par le creusement d'une fosse d'extraction (IRS, 2000)

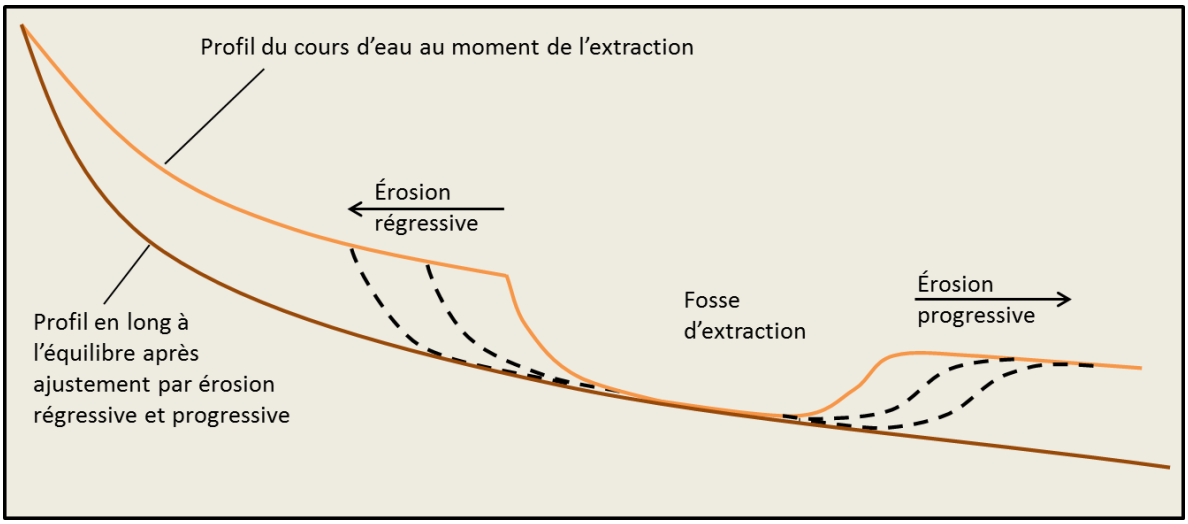


Figure 1-8 : Processus d'érosion progressive et régressive suite au creusement d'une fosse d'extraction (E. Parrot)

2.4. L'impact des barrages sur le système fluvial

L'essor de la construction des grands barrages eut lieu entre les années 50 et 80 pour subvenir aux besoins croissants en électricité. L'impact des barrages sur le milieu est devenu une question importante au milieu des années 70 (White 1977, cité dans Petts et Gurnell 2005). Les ajustements géomorphologiques et écologiques associés à ce type d'ouvrages ont commencé à être décrits de façon précise par Galay (1983) et Williams et Wolman (1984). Depuis plus de 30 ans, les effets morphologiques des barrages ont été largement étudiés (Petts, 1979 ; Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1997 ; Brandt, 2000 ; Grant et al., 2003 ; Petts et Gurnell, 2005 ; Graf, 2006 ; Rollet, 2007 ; Schmidt et Wilcock, 2008 ; Souchon et Nicolas, 2011 ; Grant, 2012).

La complexité des impacts environnementaux résultant des barrages est liée au fait qu'ils influencent simultanément mais variablement les débits liquides et les débits solides, ce qui affecte différemment les variables morphologiques (Galay, 1983 ; Williams and Wolman, 1984 ; Collier et al. 1996, Assani et Petit, 2004). Ils sont aussi une barrière pour la circulation piscicole et affectent ainsi la répartition de la faune aquatique (Malavoi 2007). Selon Petts (1980), trois degrés d'impact sont observés à l'aval des barrages, à savoir, les variables de contrôle (paragraphe 2.4.1), les changements morphologiques du chenal résultant des premiers impacts, et les rétroactions des changements morphologiques sur le fonctionnement écologique (paragraphe 2.4.2).

2.4.1. La modification des variables de contrôle

Les barrages constituent des points de rupture de la continuité géomorphologique et écologique des cours d'eau. Il existe plusieurs types de barrages. Nous retiendrons ici (1) les barrages dits réservoirs, qui entraînent la création d'un bassin à l'amont du barrage (stockage d'eau pouvant entraîner la formation d'un lac) et ne déversent qu'une faible quantité d'eau à l'aval (débit régulé en fonction des saisons et des besoins), et (2) les ouvrages à dérivation, où le barrage de retenue (n'entraînant pas la formation d'un réservoir) renvoie le maximum de débit au canal usinier qui court-circuite le chenal principal à l'amont du barrage et restitue la totalité du débit au système fluvial. Globalement, la construction d'un barrage entraîne la perturbation du système.

La construction des barrages-réservoirs entraîne la modification des débits liquides. En particulier, elle diminue la fréquence, l'amplitude et la durée des crues, et augmente les débits d'étiage (Magalligan et Nislow, 2005 ; Brandt, 2000). Schmidt et Wilcock (2008) ont mis en évidence l'influence des débits solide et liquide sur l'excès ou le déficit sédimentaire en aval des barrages, selon le principe de la balance de Lane (1955). Lorsque la capacité de transport devient trop faible pour mobiliser la charge solide (augmentation des débits solides et/ou diminution des débits liquides), les sédiments sont en excès, et le transport ne peut être assuré sans un accroissement de la pente du lit. A l'inverse, dans le cas où le débit liquide est supérieur au débit solide, les sédiments sont en déficit. Si les débits sont à l'équilibre, la dynamique sédimentaire assure un équilibre entre l'érosion et le dépôt.

Dans le cas des ouvrages à dérivation, le barrage renvoie les débits au canal usinier aux dépens du bras d'origine à l'aval du barrage, où les débits restent faibles. Depuis 1984, les cours d'eau français doivent maintenir un débit réservé équivalent au 1/10ème du module pour les nouveaux ouvrages et au 1/40ème du module pour les ouvrages existants afin d'assurer la préservation des espèces aquatiques (Alava, 2009). Le changement hydraulique causé par les barrages peut perturber la morphologie du profil en long. Tout comme les seuils artificiels, les barrages ont un impact important sur la granulométrie du lit. A l'aval de l'ouvrage, le déficit sédimentaire entraîne une incision progressive susceptible d'induire une atténuation de la pente qui, lorsque l'on est en présence d'une rivière à graviers/galets, est combinée à un pavage du lit (Galay, 1983 ; Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf 1997, 2008 ; Antonelli, 2002 ; Rollet, 2007 ; Surian et Cisotto, 2007). Des exhaussements au niveau des confluences peuvent apparaître et perturber le profil en long lorsque les affluents introduisent des sédiments. Du fait de leur diminution dans les tronçons court-circuités par les dérivations, les débits de crue ne sont plus suffisamment compétents pour mettre en mouvement les sédiments. Dans ce cas, la géométrie du chenal peut se figer. De plus, la réduction des débits à l'aval du barrage induite par la dérivation abaisse la ligne d'eau, ce qui favorise la colonisation de la végétation et par conséquent la diminution de la largeur du chenal.

En amont des barrages, le profil en long peut s'exhausser du fait du blocage des sédiments et la pente peut diminuer. Les travaux de Church (1995) soulignent le rôle des barrages dans le blocage des sédiments et dans l'exhaussement du profil en long en amont de l'ouvrage. La présence de vannes de fond est susceptible de faciliter le transit sédimentaire vers l'aval du barrage à condition que la charge de fond puisse transiter au sein du réservoir où les contraintes hydrauliques sont généralement faibles.

2.4.2. L'incidence sur les variables morphologiques et les rétroactions

Dans le cas d'un déficit sédimentaire, le chenal dispose d'une capacité de transport supérieure à ce que la section aval lui transmet et il dispose alors d'un pouvoir érosif important, c'est le phénomène d'*hungry water*. De fait, la rivière tente de combler ce déficit en se rechargeant avec les sédiments du fond (Galay, 1983 ; Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1997). Le lit à l'aval de l'ouvrage s'incise et la taille des grains augmente par érosion sélective ou lessivage des plus petites particules (les particules les plus petites étant les premières à être mises en mouvement) entraînant le pavage progressif du fond. Si le barrage n'intensifie pas le déficit sédimentaire et/ou si le laminage des crues est très significatif et réduit la puissance fluviale, ce phénomène d'*hungry water* est alors limité. La végétalisation des bancs est favorisée du fait de la diminution de l'amplitude, de la durée et de la fréquence des inondations, provoquant une rétraction de la bande active et un exhaussement des marges végétalisées consécutif au piégeage des matières en suspension (Martin et Johnson, 1987 ;

Marston et al., 1995 ; Johnson, 1997 ; Friedman et al., 1998 ; Surian, 1999 ; Liébault et Piégay, 2002 ; Petts et Gurnell, 2005 ; Cadol et al., 2010).

Dans le cas où c'est le régime de crue qui est le plus modifié, la colonisation végétale se fera simultanément sur le secteur touché. Si au contraire le barrage affecte préférentiellement le flux de sédiments, la végétalisation se fera d'amont en aval, en lien avec la progression aval de l'incision due au déficit sédimentaire (Liébault et Piégay, 2002 ; Dufour, 2005).

Schmidt et Wilcock (2008) ont démontré que les conséquences morphologiques, et donc l'intensité des ajustements, diminuent avec la distance au barrage. En outre, la présence d'affluents modifie les conditions de crue et d'apport sédimentaire. Ils peuvent aussi influencer les ajustements du chenal de façon complexe, tout dépend du régime de crue et des apports sédimentaires relatifs à ceux de la branche principale avant et après la mise en place de l'ouvrage. La complexité des relations entre le chenal et ses affluents à l'aval d'un barrage est représentée dans la Figure 1-9 (Benn et Erskine, 1994 ; Olive et Olley, 1997 cité dans Brandt, 2000 ; Phillips, 2003 ; Grams et Schmidt, 2005 ; Marston et al., 2005). Elle montre les interactions que peuvent avoir chaque compartiment sur les facteurs géomorphologiques principaux, notamment les débits, les capacités de transports, l'érosion du lit et les apports solides.

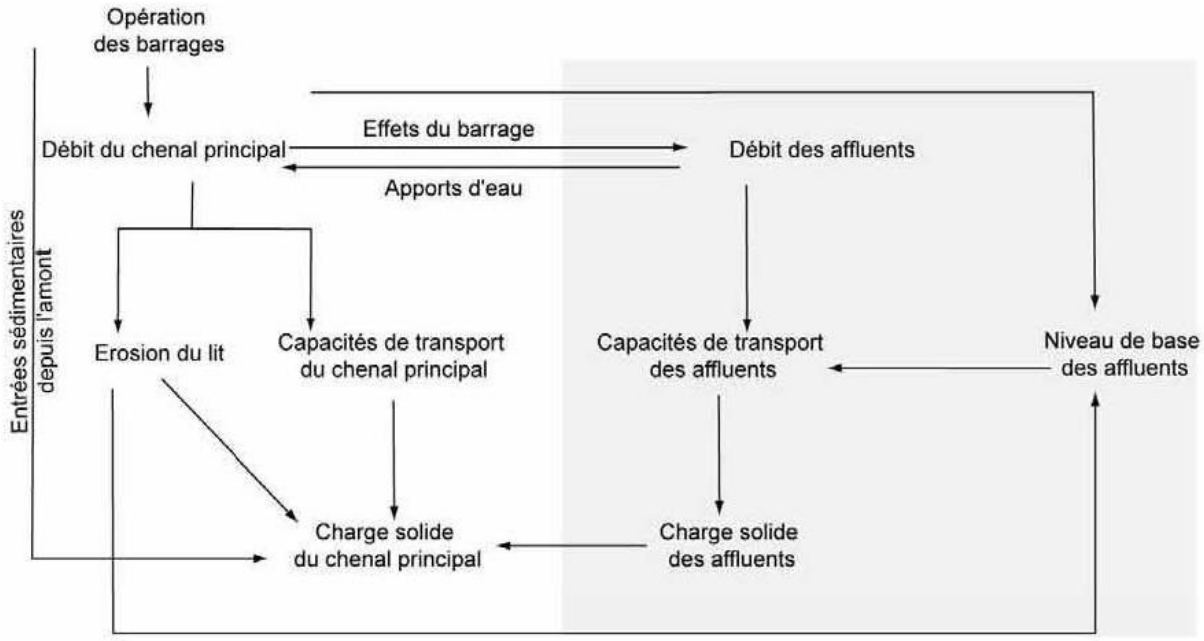


Figure 1-9 : Modèle conceptuel montrant la complexité des interrelations entre les facteurs géomorphologiques clés du chenal principal et de ses affluents à l'aval d'un barrage (d'après Phillips, 2003, dans Rollet, 2007)

2.5. Les échelles temporelles d'ajustement

Différents paramètres peuvent jouer sur les échelles temporelles d'ajustement tels que : la sensibilité du système au changement, la nature et l'intensité de la perturbation ainsi que le temps de propagation de ses effets, et la modification des variables de contrôle sur un tronçon différent de celui qui enregistre les ajustements (Church, 1995).

Selon Graf (1977), le temps de réaction et de relaxation sont les deux temps qui constituent la réponse d'un cours d'eau suite à une perturbation. Ceci tient au fait que le système a une évolution non linéaire

suite à une perturbation, rapide dans un premier temps, puis plus modérée jusqu'au nouvel état d'équilibre. Il en est ainsi lors d'une phase d'incision et de rétraction observée sur des tronçons aménagés. Le ralentissement du processus (parfois son arrêt) est associé à un affleurement du substrat, la formation d'un pavage, l'apparition de nouveaux apports sédimentaires (versants, affluents), la diminution de la capacité de transport, la végétalisation. Ce sont généralement des mécanismes qui s'expriment également selon une temporalité particulière (Williams et Wolman, 1984 ; Surian et Rinaldi, 2003).

Un cours d'eau ayant subi des extractions de granulats dans le lit actif retrouve son équilibre initial, c'est-à-dire un transit solide "normal" après plusieurs dizaines d'années (Figure 1-10), à condition que le flux amont ne soit pas perturbé par ailleurs et que la fosse d'extraction soit de taille modérée relativement à la capacité de transport du chenal, ce qui est loin d'être toujours le cas.

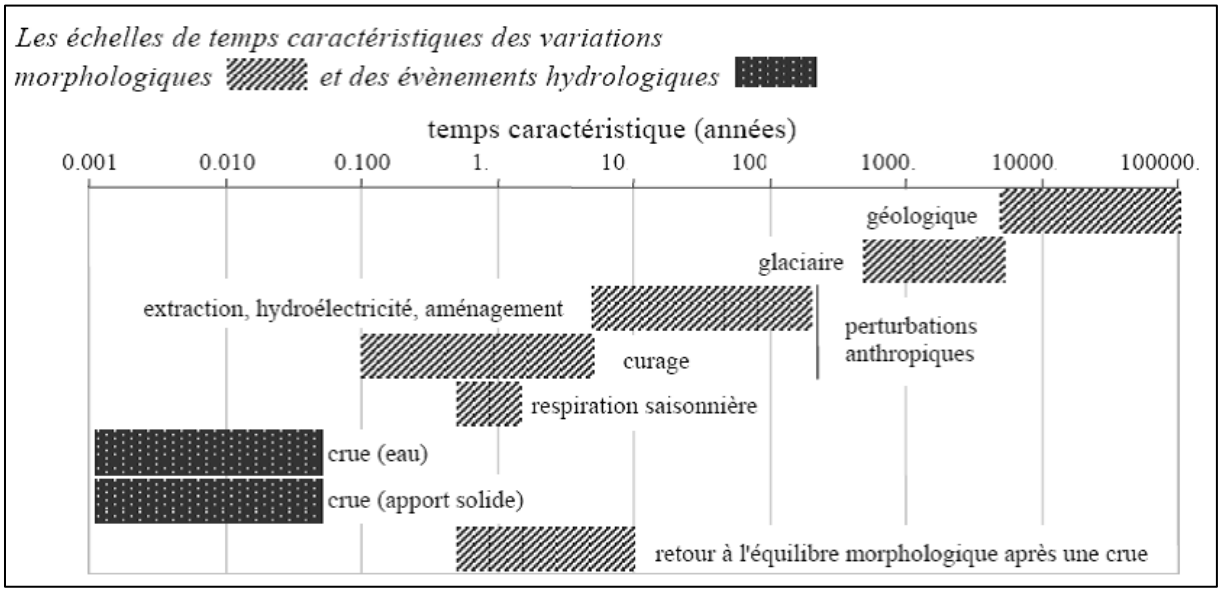


Figure 1-10 : Représentation des échelles de temps caractéristiques des variations morphologiques et des évènements hydrologiques (Belleudy, 2001)

L'analyse des formes fluviales (abordée plus en détail dans le chapitre 3) dépend donc fortement de l'échelle de temps considérée pour observer les mécanismes régissant la géométrie de l'hydrosystème.

Selon Knighton (1984), il existe quatre périodes représentatives des ajustements des composantes morphologiques du chenal (Figure 1-10 et Figure 1-11) :

- le temps instantané (< 10 ans) qui est celui des crues ou d'impacts anthropiques directs très marqués (extraction massive dans le lit mineur),
- le court terme (10 - 100 ans) qui est celui des ajustements fluviaux résultant des aménagements,
- le moyen terme (100 - 1 000 ans) : lié aux interventions humaines et climatiques s'exprimant au sein d'ensembles régionaux ou de grands bassins,
- le long terme (>10 000 ans) caractérisant alors des changements climatiques et géologiques globaux.

L'ajustement naturel des variables morphologiques a lieu majoritairement sur des périodes de temps instantanées à courtes pour le profil en travers (largeur/profondeur), courtes à moyennes pour le style fluvial et les pentes locales et moyennes à longues pour le profil en long (Knighton, 1984).

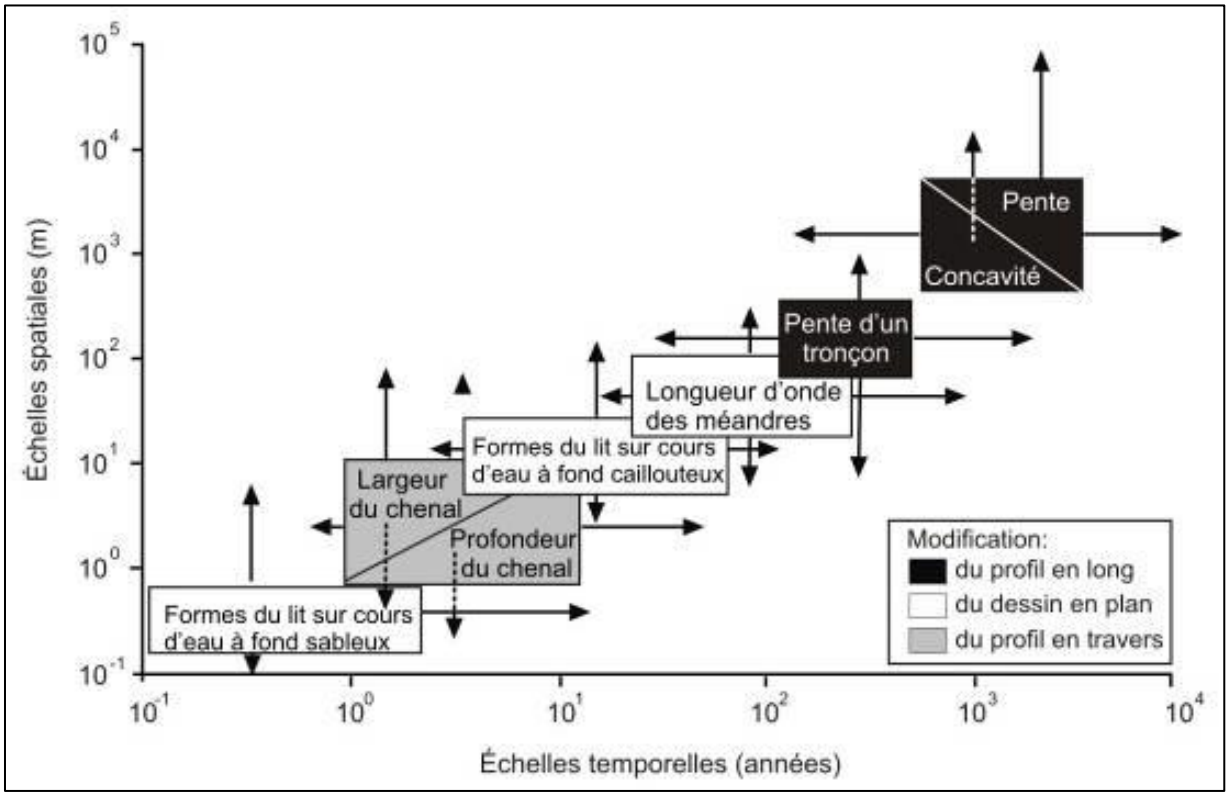


Figure 1-11 : Echelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales (Amoros et Petts, 1993, d'après Knighton, 1984)

Toutes ces modifications morphologiques ont des répercussions sur le fonctionnement écologique des cours d'eau et ont des conséquences socio-économiques qu'il est nécessaire de prendre en compte dans la perspective d'améliorer les conditions.

3. Conséquences écologiques et économiques et solutions possibles

De nombreuses études en écologie ou en géomorphologie, insistent particulièrement sur les perturbations anthropiques des systèmes fluviaux. Comme il a été démontré dans les sections précédentes, les aménagements successifs affectent la géomorphologie du chenal et par conséquent les habitats des communautés aquatiques et riveraines (Lloyd et al., 2002). Les habitats, régis par la dynamique fluviale, déterminent les conditions de vie et d'implantation des différentes espèces (Stillwater Sciences, 2002, 2005, 2006 ; Bunte, 2004).

La complexité du lien entre les processus hydro-morphologiques et le fonctionnement écologique des cours d'eau ne permet pas d'établir une relation nette entre l'intensité des modifications et les impacts sur les écosystèmes (Lloyd et al., 2002). Il existe une multitude de réponses de ces écosystèmes et à différents niveaux du système fluvial (Figure 1-12) en fonction des perturbations (naturelles ou anthropiques) des variables d'ajustement ou de contrôle telles que : la variation des apports solide et liquide, l'intensité des ajustements géomorphologiques, les actions d'entretien du cours d'eau (Poff et al., 1997 ; Richards et Julien, 2003).

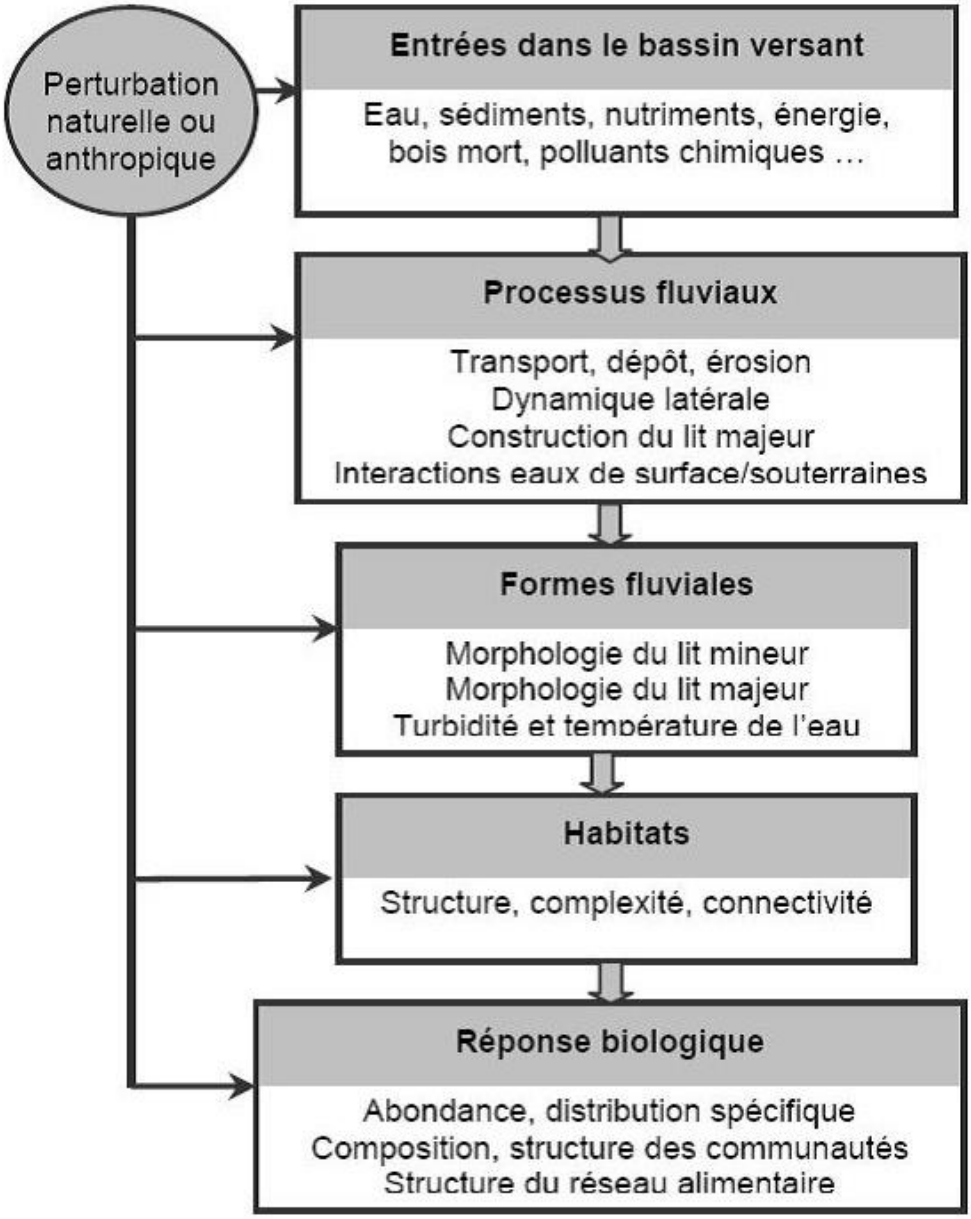


Figure 1-12 : Modèle conceptuel des liens entre les compartiments physiques et biologiques dans les systèmes alluviaux (Arnaud, 2012, d'après Stillwater Sciences, 2005)

3.1. Les modifications des entrées dans le système (liquides et solides)

Les réductions de l'intensité des crues et des apports solides ont un impact sur les espèces aquatiques, les fréquences de connexion latérale, la communication avec la plaine d'inondation et les communautés faunistiques et floristiques (Bravard et al., 1997). La diminution de la largeur du chenal entraîne la réduction en surface des habitats aquatiques et des zones d'échange nappe-rivière (moins d'infiltrations pour recharger la nappe d'accompagnement), et la modification des écotones (zones de transition entre deux écosystèmes telles que la ripisylve) (Bravard et al., 1999).

L'aménagement des cours d'eau a aussi des répercutions sur les variations de température de l'eau (Olden et Naiman, 2010) :

- dans la retenue des barrages : réchauffement progressif lors des crues au printemps, par inertie thermique de l'eau stockée et formation d'une stratification thermique (Belliard et al., 1995),
- en aval de dérivations ou d'ouvrages : refroidissement par les eaux de restitution provenant des couches profondes, réchauffement par réduction artificielle des débits.

Ces modifications thermiques peuvent retarder ou empêcher la reproduction des poissons qui sont dans l'incapacité de retrouver les zones de frai qu'ils identifient par la température et le débit, mais aussi créer des chocs thermiques meurtriers pour les espèces lors de déversements d'eau froide par les ouvrages en période d'étiage l'été (Bravard et Petts, 1993).

3.2. Les conséquences de l'incision

L'incision, une des conséquences principales de l'anthropisation d'un cours d'eau, peut aussi affecter très fortement l'écosystème dans sa globalité et les dimensions socio-économiques du cours d'eau (Bravard et al., 1999). Le Tableau 1-3 synthétise les effets de l'incision observés sur les usages. L'incision peut ainsi être responsable de :

- l'abaissement de la nappe d'accompagnement dont le niveau est relié à celui de la ligne d'eau du chenal (Scott et al., 1999),
- la déstabilisation des berges et des ouvrages de génie civil (Bravard, 1994 ; Kondolf, 1997),
- la simplification des formes fluviales et la modification des vitesses et des profondeurs homogénéisant les faciès d'écoulement et les substrats et provoquant ainsi la simplification des habitats aquatiques, affectant alors la ressource piscicole (Wasson et al., 1998),
- la formation d'un pavage empêchant les poissons de frayer puisqu'il ne leur est plus possible de mobiliser les sédiments devenus trop grossiers (Kondolf, 1997).

L'incision provoquée par les aménagements, tels que les endiguements, les protections de berges, ou les barrages, engendre une triple déconnexion (Arnaud, 2012) qui tend à assécher les milieux humides riverains et à appauvrir les biocénoses (Adam et al., 2006):

- longitudinale : déconnexion des bras secondaires par l'amont ou l'aval,
- latérale : déconnexion totale des bras, diminution de la fréquence des débordements,
- verticale : abaissement du toit de la nappe.

Sur un secteur chenalisé, la diversité spécifique de la végétation diminue et la structure des communautés végétales s'homogénéise (Bombino et al., 2007 ; Dufour et al., 2007).

Compartiments	Impacts de l'incision sur la géométrie, la capacité de transport, la fourniture sédimentaire et les infrastructures	Impacts écologiques et socio-économiques
Nappe	- Abaissement du toit de la nappe d'accompagnement - Remontée des bouchons vaseux et des fronts de salinité dans les estuaires	- Modification de l'alimentation en eau et de la composition de la végétation riveraine - Assèchement des zones aquatiques péri-fluviales - Modifications physico-chimiques et altération de la qualité des eaux - Assèchement et perte des habitats hyporhéiques en berge - Augmentation du risque de contamination des nappes par remontées des biseaux salés dans les estuaires - Augmentation des coûts de gestion des ouvrages de captage - Tarissement des réserves d'eau souterraines et des puits AEP
Ouvrages	Affouillement des ouvrages en lit mineur (seuils, ponts, pipelines, protections de berges, conduites, barrages) par enfoncement du fond par érosion régressive ou progressive	Déstabilisation des fondations d'ouvrages et des traversées sous-fluviales pouvant entraîner leur destruction ou des réparations coûteuses
Milieu riverain	Augmentation de la capacité hydraulique du lit mineur (chenal unique) par chenalisation et réduction du stockage dans le lit majeur d'où une augmentation de la puissance hydraulique et une accélération du transit	Aggravation des crues dans les zones situées à l'aval
	Déconnexion de bras secondaires (chenaux multiples) permettant l'implantation d'une végétation ligneuse au sein de ces anciens chenaux de crues	Augmentation locale du niveau d'eau en crue
	Affouillement et érosion des berges et des versants riverains	- Elargissement et instabilité du chenal - Perte de terrains agricoles et d'infrastructures riveraines - Glissements de terrain
	Rétraction de la bande active, diminution du rapport largeur/profondeur	- Réduction des surfaces d'habitats aquatiques, altération des habitats riverains - Réduction de la surface du lit participant à la recharge souterraine - Concentration de l'écoulement et augmentation des forces tractrices, susceptibles d'aggraver l'incision
Milieu aquatique	Simplification du chenal et abandon des chenaux multiples	- Homogénéisation des habitats aquatiques - Appauvrissement des communautés piscicoles - Réduction des habitats riverains - Modification du style fluvial et des paysages des vallées alluviales
	Disparition des bancs de graviers	- Disparition d'habitats - Réduction de la biodiversité
	Augmentation des apports solides en aval	Exhaussement des tronçons en aval
	Réduction des débordements	Changements dans la mosaïque végétale
	Exhumation de barres rocheuses	- Disparition des graviers pour la reproduction des poissons - Disparition des habitats hyporhéiques - Obstacles à la migration piscicole
	Pavage du fond	Disparition des graviers pour la reproduction des poissons

Tableau 1-3 : Impacts écologiques et socio-économiques liés à l'incision d'un tronçon fluvial aménagé (réalisé d'après Bravard et al., 1999 ; Landon, 2007 ; Arnaud, 2012 ; Braud et al. 2013)

3.1. Les différents objectifs des interventions humaines

Malavoi (1990) propose un modèle permettant de relier les objectifs des interventions humaines à l'estimation de leurs impacts sur la dynamique et la diversité du milieu. La Figure 1-13 permet de classer les interventions en trois grandes catégories selon qu'elles visent à stabiliser, contraindre ou réparer un cours d'eau.

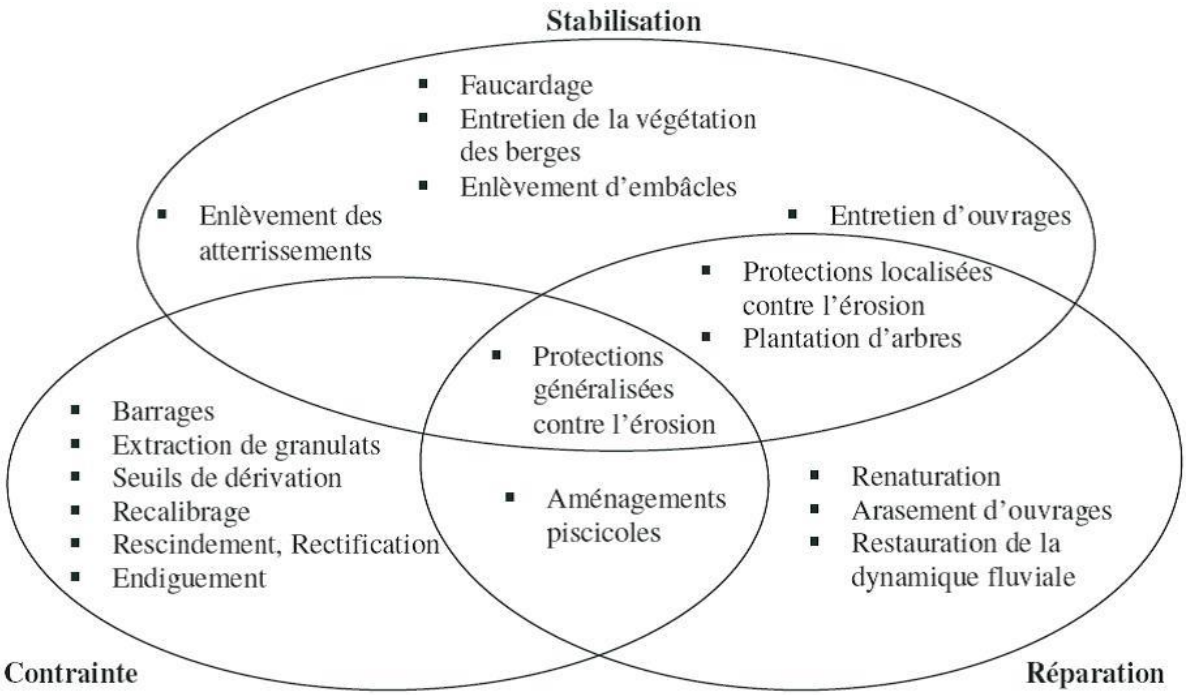


Figure 1-13 : Typologie des interventions humaines touchant le milieu physique d'eau courante. Adaptée par Wasson et al. (1995) d'après Brookes (1985) et Malavoi (1990).

La stabilisation regroupe toutes les techniques permettant de maintenir un cours d'eau (généralement aménagé) dans un état stable, excluant tout retour à une dynamique naturelle souvent synonyme d'instabilité du lit et nécessitant un entretien du fait de la dépendance du système. La contrainte, quant à elle, favorise l'adaptation du milieu à un usage de l'eau pour des raisons essentiellement économiques (remodeler le lit pour diminuer localement les inondations, produire de l'électricité, naviguer, extraire des matériaux…) (Wasson et al., 1995). Enfin, la réparation se distingue sous trois aspects : (1) elle fait suite à des dommages causés par une intervention, et vise (2) à restaurer la dynamique naturelle ou (3) à réhabiliter un cours d'eau afin d'atteindre un nouvel équilibre (Wasson et al., 1995).

La Figure 1-14 recense les principales options de restauration selon la nature des altérations hydro-morphologiques. Ces mesures de restauration articulent gestion technique des opérateurs et suivi scientifique.

Altérations hydro-morphologiques		Modification des débits liquides	Perturbation du transit sédimentaire	Blocage de la mobilité latérale	Homogénéisation des faciès	Appauvrissement du substrat	Déconnexion des milieux annexes	Baisse du toit de la nappe
Action sur …	Causes / Options de restauration	Barrages	Barrages	Chenalisation, épis	Effets de l'incision[1]	Effets de l'incision	Effets de l'incision	Effets de l'incision
… les flux liquides	Augmentation des débits réservés	X						X
… les flux liquides	Restauration de la continuité hydrologique	X						X
… les flux liquides et la structure du lit	Reconnexion des annexes fluviales						X	X
… les flux solides	Restauration de la continuité sédimentaire		X		X	X	X	X
… les flux solides	Introduction de charge grossière		X		X	X	X	X
… les flux solides et la structure du lit	Elargissement du lit mineur		X	X	X	X	X	X
… la structure du lit	Diversification du fond				X	X		X

[1] L'incision est l e plus souvent provoquée par les barrages, la chenalisation, les épis ou les extractions en lit mineur

Figure 1-14 : Principales options de restauration physique des cours d'eau selon la nature des altérations hydro-morphologiques (modifié par Arnaud, 2012, d'après Habersack et Piégay, 2008)

Certains ouvrages anciens assurent néanmoins quelques fonctions écologiques. Si on prend l'exemple des champs d'épis immergés, des études ont montré que ceux-ci pouvaient constituer un ensemble d'abris et de nurseries pour les espèces piscicoles, et d'aires d'incubation pour les algues planctoniques (Reynolds et al., 1991, Sukhodolov et al., 2002). Certains épis ont même été implantés afin de restaurer une diversité de faciès morphologique au sein d'un lit trop uniforme (Thompson, 2002 ; Degoutte, 2006 ; Adam et al., 2007).

Désormais, des ouvrages hydro-électriques sont construits dans un souci de gestion intégrée et de développement territorial et durable. Différentes actions sociales et environnementales sont mises en œuvre pour prendre en compte les impacts anthropiques. Celles-ci comprennent des mesures telles que le remplacement des infrastructures détruites par le réservoir, l'alimentation en eau potable des riverains, le développement de l'agriculture, la protection de la faune sauvage par la création de réserves naturelles, de développement d'activités associées comme le tourisme…

4. Contexte et problématique de recherche

Contexte de l'étude

Il est aujourd'hui commun en géomorphologie d'analyser les changements fluviaux en s'appuyant sur des études comparées, à la fois spatiales et temporelles afin de valider des hypothèses de causalité. Cette approche permet d'identifier les processus et les principaux paramètres contrôlant les changements et ainsi d'établir un diagnostic robuste de l'état du cours d'eau et des raisons qui expliquent cet état (Piégay et Schumm, 2003).

Deux aspects sont essentiels pour mener une étude complète des processus géomorphologiques : (1) la collecte de données réparties dans le temps et dans l'espace, qui permet de développer les modèles évolutifs, et (2) la détermination de la sensibilité des cours d'eau, qui permet d'adapter les modèles prédictifs et les techniques de restauration écologique (Piégay et Schumm, 2003). Il est nécessaire, pour les gestionnaires des cours d'eau, de déterminer les causes des dégradations au-delà du bief et de gérer la charge de fond à une large échelle temporelle et spatiale (Piégay et Schumm, 2003).

C'est dans ce contexte que les présents travaux de thèse se sont déroulés. L'étude de l'évolution morphologique du continuum du Rhône, suite à différentes perturbations anthropiques et naturelles, a fait appel à une analyse comparée des variations verticales du lit et de la composition granulométrique. L'analyse recourt à des méthodes issues de l'étude géomorphologique historique et actuelle, intégrant la dimension spatio-temporelle à large échelle.

Ce travail s'inscrit en outre dans un environnement complexe : les interventions humaines sont multiples dans le temps et dans l'espace, et ont des conséquences différentes sur les variables du système, avec la possibilité de cumuler les effets et de modifier fortement les processus. La principale difficulté est de resituer les actions humaines dans leur contexte afin d'identifier les conséquences propres à chaque phase d'anthropisation : la chenalisation d'abord, puis la dérivation induite par les ouvrages hydro-électriques. L'autre difficulté est de tenir compte des perturbations humaines (extractions, dragages…) et naturelles (crues) qui se sont produites entre chaque période d'aménagement et dont les effets se sont ajoutés à ceux des aménagements. Par contraste avec ces éléments de complexité, la partie française du Rhône, qui constitue notre terrain d'étude, peut être considérée comme un système à part entière. Le lac Léman à l'amont du système fait office de réservoir de stockage sédimentaire, ne laissant quasiment aucun gravier transiter. Les premiers apports proviennent de l'Arve et sont estimés à 100 000 m^3/an (SOGREAH-EGR, 2000-v3d1a4).

Spécificité de l'étude

Rétrospectivement, peu d'analyses comparées ont été menées à une telle échelle spatio-temporelle, couvrant plus d'un siècle et plus de 500 km de linéaire, et sur un tel champ, comprenant à la fois une étude des variations topographiques du chenal et une étude de la granulométrie et des faciès morphologiques. Des études comparées ont été conduites sur des portions plus ou moins longues de cours d'eau soumises à de fortes pressions humaines, à des échelles de temps souvent inférieures à 100 ans et abordées sur des registres différents, telles que :

- Landon (1996, 1999) a démontré l'importance de l'analyse de l'évolution contemporaine du profil en long des cours d'eau afin de rendre compte des phénomènes d'incision résultant de différentes pressions humaines. Il a mené une analyse diachronique sur plusieurs décennies sur les affluents du Rhône moyen en resituant les perturbations anthropiques dans leur contexte, notamment sur l'Aygues (102 km), la Drôme (106 km) et l'Ardèche (120 km) pour les

sections étudiées les plus conséquentes. L'identification des causes de l'incision à l'échelle du tronçon et du bassin versant a permis de mieux orienter les principes de gestion du cours d'eau et de l'ensemble du bassin (Landon, 1996). A des fins plus opérationnelles, Landon (1999) met en évidence le potentiel de recharge sédimentaire à l'échelle du bassin versant et de la plaine alluviale de la Drôme et analyse la mobilité de la charge solide à l'échelle du tronçon afin d'estimer les conditions de réversibilité du processus d'incision.

- L'étude menée par Rollet (2007) se concentre sur deux échelles. Tout d'abord sur un tronçon de 50 km de la basse vallée de l'Ain, qui est très peu perturbé par les activités humaines et par les affluents mais situé à l'aval d'un barrage hydro-électrique. Ensuite, sur la portion la plus amont de ce tronçon, soit les 10 km situés à l'aval immédiat du barrage. Ce zoom permet d'affiner les liens de causalité propre à chaque phénomène. Rollet a réalisé une analyse diachronique sur près de 50 ans de l'évolution du style fluvial en tenant compte de l'impact des barrages. Elle a étudié la dynamique sédimentaire contemporaine en termes de budget et de suivi à l'aide de transpondeurs passifs (PIT-tags) pour définir la capacité d'ajustement aux nouvelles conditions. Ces travaux visaient à définir des actions de gestion durable de la charge de fond permettant de préserver la dynamique du cours d'eau et des écosystèmes associés.
- Habersack et Piégay (2008) ont recensé les études historiques menées sur les cours d'eau alpins anthropisés afin de proposer des améliorations en matière d'opérations de restauration. Ils montrent que plusieurs estimations à large échelle spatiale de la capacité de transport ont été réalisées sur des cours d'eau autrichiens (le Danube et ses affluents) pour mesurer la dégradation du lit provoquée par les travaux de chenalisation : la Salzach sur 182 km, la Enns sur 186 km, la Drave sur 214 km, l'Inn sur 258 km, la Mur sur 280 km et le Danube sur 350 km.
- Singer (2008) a réalisé une analyse de l'organisation longitudinale granulométrique sur 380 km de la Sacramento par prélèvement à l'aide d'une drague (Cooper Scooper). Il s'est servi de données hydrologiques et bathymétriques pour identifier les éventuelles ruptures dans le profil en long afin d'expliquer la répartition sédimentaire bimodale sur 175 km, l'affinement granulométrique observé à l'aval et la transition brutale entre les galets et les sables.
- Dans sa thèse, Arnaud (2012) a réalisé une étude géomorphologique du lit du vieux Rhin en aval du barrage de Kembs, sur un tronçon de 50 km. Elle a ainsi caractérisé la granulométrie du lit et étudié l'évolution de ses variations verticales dans le temps et dans l'espace. Comme le Rhône, ce tronçon a subi des travaux à la fois de chenalisation au 19ème siècle et de barrage, en l'occurrence pour le tronçon étudié une dérivation de l'écoulement dans un canal usinier. Arnaud met en évidence les différents processus qui ont eu lieu au cours du temps suite aux différentes phases d'aménagement (incision, simplification du fond du lit, armurage du fond du lit, rétraction du lit par végétalisation des bancs…).

Il existe donc de nombreuses études sur des aspects détaillés mais à des échelles spatio-temporelles plus courtes que celles que nous proposons d'étudier sur le Rhône. La complexité de l'organisation géographique et les anthropisations successives et variées du Rhône renforcent la particularité de la présente étude.

Problématique de l'étude

Nous cherchons à savoir comment les deux grandes phases d'aménagement ont impacté le linéaire du Rhône, en étudiant l'évolution verticale du lit et l'organisation longitudinale de la charge de fond. Nous nous posons la question de savoir si le profil en long du linéaire du Rhône a drastiquement changé suite aux deux grandes phases d'aménagement comme cela a pu être observé par exemple sur

le tronçon étudié du Rhin (Arnaud, 2012). Dès lors, quel a été l'impact de chaque opération sur le niveau altimétrique du lit, sur les types de faciès morphologiques et sur l'organisation longitudinale de la charge de fond ? Quel est l'état de la dynamique hydro-sédimentaire du fleuve ? Le Rhône est-il aujourd'hui capable de transporter ses sédiments ?

Dans un premier temps, l'analyse portera sur les variations altimétriques du fond du lit du Rhône depuis la fin du 19ème siècle dans le but de caractériser les effets de stockage et d'érosion des différentes phases d'anthropisation du fleuve et de comprendre l'organisation longitudinale des formes du fond du lit (les faciès morphologiques). Dans un deuxième temps, l'étude caractérisera l'évolution du lit par une analyse de la granulométrie. Ce descriptif détaillé de l'évolution du continuum sédimentaire permettra d'identifier différentes zones de dynamique en fonction de leurs caractéristiques granulométriques (pavages, comblement par des fines…). Dans un troisième temps, l'analyse comparée de la granulométrie et des variations altimétriques du linéaire du Rhône permettra de déterminer la variabilité longitudinale de la taille de ces sédiments et de rendre compte de la mobilité potentielle de la charge de fond, des apports des affluents ou encore de l'impact des ouvrages sur les conditions de transport. Ces résultats permettront ainsi de mieux appréhender la dynamique passée et actuelle du transport de la charge de fond. Intégrés dans un modèle hydraulique, ils permettront d'estimer la capacité de transport et de formuler des recommandations pour une gestion durable du fleuve.

2e Chapitre : *Contexte général du Rhône*

1. Cadre géographique, géologique et hydrologique

1.1. Le réseau hydrographique du bassin du Rhône

Le fleuve Rhône prend sa source au glacier de la Furka, à 1753 m d'altitude, situé dans le massif alpin du Saint-Gothard en Suisse. Le Rhin, d'orientation Nord-Ouest, prend aussi sa source dans ce massif, mais le Rhône s'en différencie vite par son orientation méridionale. L'Inn, affluent du Danube, et le Tessin, affluent du Pô prennent également leur source sur le Saint-Gothard, ce qui lui vaut le nom le « château d'eau de l'Europe ». La fonte estivale non compensée par les apports neigeux hivernaux sur l'ensemble des glaciers alpins n'a pas épargné le glacier du Rhône, qui a reculé de plus de 2 km depuis 1850 (Bravard et Clemens, 2008).

Fleuve	Surface du bassin (km^2)	Longueur (km)	Débit moyen (m^3/s)
Rhône	96 500	810	1 700
Loire	117 000	1 000	900
Seine	78 650	755	400
Garonne	55 000	645	650

Tableau 2-1 : Caractéristiques physiques de quatre fleuves français majeurs se jetant dans les eaux françaises

Avec une longueur totale de 812 km de sa source à la mer Méditerranée, dont 512 km en France (Bravard et al.,1992 ; Olivier et al., 2009), et un bassin versant total de 98 500 km^2, dont 90 500 km^2 en France (Bravard, 2010), le Rhône draine près d'un cinquième du territoire français. Il est le deuxième fleuve le plus long de France après la Loire, dépassant de peu la Seine et plus nettement la Garonne (Tableau 2-1). Malgré une longueur relativement faible, le débit du Rhône (plus important que celui de la Loire) rapporté à l'étendue de son bassin (débit spécifique) peut être comparé à celui de l'Amazone (Tableau 2-2). Le Rhône présente un débit moyen de 1700 m^3/s, un débit d'étiage conventionnel de 520 m^3/s et un débit de crue centennale de 11 300 m^3/s à Beaucaire, station hydrométrique en aval du dernier affluent et en amont de la diffluence entre le Petit et le Grand Rhône à Arles. Le fort débit spécifique du Rhône, dépassant ceux du Danube et du Rhin, permet de le classer parmi les grands fleuves européens. Son débit moyen le place même au deuxième rang (après celui du Nil) des fleuves se jetant en Méditerranée (Tableau 2-2).

Fleuve	Surface du bassin (km^2)	Longueur (km)	Débit moyen (m^3/s)	Débit spécifique ($l/s/km^2$)
Rhône	96 500	810	1 700	17,6
Amazone	6 150 000	6 570	200 000	32,5
Nil	3 400 000	6 690	2 800	0,8
Mississippi	3 238 000	3 780	20 000	6,2
Danube	801 500	2 870	6 500	8,1
Rhin	185 000	1 320	2 200	11,9

Tableau 2-2 : Caractéristiques hydrographiques de quelques grands fleuves dans le monde

Le bassin versant du Rhône possède une grande diversité climatique et géologique. Selon Bravard et Clemens (2008) et l'Etude Globale Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1), le Rhône peut être divisé en cinq régions hydrographiques aux reliefs et aux climats distincts, comprenant un système lacustre et un large réseau d'affluents puissants impactant directement le régime du fleuve (Figure 2-1).

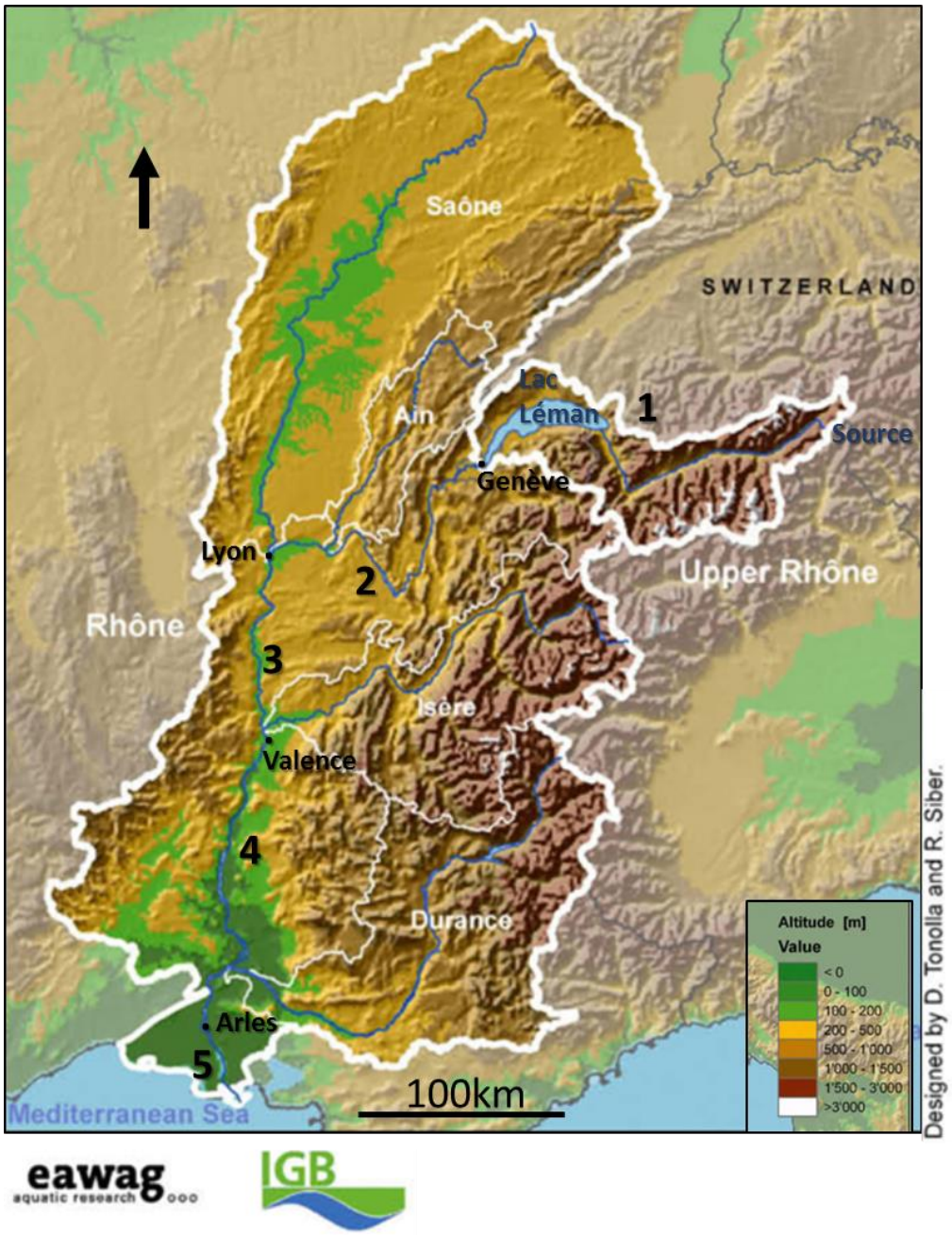


Figure 2-1 : Régionalisation du bassin versant du Rhône en sous-bassins hydrologiques. Modifié d'après Olivier et al. (2009)

1.1.1. Le Rhône alpestre et le lac Léman

Le Rhône dit alpestre (tronçon 1, Figure 2-1), depuis sa source jusqu'au Léman, soit 165 km, est un torrent de forte pente (0,89 %) se transformant au fur et à mesure en une rivière de montagne. Son bassin versant draine une surface de 5220 km² dont plus de la moitié se situe au-dessus de 2100 m d'altitude. Le Rhône progresse vers le Sud-Ouest dans le couloir du Valais, une vallée glaciaire encaissée entre les Alpes Bernoises au Nord et les Alpes Pennines (Valais) au Sud, où il est alimenté par de grands glaciers. Puis il se dirige vers le Nord-Ouest pour sortir des Alpes entre les massifs du Chablais et de l'Oberland bernois et pénétrer dans le lac Léman.

Avec une longueur de 70 km, une surface de 582 km² et un volume d'eau douce de 89 km^3, le Léman est le deuxième plus grand lac naturel d'Europe en superficie après Balaton en Hongrie et possède la plus grande masse d'eau d'Europe. À la sortie du lac, l'altitude du Rhône est de 370 m et la surface totale drainée jusque-là est de 7990 km². Le débit de sortie du Léman est contrôlé par le barrage de Seujet, situé à Genève en Suisse. Ce barrage permet à la fois de réguler le niveau du lac et de moduler le débit du Rhône.

1.1.2. Le Haut Rhône

Depuis l'embouchure du Léman jusqu'à la confluence de la Saône, le bassin versant du Haut Rhône draine une surface de 12 300 km² (tronçon 2, Figure 2-1). A Genève, le Rhône reçoit en rive gauche l'Arve, son premier affluent important (Figure 2-2). Le fleuve parcourt ici près de 210 km, avec une pente moyenne de 0,1 %. Dès son entrée en France, il s'oriente vers le Sud-Ouest, franchit la partie orientale du Jura par la cluse de Bellegarde et s'insère dans une vallée étroite et encaissée coincée entre le massif du Jura au Nord-Ouest et le massif des Préalpes au Sud-Est avant de rejoindre la plaine de l'Ain. A l'amont de l'Ain, le Rhône progresse dans une succession de gorges étroites, correspondant aux défilés de Bellegarde et de Yenne (secteur de Belley), et dans des plaines aux champs d'inondation étendus que sont les marais de Chautagne et Lavours (secteur de Chautagne) et la plaine de Yenne. Le Rhône reçoit le Fier à Chautagne, un affluent préalpin de rive gauche. Le lac du Bourget, à l'Est de Yenne (Figure 2-2), est le plus grand lac naturel de France et draine un bassin de 560 km². Autre particularité de ce lac, il est directement connecté au Rhône par le canal de Savière : en période normale, il alimente le Rhône tandis que, lors des crues, le fleuve se déverse dans le lac, qui agit alors comme un bassin de rétention et permet l'écrêtement des crues. Dans le secteur de Brégnier-Cordon (Figure 2-2), le Rhône contourne le plateau de l'île de Crémieu en effectuant un crochet vers le Nord et reçoit en rive gauche le Guiers, un affluent préalpin. A l'amont de Lyon, le fleuve reçoit un autre grand affluent en rive droite : l'Ain. Puis il arrive à Lyon où il reçoit la Saône, un affluent important en rive droite. Bloqué par le Massif Central, il est alors contraint de prendre une orientation Nord-Sud.

1.1.3. Le Rhône Moyen

Entre la Saône (Lyon) et l'Isère (à l'amont de Valence), le Rhône progresse sur près de 110 km au pied du Massif Central et le long des Préalpes (dont il est séparé par une série de larges plaines et plateaux), avec une pente moyenne faible (0,05 %), et draine alors un bassin versant de 46 150 km² (tronçon 3, Figure 2-1 & Figure 2-2). Il devient, suite à la confluence de la Saône, un fleuve puissant et plus régulier qui traverse une succession de défilés et de plaines alluviales. Sa large vallée est globalement rectiligne, mais présente quelques coudes de faible ampleur et des bras morts ou lônes (appellation régionale) dans la plaine d'inondation.

1.1.4. Le Rhône inférieur

Le Rhône parcours 160 km depuis l'Isère, affluent alpestre de la rive gauche, jusqu'à l'amont du delta, avec une pente moyenne de 0,06 %, et draine un bassin de 29 150 km² (tronçon 4, Figure 2-1). Comme le tronçon précédent, le fleuve s'écoule dans la partie méridionale du bassin de façon quasi rectiligne vers le Sud, contraint par les massifs, au travers de défilés et de plaines alluviales. Il reçoit quelques affluents en rive droite, alimentés par le Massif Central (Cévennes), notamment l'Eyrieux, l'Ardèche,

la Cèze et le Gard, et des affluents plus importants et puissants en rive gauche, alimentés par les Alpes, comme l'Isère, la Drôme, l'Aigues, l'Ouvèze et la Durance.

1.1.5. Le delta

Le fleuve se divise en deux bras de très faible pente (0,004 %) au niveau d'Arles, le Grand Rhône et le Petit Rhône qui bordent la Camargue (tronçon 5, Figure 2-1), une plaine deltaïque de 500 km², soit près d'1/100ème de celle du Gange. Il est le deuxième delta méditerranéen après le Nil, qui mesure 24 000 km² (Bravard et Clémens, 2008). Le Petit Rhône coule sur 40 km vers le Sud-Ouest, pour se jeter dans le golfe de Beauduc en Méditerranée. Quant au Grand Rhône, le bras principal, il continue en direction du Sud-Est faisant progresser son embouchure sur la mer près de Port-Saint-Louis-du-Rhône. La Camargue est composée de marais, de plaines inondables et de grands étangs (étang de Vaccarès), ce qui lui vaut d'abriter de nombreuses réserves naturelles, des exploitations agricoles (vergers, cultures céréalières, maraîchage, viticultures, rizicultures…) et des marais salants.

1.1.6. Les affluents du Rhône

Selon l'importance de leur bassin versant et de leur régime, les affluents peuvent être regroupés en deux grands ensembles, les affluents principaux et secondaires (Tableau 2-3).

Affluents principaux	Superficie bassin versant (km²)	Affluents secondaires	Superficie bassin versant (km²)
Arve	1 985	Valserine	361
Fier	1 385	Usses	309
Ain	3 750	Séran	160
Saône	29 908	Guiers	608
Isère	11 800	Bourbre	727
Drôme	1 642	Doubs (*)	7 708
Eyrieux	854	Gier	417
Ardèche	2 430	Cance	380
Cèze	1 309	Doux	637
Durance	14 500	Drac (*)	3 618
Gard	2 070	Ouvèze	1 916
		Roubion	613
		Lez	439
		Aygues	1 010
		Verdon (*)	2 289

Tableau 2-3 : Liste des affluents principaux et secondaires du Rhône, (*) sont des sous-affluents. D'après SOGREAH-EGR (2000-V1D1A1).

Parmi les affluents principaux du Rhône, 55 à 60 % du bassin rhodanien est drainé par quatre affluents majeurs : l'Ain, la Saône, l'Isère et la Durance (Bravard et Clémens, 2008 ; SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1), qui se distinguent par la taille de leur bassin versant.

- L'**Ain** est le principal affluent du Haut Rhône. Il prend sa source en Franche-Comté à 700 m d'altitude, et progresse sur 195 km avec une pente moyenne de 0,2 %. Son bassin versant montagneux de 3750 km^2 draine la partie occidentale du Jura méridional.
- La **Saône** prend sa source en Lorraine. La taille de son bassin versant, soit près de 30 000 km², fait d'elle la première rivière française. Elle parcourt 480 km, avec une pente moyenne de

0,014 %, traversant d'abord le Sud-Ouest des Vosges et les plateaux du Jura, puis à l'Ouest le Massif Central, et enfin la plaine bressane dans sa partie centrale. Elle reçoit en rive gauche le **Doubs**, et devient alors un cours d'eau puissant. Le Doubs est une rivière abondante mais irrégulière qui draine le massif du Jura.

- L'**Isère** prend sa source dans les Alpes à 2990 m d'altitude. Elle parcourt une distance de 290 km, suivant une pente moyenne de 0,1 %, et draine les hauts reliefs des Alpes, des Préalpes et du sillon alpin sur 11 800 km². Elle reçoit le **Drac** en rive gauche en aval de Grenoble. Les apports et la puissance de cet affluent alpin augmentent fortement la pente de l'Isère, qui diminue ensuite progressivement dans la basse vallée. La confluence se déroule en deux temps, d'abord à Pont-de-l'Isère, au niveau du canal de dérivation du Rhône, puis à La Roche de Glun, où les eaux de l'Isère sont évacuées du canal par le barrage de l'Isère dans le chenal principal du Rhône.
- La **Durance** est un affluent préalpin qui prend sa source dans les Hautes Alpes. Elle s'écoule sur 305 km avec une pente moyenne de 0,6 %. Son bassin versant montagneux s'étend sur 14 300 km². Elle reçoit en rive gauche le **Verdon**, un affluent à pente forte, qui prend sa source dans les Alpes du Sud. Il draine un large bassin versant montagneux, progressant dans des gorges dans sa partie supérieure. Ses affluents aval contribuent significativement à son module et font du Verdon une rivière très abondante dans sa partie terminale aval.

Quant aux autres affluents principaux et secondaires du Rhône, ils peuvent être, regroupés en quatre sous-groupes, selon la régionalisation du bassin versant : les affluents suisses, du Haut Rhône, du Rhône moyen et les affluents méridionaux (Bravard et Clemens, 2008). Les bassins versants de chaque sous-groupe présentent des caractéristiques hydrographiques distinctes :

- Les affluents suisses du canton du Valais, à l'amont du lac Léman, consistent en des petits torrents alpestres alimentés l'été par la fonte des glaciers et de la neige.
- Parmi tous les affluents du Haut Rhône, l'**Arve** est le seul affluent alpin qui draine le Mont Blanc et divers terrains de montagne. La **Valserine** et le **Séran** sont des affluents jurassiens (rive droite) possédant des bassins de petites tailles par rapport à celui de l'Ain. De ces deux rivières, la Valserine est celle qui draine les parties les plus hautes du Jura. Les **Usses**, le **Fier** et le **Guiers** sont des affluents préalpins (rive gauche). Les Usses drainent des chaînons calcaires et des collines molassiques. Le Fier, qui s'écoule régulièrement dans des gorges notamment à la confluence du Rhône, et le Guiers, qui draine la majeure partie du massif préalpin de la Chartreuse, ont des bassins montagneux majoritairement perméables mais dont le ruissellement est favorisé par les fortes pentes. La **Bourbre** est un affluent significatif de par la taille de son bassin, mais n'a aucune influence sur la dynamique fluviale du Rhône.
- Les affluents du Rhône moyen présentent des réseaux hydrographiques peu étendus du fait de la proximité du Massif Central pour le **Gier** et la **Cance**, et de la proximité des Préalpes pour le **Doux**. Leurs apports annuels en eau sont négligeables sauf en période de crue.
- Les affluents méridionaux peuvent se distinguer en deux branches, les affluents cévenols (Massif Central) en rive droite et les affluents préalpins méridionaux en rive gauche. Parmi les affluents cévenols se trouvent l'**Eyrieux**, l'**Ardèche**, la **Cèze** et le **Gard** qui drainent les formations cristallines et calcaires dures et imperméables du Massif Central. Ces affluents progressent sur de forts reliefs en amont, parfois dans des gorges, avant de déboucher dans la vallée du Rhône où la pente moyenne du cours d'eau se voit rapidement diminuer (caractéristique des rivières de plaine). La **Drôme**, l'**Aigues** et l'**Ouvèze**, affluents préalpins méridionaux, sont issus des Préalpes du Sud et drainent des terrains moins imperméables et aux reliefs plus modérés que ceux des Cévennes.

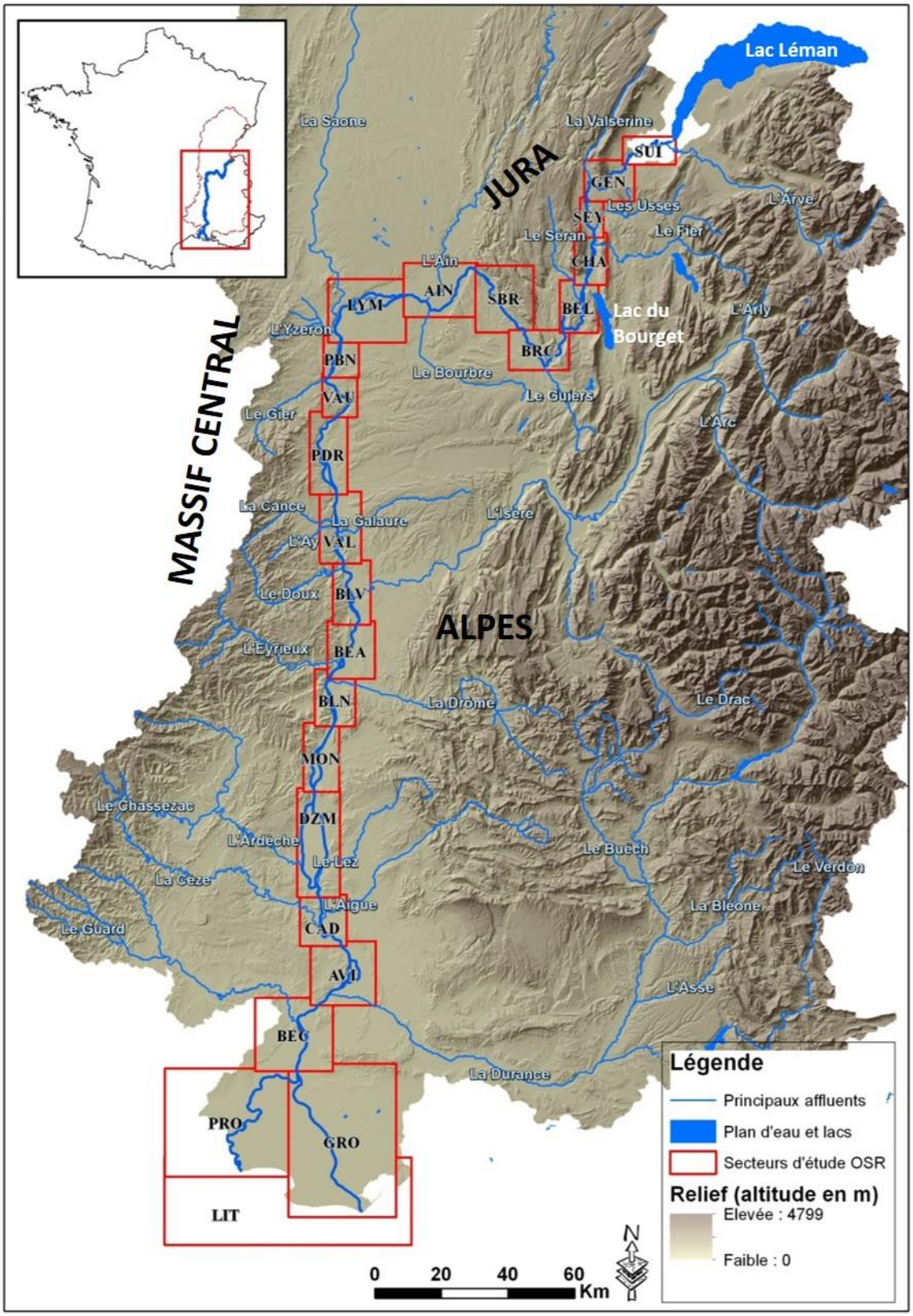


Figure 2-2 : Le Bassin du Rhône à l'aval du Léman, son réseau hydrographique et son orographie.

Localisation des secteurs du fleuve Rhône : Génissiat (GEN), Seyssel (SEY), Chautagne (CHA), Belley (BEL), Brégnier-Cordon (BRC), Sault-Brénaz (SBR), l'Ain (AIN), Lyon-Miribel (LYM), Pierre-Bénite (PBN), Vaugris (VAU), Péage de Roussillon (PDR), Saint-Vallier (VAL), Bourg-lès-Valence (BLV), Beauchastel (BEA), Baix-le-Logis Neuf (BLN), Montélimar (MON), Donzère-Mondragon (DZM), Caderousse (CAD), Avignon (AVI), Beaucaire (BEC), Grand Rhône (GRO), Petit Rhône (PRO) et Littoral (LIT). (Réalisée avec l'aide de G. Fantino)

1.2. Le contexte géologique du bassin du Rhône

L'organisation particulière du corridor fluvial du Rhône est en grande partie expliquée par la géologie de son bassin. Les différents contextes géologiques traversés (les successions de verrous et ombilics, massifs calcaires et cristallins, gorges épigéniques…) et l'organisation du réseau hydrographique sont à l'origine de fortes perturbations de l'affinement granulométrique qui est habituellement observé dans le cas d'un continuum fluvial de plus de 500 km. Le Rhône traverse des unités topographiques et géologiques très diversifiées (Figure 2-3 & Figure 2-4).

D'après Beaudouin et Rycx (2000), à l'aval du Lac Léman, le fleuve est contraint dans les gorges du massif calcaire du Jura (Figure 2-3 & Figure 2-4), correspondant aux secteurs amont jusqu'à Sault-Brénaz (SBR, Figure 2-2). L'imposant massif jurassien, qui borde le tronçon du Haut Rhône, consiste en un vaste plissement des alternances de couches marno-calcaires (succession d'anticlinaux et de synclinaux). Cette formation résulte de la compression tectonique exercée par les Alpes vers l'Ouest durant l'orogénèse alpine, c'est-à-dire l'érection de chaînes de montagne, suite à la remontée de l'Afrique, de l'Arabie et de l'Inde vers le Nord entraînant la fermeture de l'océan Téthys et la collision avec l'Eurasie. L'orogénèse alpine débute au Mésozoïque (Trias, Jurassique, Crétacé - Figure 2-5) et se poursuit jusqu'au Cénozoïque (Paléogène, Néogène, Quaternaire). Le Haut Rhône présente une succession d'ombilics (vallées creusées en dépression) et de verrous glaciaires (collines rocheuses arrondies) résultant du passage du glacier rhodanien lors du Würm, la dernière glaciation globale du Pléistocène (Figure 2-5). Le verrou est façonné par le passage du glacier sur une roche dure ou au niveau d'un coude brutal qui résiste à l'érosion et obstrue la vallée. La formation de l'ombilic est due à la présence du verrou qui ralentit l'avancée du glacier, provoquant alors l'accumulation des glaces à l'amont et ainsi l'érosion des roches plus tendres. La haute vallée du Rhône est caractérisée, depuis la fonte du glacier rhodanien, par une tendance au remblaiement des ombilics glaciaires de Brégnier-Cordon (BRC) à Lyon (Bravard, 1987, Berger et al. 2008). Le Rhône s'ouvre largement dans la région du bas Dauphiné, caractérisée par des terrains calcaires et des marnes sableuses (Figure 2-3) entre Sault-Brénaz et Lyon (SBR-LYM, Figure 2-2). Cette région correspond aux dépôts fluvio-glaciaires issus des eaux de fonte du lobe lyonnais en amont de Lyon.

Après la confluence de la Saône, il s'écoule en direction du Sud jusqu'à la mer Méditerranée. Sur ce tronçon, la vallée du Rhône est de nouveau contrainte à l'Ouest par le domaine cristallin du Massif Central (granito-gneissique) et à l'Est par les conglomérats du bas Dauphiné (dépôts néogènes et du Quaternaire) et le massif calcaire des Alpes (formation du Trias au Crétacé) (Figure 2-3 & Figure 2-4). La largeur de la vallée du Rhône, depuis la Saône jusqu'à Baix-le Logis Neuf (BLN, Figure 2-2), est contrainte par un défilé épigénique, où le fleuve quitte successivement les terrains tendres du tertiaire pour s'enfoncer dans le socle dur cristallin au lieu de le contourner. Ce phénomène particulier s'observe au niveau de Vienne (plaine de l'Est lyonnais), de Saint-Vallier (bassin de Saint-Rambert) et de Bourg-lès-Valence (plaine de Valence). La Saône aussi s'écoule dans une gorge épigénique à Lyon, entre les collines de Fourvière et de Croix-Rousse. L'influence des Alpes sur l'écoulement du Rhône a été majeure. D'abord l'orogénèse alpine a favorisé le passage du fleuve sur le socle métamorphique au Nord de Valence, et granitique au Sud. D'autre part, les rivières alpines puissantes et fortement chargées en alluvions ont maintenu le Rhône à l'Ouest.

A partir de Montélimar (MON, Figure 2-2), les affluents de rive droite (Ardèche, Cèze, Gardon) drainent en partie les Cévennes cristallines (granitiques et métamorphiques) et leur avant-pays calcaire. En rive gauche, les affluents (Drôme, Aygues, Ouvèze) transportent des sédiments détritiques issus de la zone préalpine repoussant bien souvent le fleuve sur sa rive droite. En aval, la Durance

(rive gauche) draine de vastes plaines holocènes résultant du relèvement du niveau marin à la fin de la dernière période froide (entre Avignon-AVI et Beaucaire-BEC, Figure 2-2). Après la confluence avec la Durance, le delta du Rhône prend naissance à partir d'Arles (de BEC jusqu'à la mer).

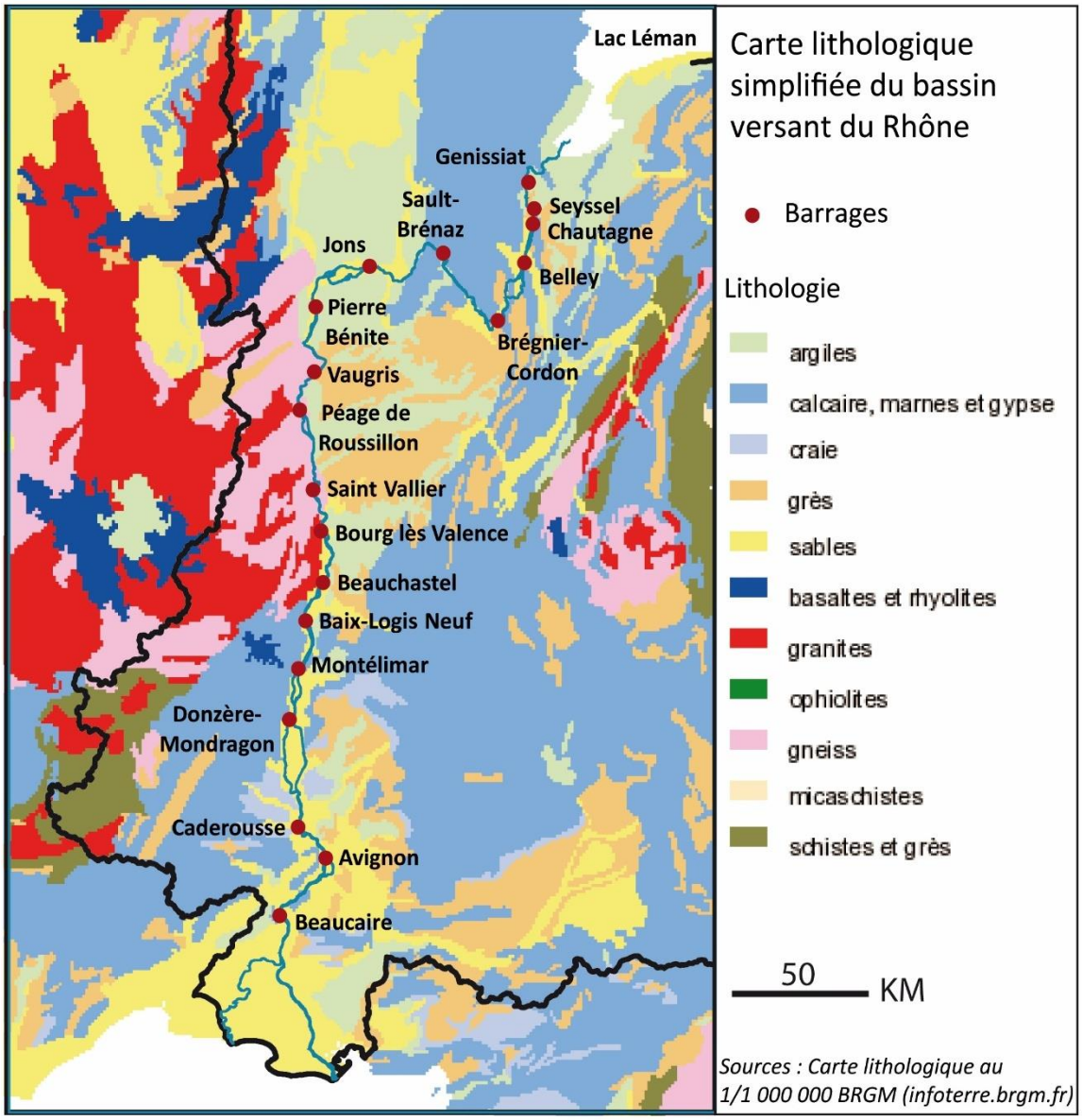


Figure 2-3 : Carte lithologique simplifiée du bassin versant du Rhône, réalisée à partir de la carte lithologique au 1/1 000 000 du BRGM (disponible sur le site infoterre.brgm.fr)

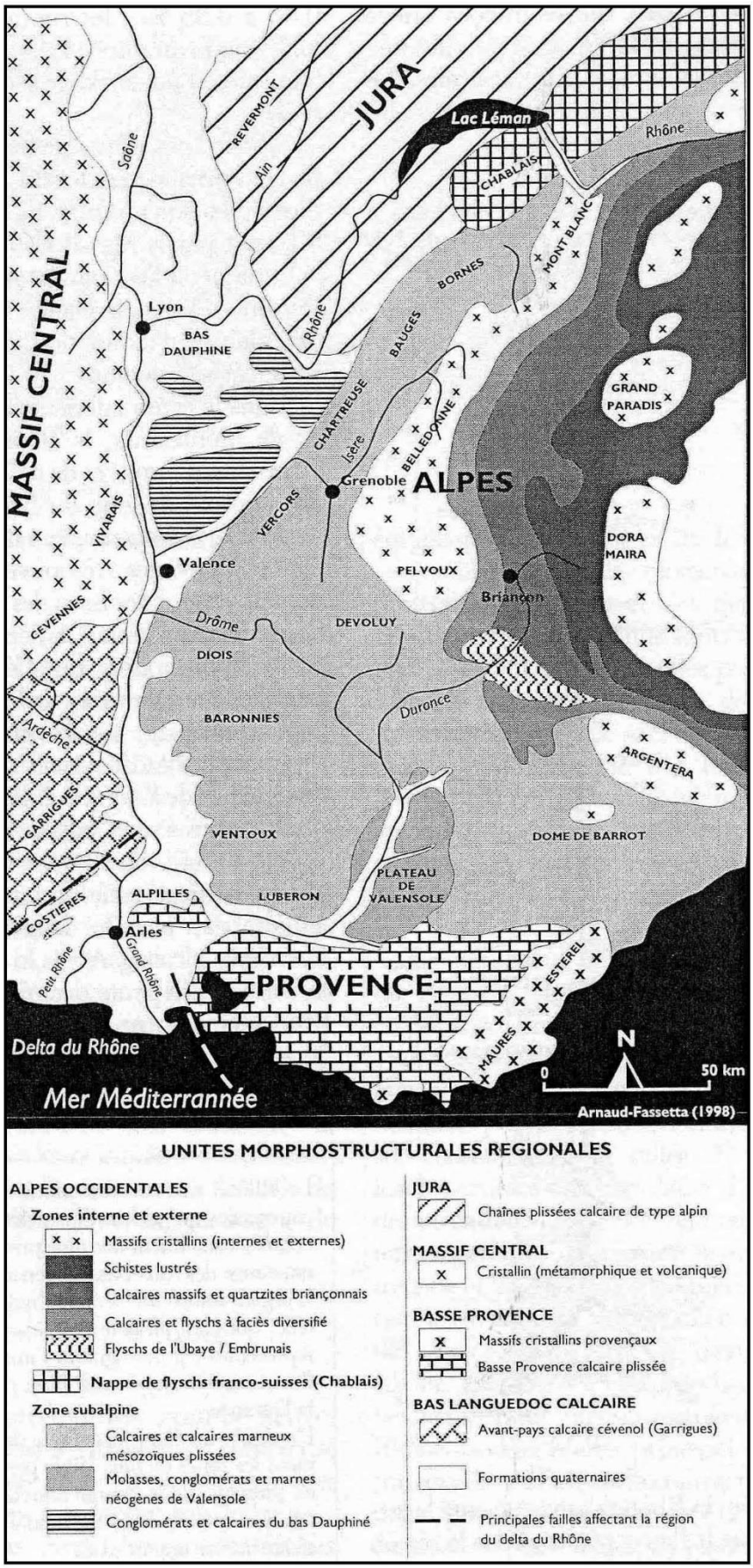


Figure 2-4 : La géologie du bassin versant du Rhône, (Arnaud-Fassetta, 1998)

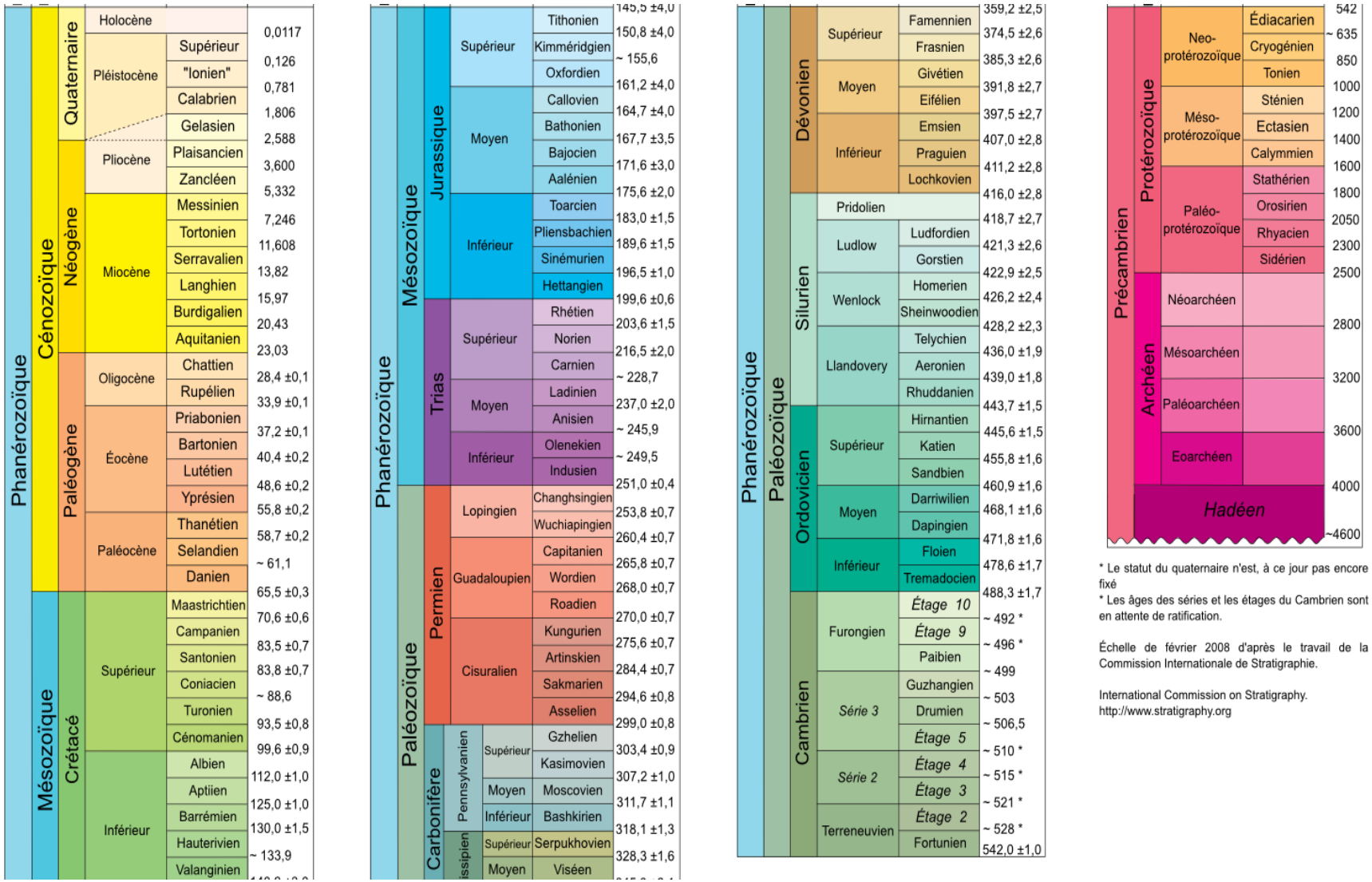


Figure 2-5 : Echelle stratigraphique internationale réalisée en 2008 par l' « International Commission on Stratigraphy » et traduite par E. Le Fol (2009)

1.3. Régime hydrologique et climatique

La présente synthèse hydro-climatique s'est appuyée sur les informations répertoriées dans l'Etude Globale Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1). Elle ne fait pas allusion aux climats plus anciens, même s'il est important de souligner l'existence d'un changement climatique venu perturber la dynamique hydro-sédimentaire : le Petit Age Glaciaire (PAG). Cette période correspond à un climat froid, caractérisé par des précipitations fortes et irrégulières et un accroissement rapide du volume des glaciers, qui débute au 14ème siècle et s'achève au milieu du 19ème siècle dans l'hémisphère Nord (Grove, 1988). A cette époque, grâce à la puissance de ses débits et sa forte pente, le Rhône se voit capable de charrier des sédiments grossiers plus de 100 jours par an (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2).

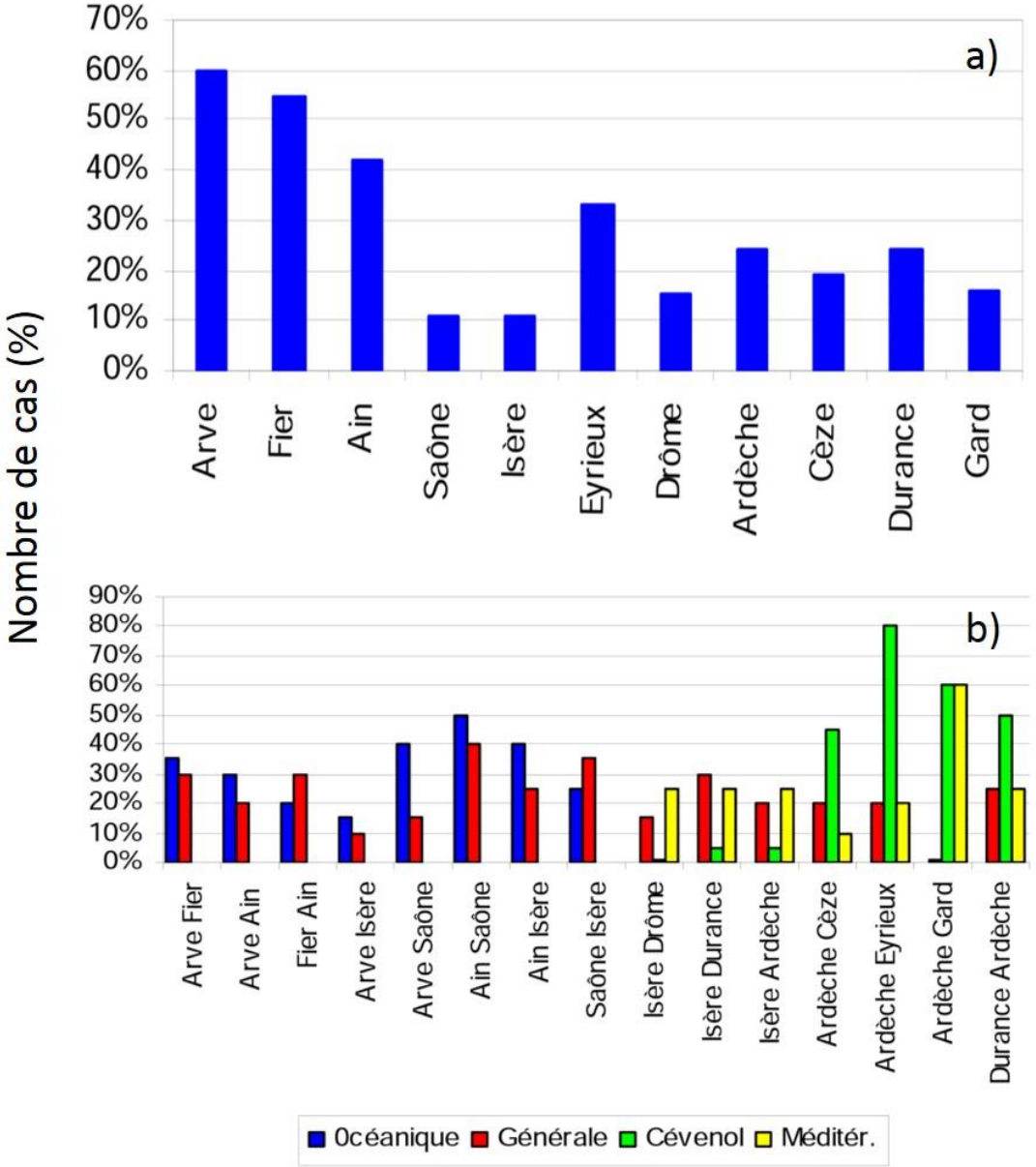


Figure 2-6 : Risques de crues simultanées entre a) l'affluent et le Rhône (tous types de crues confondues – séries 1920 à 1998) et b) les affluents par typologie de crue (SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1)

Le régime hydrologique du Rhône est soumis aux différentes influences climatiques qui règnent sur l'ensemble du bassin versant, en fonction du relief. L'apparition des crues du Rhône est due à une succession d'épisode pluvieux nettement supérieurs à la moyenne et/ou à la fusion nivale accentuant le débit des affluents de montagne. L'Arve, le Fier, l'Ain, la Saône, l'Isère, l'Eyrieux, la Drôme, l'Ardèche, la Cèze, la Durance et le Gard se caractérisent par des régimes de crue différents qui peuvent, par effet combiné entre l'affluent et le Rhône ou entre plusieurs affluents, produire des crues majeures sur le Rhône (Figure 2-6). Dans sa partie Nord, le bassin versant est régi par les climats de montagne du côté des Alpes et de moyenne montagne en ce qui concerne le Jura et les Préalpes. Du Nord du bassin jusqu'à l'Isère (en rive gauche à partir de Lyon), le climat est sous influence océanique. Les pluies océaniques sont amenées par les vents d'Ouest à Sud-Ouest et atteignent essentiellement les affluents alpestres (Préalpes) et du Rhône supérieur. Elles sont à l'origine des crues océaniques affectant principalement la partie septentrionale du Rhône (entre octobre et mars). Entre Lyon et Valence, le bassin en rive droite est soumis au climat de moyenne montagne du Massif Central et au climat cévenol sur le rebord oriental du massif, caractérisé par de très fortes précipitations. Celles-ci sont responsables des crues cévenoles très violentes (entre septembre et novembre) mais presque exclusivement localisées dans cette partie du Rhône. La partie Sud du bassin versant est soumise au climat méditerranéen. Les pluies méditerranéennes sont amenées par les vents du Sud à Sud-Est qui, en fonction du caractère extensif des vents, touchent soient les affluents cévenols, soit les affluents méridionaux en aval de Valence, pouvant même parfois se faire ressentir jusqu'au bassin versant de l'Isère, en plaine de Saône, voire jusqu'à l'Ain. Elles sont à l'origine des crues méditerranéennes qui affectent la partie Sud du Rhône, en aval de Valence. L'apparition de crues généralisées, affectant la totalité du bassin versant, résulte de la combinaison entre plusieurs phénomènes météorologiques comprenant systématiquement une succession de pluies océaniques et/ou méditerranéennes. Ces crues peuvent générer des débits particulièrement forts sur le Rhône telle qu'une crue centennale à l'embouchure (Tableau 2-4).

Le Rhône suisse

Au niveau du Rhône alpestre (Rhône suisse), les chaînes de montagnes forment un écran aux vents océaniques du Nord-Ouest et méditerranéens du Sud et entraînent ainsi des précipitations abondantes sur le bassin versant, majoritairement sous forme de neige (>50 %). Le régime du Rhône dans cette région est alors de type nivo-glaciaire : les basses eaux dominent en saison hivernale et les hautes eaux en saison estivale. Les crues ont lieu lors de la fonte rapide des neiges et de la glace suite à l'arrivée des vents chauds du Sud généralement entre juillet et août. Le cumul des épisodes pluvieux sur les affluents de régime nival peut accentuer les crues du Rhône.

Le Léman

Lorsque le Rhône alpestre, chargé en sédiments, arrive dans le lac Léman, il débouche en réalité dans un immense bassin de décantation. Le flux y est tellement ralenti qu'il faudrait près de douze ans pour renouveler totalement l'eau du lac. Le ralentissement module les débits et, par conséquent, soutient les étiages du Rhône alpestre l'hiver et, l'été, écrête les crues, qui ne se ressentent quasiment plus à l'exutoire.

L'Arve

L'Arve, affluent alpestre, présente un régime nivo-glaciaire dans sa partie amont et une influence pluviale dans sa partie aval. Son régime se caractérise par une période de hautes eaux entre mai et septembre, avec un risque de crue sur l'année entière, à l'exception de la période froide entre février et mars où le risque de pluies importantes est faible. Il influence le débit du fleuve à hauteur de 100 m^3/s

en régime normal (Figure 2-7) mais ses apports au Rhône se font surtout ressentir en période de crue (Tableau 2-4). Les bassins versants préalpins du Fier, affluent alpestre contribuant à près de 50 m^3/s à l'augmentation du module du fleuve (Figure 2-7), et du Guiers, font écran aux vents pluvieux d'Ouest et de Sud-Ouest, modérés par la présence du massif du Jura qui favorise la condensation des masses d'air océaniques chargées en humidité. Ces affluents restent néanmoins soumis à de fortes pluies toute l'année et favorisent des forts débits à la fin de l'automne (entre novembre et décembre) et au printemps (de mars à mai). Sur les bassins versants de l'Arve et du Fier, le temps de réponse rapide et la concomitance des épisodes de pluie peuvent conduire à des crues atteignant simultanément le Rhône. Ces crues peuvent être amplifiées par les apports de fonte importante des glaciers en cas de réchauffement. Le risque de crues concomitantes de l'Arve et du Rhône est le plus élevé avec 60 % des cas de crues dans ce secteur, suivi de près par la concomitance des crues du Rhône et du Fier avec 55 % à l'aval de la confluence (Figure 2-6a). La simultanéité des crues entre l'Arve et le Fier est de 35 % pour une crue océanique et de 30 % pour une crue générale (Figure 2-6b).

L'Ain

Le bassin versant de l'Ain est soumis aux pluies océaniques du fait de son orientation générale Sud-Nord et de son altitude relativement élevée, qui le positionnent comme un mur perpendiculaire au vent dominant. Le module du Rhône augmente d'un peu moins de 100 m^3/s à l'aval de la confluence de l'Ain (Figure 2-7). L'Ain possède un régime pluvial dominant entre novembre et avril, lorsque les précipitations sont les plus abondantes. Les crues de l'Ain sont rapides et atteignent le Rhône avant celles du fleuve. Elles sont générées par les pluies océaniques et quelques rares fois méditerranéennes, et ont généralement lieu en automne et en hiver. Cette influence de l'Ain est mise en évidence par une forte augmentation du débit à l'amont de Lyon (Tableau 2-4). Ainsi, l'Ain peut amplifier de façon conséquente le débit du Rhône lorsque les crues sont concomitantes : avec un peu plus de 40 % de risque pour une concomitance entre les crues de l'Ain et du Rhône (Figure 2-6a) et entre 20 et 50 % avec l'Arve, le Fier, la Saône (majoritaires) et l'Isère, selon le type de crue (océanique ou générale) (Figure 2-6b).

La Saône

La Saône, soumise au régime pluvial (fort Gradex = 25,1) à très faible rétention nivale (faibles reliefs du bassin versant), est caractérisée par des volumes de crue importants entre novembre et avril, avec un risque de crue plus élevé entre janvier et mars. Ses crues ont généralement plusieurs jours de retard sur les crues du Rhône, permettant de les soutenir dans le temps de manière significative : la durée caractéristique de la crue est de 20 jours pour la Saône et le Rhône en aval de la confluence (Tableau 2-4). C'est à la confluence de la Saône que l'augmentation du débit du Rhône est la plus importante avec un gain au module de plus de 400 m^3/s (Figure 2-7). Il existe toutefois quelques faibles cas de concomitance des crues du Rhône et de la Saône (10 %, Figure 2-6a) où la Saône amplifie très nettement les crues du Rhône. Plus fréquemment des crues simultanées ont lieu avec d'autres affluents notamment avec l'Arve, l'Ain et l'Isère, lors des crues océaniques et générales (15-50 %, Figure 2-6b).

Secteur	Station	BV (km²)	Durée C. crue	Gradex	Module (m^3/s)	Q10 (m^3/s)	Q100 (m^3/s)	Q1000 (m^3/s)
Arve		*1985*	*1*	*8,8*	*75*	*630*	*1160*	*1750*
Génissiat	Pougny	10 320	7		336	1180	1470	1800
Seyssel	Bognes	10 910	7		360	1450	1920	2375
Chautagne	Seyssel	11 300	7		366	1430	1940	2450
Fier		*1385*	*1*	*9*	*41,2*	*940*	*1580*	*2220*
Belley	Brens	13 960	10		416	1720	2150	2570
Brégnier	Brens	13 960	10		416	1720	2150	2570
Sault Brénaz	Lagnieu	15 380	10		459	1810	2400	2970
Ain		*3670*	*2*	*11,1*	*125*	*1410*	*2360*	*3440*
Miribel-Jonage	Perrache	20 300	10		600	3120	4230	5310
Pierre-Bénite	Ternay	50 560	20		1030	4445	5890	7310
Saône	*Couzon*	*29 900*	*20*	*25,1*	*450*	*2200*	*3355*	*4690*
Vaugris	Ternay	50 560	20		1030	4445	5890	7310
Péage de Roussillon	Ternay		20		1030	4445	5890	7310
Saint Vallier	Ternay	50 560	20		1030	4445	5890	7310
Bourg les Valence	Valence	66 400	15		1400	5620	7510	9370
Isère		*11 800*	*2*	*11,9*	*338*	*1600*	*3540*	*6050*
Beauchastel	Valence	66 400	15		1400	5620	7510	9370
Eyrieux		*854*	*1*	*30,3*	*15,8*	*1270*	*2470*	*3650*
Baix le Logis Neuf	Viviers	70 900	15		1480	6100	8120	10 100
Drôme		*1642*	*1*	*12,4*	*18,6*	*310*	*870*	*1430*
Montélimar	Viviers	70 900	15		1480	6100	8120	10 100
Donzère-Mondragon	Viviers	70 900	15		1480	6100	8120	10 100
Ardèche		*1309*	*1*	*28,1*	*65*	*3390*	*6580*	*9710*
Caderousse	Beaucaire	95 500	15		1700	8400	11 300	14160
Cèze		*1309*	*1*	*23,9*	*22*	*1110*	*2560*	*3390*
Avignon	Beaucaire	95 500	15		1700	8400	11 300	14 160
Durance		*14 400*	*3*	*14,7*	*180*	*2390*	*5000*	*7400*
Vallabrègues	Beaucaire	95 500	15		1700	8400	11 300	14 160
Gard		*2070*	*1*	*21,8*	*32,7*	*2200*	*4380*	*6540*

Tableau 2-4 : Grandeurs caractéristiques des crues sur le Rhône et ses affluents, calculées aux stations hydrométriques (Annexe 1) (réalisé à partir de SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1 et de la Banque Hydro)

Durée C. crue = durée caractéristique de la crue - calcul réalisé sur les maxima annuels pour tous les affluents excepté pour les affluents cévenols (Eyrieux, Ardèche et Gard) où le calcul a été effectué sur les données de sept-nov, période à fort risque de crue ; Gradex = gradient des valeurs extrêmes de pluviométrie calculées sur la durée caractéristique de la crue

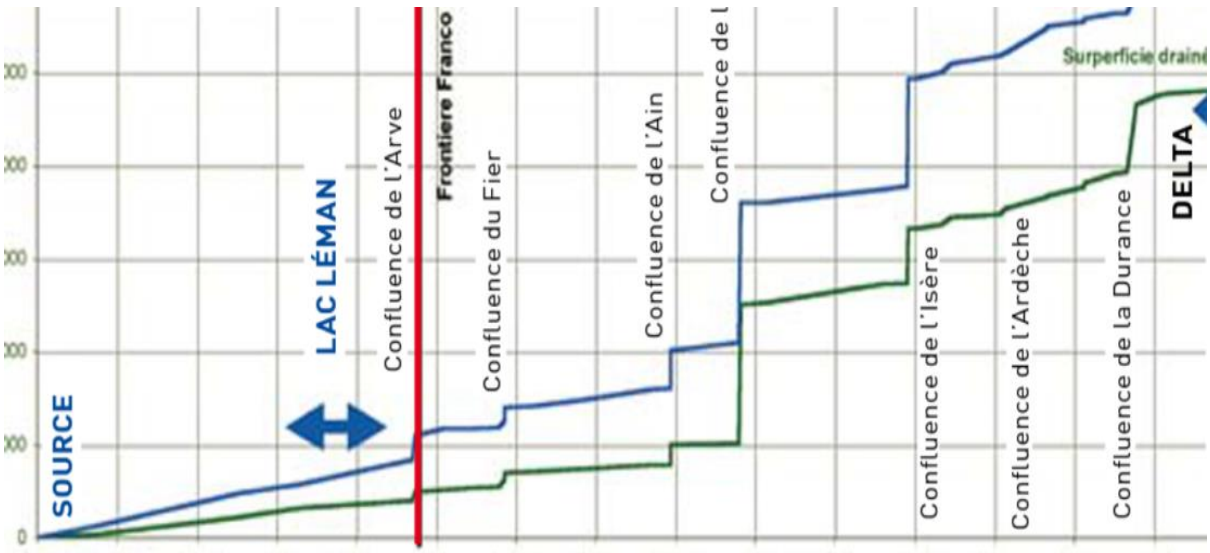


Figure 2-7 : Evolution des superficies drainées et de l'abondance annuelle du Rhône (Bravard et Clemens, 2008)

L'Isère

L'Isère, affluent alpestre à régime nivo-pluvial, détermine la limite entre le régime océanique qui affecte le versant supérieur et le régime méditerranéen la partie inférieure. Le module du Rhône augmente d'un peu plus de 200 m^3/s au niveau de la confluence de l'Isère (Figure 2-7). En altitude, les précipitations sont abondantes sur les massifs exposés aux vents dominants de NNE à SSO, tandis qu'elles sont plus modérées dans les vallées et les massifs de moyenne altitude qui sont en partie protégés des vents océaniques par les Préalpes et les hauts reliefs. En fonction de l'influence climatique, les crues de l'Isère ont des conséquences différentes sur le régime hydrologique du Rhône. Lors des crues océaniques du Rhône, la crue de l'Isère arrive généralement en avance sur celle du fleuve, ce qui lui vaut de ne contribuer que modérément aux débits de pointes en aval de Valence. En revanche, la contribution de l'Isère aux crues du Rhône devient importante lorsque les pluies méditerranéennes remontent la vallée du Rhône et touchent la partie supérieure du bassin de l'Isère. Toutefois, le risque de concomitance des crues du Rhône et de l'Isère dépasse à peine les 10 % (Figure 2-6a). L'Isère, influençable par les quatre types de crues (océaniques, générales, cévenoles et méditerranéennes), possède un fort potentiel à rentrer en crue simultanément avec les affluents les plus septentrionaux (10-15 % avec l'Arve) et un large panel d'affluents plus proches (25-40 % avec l'Ain et la Saône ; <5-30 % avec la Drôme, l'Ardèche et la Cèze ; Figure 2-6b).

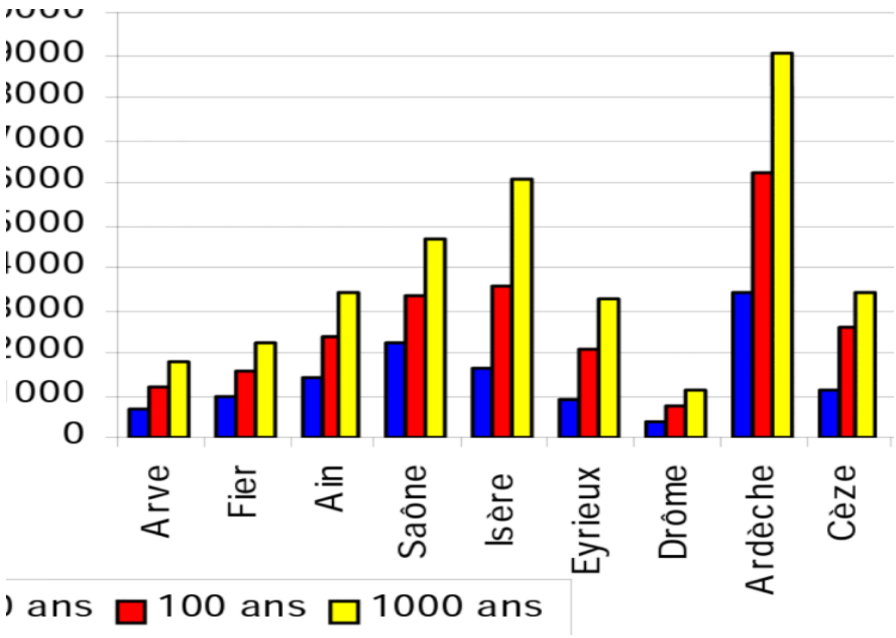


Figure 2-8 : Débits de pointe des affluents pour les crues de période de retour 10, 100 et 1000 ans (SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1)

Les affluents cévenols

En aval de Valence, l'Eyrieux, l'Ardèche, la Cèze et le Gard, qui drainent le rebord oriental du Massif Central, sont des affluents cévenols, c'est-à-dire que leurs crues sont soudaines et très puissantes (Figure 2-8) : la durée caractéristique des crues n'excède pas 1 jour (Tableau 2-4). Par leur orientation et leur hauteur, les Cévennes font écran aux pluies méditerranéennes, entraînant des précipitations importantes. Celles-ci sont parfois si intenses qu'elles peuvent déclencher des crues torrentielles violentes liées aux reliefs des versants, à l'origine des crues cévenoles violentes. Leurs valeurs de Gradex (gradient des valeurs extrêmes de pluviométrie calculées sur la durée caractéristique de la crue) sont parmi les plus fortes, comparativement à celles des autres affluents, variant entre 22 et 30

(Tableau 2-4). Les crues de l'Ardèche sont particulièrement fortes, rapportées à la superficie de son bassin versant et comparées aux autres affluents cévenols. L'augmentation de son débit est spectaculaire : il passe de 65 m^3/s au module à 3390 m^3/s pour la Q10 (Tableau 2-4, Figure 2-8). Cette augmentation n'est pas aussi impressionnante pour les autres affluents mais l'amplitude reste très forte : de 16 m^3/s à 1270 m^3/s pour l'Eyrieux, de 22 m^3/s à 1110 m^3/s pour la Cèze et de 33 m^3/s à 2200 m^3/s pour le Gard. Toutefois, leurs contributions au module du Rhône ne sont pas aussi marquées que celles des affluents précédents (Figure 2-7). Les bassins cévenols ont pour particularité de détenir la pluviométrie et les débits spécifiques les plus importants par rapport aux autres types de bassins. Les crues simultanées avec le Rhône sont aléatoires (entre 15 et 35% selon l'affluent Figure 2-6a). Leur rapidité d'apparition et de dissipation fait qu'elles sont généralement en avance sur les crues du Rhône. La concomitance est plus fréquente entre les affluents du tiers aval lors des épisodes cévenols (45-80 %), ainsi que lors des crues méditerranéennes entre l'Ardèche et le Gard principalement (60%) (Figure 2-6b).

Les affluents préalpins méridionaux

La Drôme, l'Aigues et l'Ouvèze, affluents préalpins méridionaux, sont issus des Préalpes du Sud d'orientation majoritairement Ouest-Est et font écran aux vents pluvieux méditerranéens de Sud à Sud-Est, à l'origine des crues. Leurs contributions aux fortes crues du Rhône est plus modeste en raison de la pluviométrie et de la superficie plus faibles des bassins versants, notamment les débits de crues de la Drôme qui sont parmi les plus faibles (Figure 2-8). Cependant, le ruissellement fortement accentué par les versants faiblement boisés et les terrains marneux imperméables des fonds de vallée provoquent des crues violentes.

La Durance

Le bassin versant de la Durance, presque totalement montagneux, est soumis au climat méditerranéen. Le relief des Alpes Maritimes le protège en grande partie des vents pluvieux de Méditerranée. La Durance augmente le module du Rhône de presque 100 m^3/s (Figure 2-7) mais c'est en crue qu'elle a le plus d'impact. En effet, les débits de crue sont parmi les plus forts des affluents après ceux de l'Ardèche (Figure 2-8). Ce phénomène s'explique par la faible rétention nivale aux sommets de son bassin, la répartition des précipitations méditerranéennes sur l'ensemble du bassin, la prédominance des sols imperméables et faiblement végétalisés et sa forte pente jusqu'au Rhône. La Durance amplifie les crues du Rhône et peut même générer à elle seule une crue sur le fleuve en aval d'Avignon. La durée caractéristique de la crue est de 3 jours, bien plus que la plupart des autres affluents (Tableau 2-4). Les crues simultanées de la Durance et du Rhône (25 % de risque, Figure 2-6a), de la Durance et de l'Isère (5-30 %) et de la Durance et de l'Ardèche (25-50 %, Figure 2-6b) entraînent alors des débits de pointe particulièrement puissants sur le fleuve.

Globalement, le débit du Rhône augmente progressivement en fonction de la surface de bassin versant drainée et de façon plus marquée suite à la recharge par ses affluents (Figure 2-7).

1.4. Les apports sédimentaires des affluents avant aménagements

Affluent	Charriage (m^3/an)	Suspension (t/an)	D_{50} (mm)	D_m (mm)	D_{90} (mm)	Module (m^3/s)	Pente (‰)
L'Arve	100 000 - 150 000	1 000 000 - 4 000 000		30	60 - 100	75	1,6
Les Usses	20 000	100 000				3,27	1,6
Le Fier	60 000	500 000				41,2	0,34
Le Guiers	10 000 - 20 000	100 000				16	
L'Ain	100 000	150 000 - 300 000	20 - 40			125	1,8
La Saône	nul	1 500 000	< 0,1			450	0,21
La Galaure	10 000	?			100 - 500	2,2	
Le Doux	8 000	20 000				5,1	
L'Isère	50 000 - 100 000	4 000 000		10 - 20		338	0,8
L'Eyrieux	20 000	40 000				15,8	
La Drôme	35 000 - 40 000	200 000		20	50	18,6	3 - 4
L'Ardèche	15 000 - 40 000	100 000 - 200 000		10 - 70		65	0,2 - 0,46
Le Lez	< 5 000 - 10 000	?	16		50	1,5 - 2	1,9
La Cèze	10 000	?				22	
L'Aigue	2000 - 5000	100 000 - 200 000		40		6	1,5
L'Ouvèze	≈ 1000	100 000 - 200 000	20			25	1
La Durance	200 000 - 300 000	3 400 000 - 6 600 000		32 - 52	80	180	2
Le Gard	< 10 000 - 60 000	?	28 - 46		65 - 100	32,7	0,24

Tableau 2-5 : Synthèse des caractéristiques des affluents du Rhône réalisée à partir des données de SOGREAH-EGR (2000-V3D1A4-5)

Les apports sédimentaires des affluents tout au long du continuum influencent fortement la morphologie du chenal, le transport par charriage contribuant à la redynamisation du lit. A noter que le texte qui suit tente de synthétiser les différentes études menées sur la dynamique des apports sédimentaires des affluents avant les grands aménagements du fleuve (état naturel du Rhône et de ses affluents avant endiguement). Les données sont majoritairement issues de l'Etude Globale Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4-5). Cette synthèse est volontairement écrite au présent afin de ne pas alourdir le texte. Cela ne veut en aucun cas dire que la dynamique actuelle des affluents par rapport au Rhône est identique. Elle a bien évidement changé suite aux modifications humaines, comme nous le verrons plus loin dans ce chapitre. Le Tableau 2-5 répertorie les caractéristiques physiques des affluents du Rhône, notamment les apports solides au Rhône.

1.4.1. Le Haut-Rhône

Le lac Léman n'apporte aucun gravier au Rhône, il agit comme un bassin de décantation. Les premiers apports sédimentaires proviennent de l'Arve, avec un transit de gravier au début du siècle (supposé naturel) de l'ordre de 100 000 à 150 000 m^3/an. Le diamètre moyen des particules est estimé à 30 mm dans la basse vallée et le D_{90} est compris entre 60 et 100 mm (Peiry, 1988 ; SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5). L'Arve apporte aussi une quantité importante de matières en suspension, estimée entre 1 et 4 Mt/an selon les études (Bravard, 1987 ; Peiry, 1988). Les apports des Usses, du Fier, de la Valserine et du Guiers maintiennent le volume charrié avec un total évalué à 100 000 m^3/an pour ces affluents. Le transport par les Usses, drainant les chaînons calcaires et les collines molassiques, a été estimé à 20 000 m^3/an par charriage et à 100 000 t/an par suspension. Les bassins du Fier et du Guiers sont caractérisés par des terrains imperméables de type molasses recouvertes de dépôts glaciaires, marnes, schistes et grès, et un relief accidenté, propice aux ruissellements, et ce malgré la présence d'un fort

couvert végétal (forêt, bois). Le Fier fournit ainsi près de 60 000 m³/an de sédiments par charriage et de 500 000 t/an de matériaux en suspension (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5). Le Guiers ne transporterait que 10 000 à 20 000 m³/an de sédiments par charriage et 100 000 t/an par suspension. La deuxième principale source de gravier du Haut-Rhône redynamisant le lit provient des apports de l'Ain, ainsi que de la reprise de dépôts morainiques dans le secteur, estimée à 100 000 m³/an au total (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4). Le transport par suspension mesuré par Pardé (1925) serait de 150 000 à 300 000 t/an. Le D_{50} de surface de l'Ain est estimé entre 20 et 30 mm près de la confluence, pouvant aller jusqu'à 118 mm sur les 60 km amont, et avec un D_{50} de subsurface compris entre 11 et 25 mm (Rollet, 2007).

1.4.2. De la Saône à l'Isère

La Saône est quasiment dépourvue de graviers car elle possède une pente trop faible pour permettre le transport de matériaux plus gros que les sables. Par ailleurs, la charge en suspension est essentiellement limoneuse et sablo-limoneuse, avec une masse estimée à 1,5 Mt/an (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5). Le transit à l'aval du confluent de la Saône est estimé à 30 000 m³/an. Les affluents du Bas-Dauphiné (i.e. entre la Saône et l'Isère en rive gauche) ne rechargent quasiment pas le Rhône à l'exception de la faible contribution de la Galaure, provenant des collines mollassiques fortement érosives mais progressant sur une pente faible (3‰), qui transporterait des matériaux sableux à grossiers (100 mm < D_{50} < 500 mm) à hauteur de 10 000 m³/an (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5). Par ailleurs, dans cette même section, les affluents issus du Massif Central (rive droite) fourniraient plus de sédiments grossiers au Rhône. En cumulé, les apports du Gier, de la Cance et du Doux sont estimés à 30 000 m³/an. La charge solide du Doux, évoluant sur un massif cristallin, est limitée, de l'ordre de 8000 m³/an, de même que pour la charge en suspension, évaluée à 20 000 t/an (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5).

1.4.3. De l'Isère à l'Ardèche

Les apports grossiers de l'Isère (avec un diamètre moyen compris entre 10 et 20 mm) sont estimés à 100 000 m³/an. Cette charge solide assez faible pour le débit liquide considéré s'explique par l'interruption naturelle du transit des graviers dans les plaines d'alluvionnement (réalluvionnement postglaciaire inachevé). Le principal affluent de l'Isère, le Drac, assurerait sa recharge sédimentaire estimée à 200 000 m³/an (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5). Les apports en suspension sont estimés à 4 Mt/an, avec une forte contribution du Drac (sans doute à hauteur de 1,5 Mt/an). A l'aval de l'Isère, l'Eyrieux réalimente modérément le Rhône en gravier (environ 20 000 m³/an) du fait de son encaissement dans des gorges, et l'alimente aussi en MES (environ 40 000 t/an). La Drôme, présentant un tressage dynamique vers la confluence, rechargerait le Rhône en gravier à hauteur de 35 000 à 40 000 m³/an (D_m = 20 mm), et en MES avec environ 200 000 t/an (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5).

1.4.4. De l'Aval de l'Ardèche à la Durance

L'Ardèche se caractérise par une charge particulièrement grossière (diamètre moyen allant de 90 mm au niveau des gorges à 40-70 mm à l'aval) comparativement à la taille de son bassin versant. Sa pente se réduit progressivement à l'entrée de la vallée du Rhône (entre 0,46 et 0,2 ‰), ce qui ne permet pas

le transit des matériaux grossiers (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4). Cette réduction de pente, non compensée par les apports liquides, entraîne un alluvionnement conséquent et un tri granulométrique dans la partie terminale de l'Ardèche, ne laissant transiter au Rhône que la fraction la moins grossière, soit entre 15 000 et 40 000 m³/an pour un diamètre moyen de 10 mm. Les apports solides plus grossiers s'effectuent lors des grandes crues de l'Ardèche, indépendantes de celles du Rhône, qui augmentent fortement la pente motrice et permettent la progression des graviers et des galets. Les terrains traversés par la rivière, majoritairement granitiques et calcaires, ne fournissent que peu de matière en suspension, autour de 100 000 – 200 000 t/an (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5). Le Lez, la Cèze, l'Aigue et l'Ouvèze tendent aussi à l'alluvionnement dans leur partie terminale du fait de la réduction de la pente à l'entrée de la plaine alluviale du Rhône. En ce qui concerne le Lez, le transit des graviers à l'amont de la rupture de pente (on passe d'une pente de 3,1 à 1,9 ‰) a été estimé à 5000 – 10 000 m³/an, ce qui ne laisserait qu'une partie des sédiments les plus petits atteindre le Rhône. Les apports solides de la Cèze sont réduits par l'exhaussement de la plaine terminale (autour de 10 000 m³/an). A l'entrée de la plaine alluviale du Rhône, l'Aigue montre un dépôt de sédiments grossiers avec un tri granulométrique conséquent du fait de la rupture de pente (on passe d'une pente de 4 à 1,5 ‰), qui ne permet que le transit résiduel de petits graviers estimés à 2000 – 5000 m³/an. L'Ouvèze n'apporte au Rhône que quelques milliers de mètres cubes de la fraction la moins grossière. Le transport des limons pour l'Aigue et l'Ouvèze est estimé à 100 000 – 200 000 t/an chacun (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5).

1.4.5. A l'aval de la Durance

Le lit de la Durance présente un tressage vif sur 150 km, de Sisteron au Rhône. Son lit, très mobile, présente de larges tresses, d'une largeur moyenne de 560 m dans une zone de divagation moyenne de 840 m, qui lui confèrent une dynamique importante. Malgré un alluvionnement de la partie terminale de la Durance dû à une diminution de la pente (passage de 2,7 à 2 ‰), elle fournit au Rhône une quantité de graviers comprise entre 200 000 et 300 000 m³/an. Les graviers de la Durance qui atteignent le fleuve ont un diamètre moyen plus faible que celui observé à l'amont de la rupture de pente, il décroit de 52 mm jusqu'à 32 mm, avec un D_{90} à l'aval approchant 80 mm. Les évaluations du transit des matières en suspension donnent lieu à des valeurs très différentes les unes des autres, avec des estimations parfois très élevées du fait de la difficulté à évaluer les erreurs de méthode et de l'état de dégradation anthropique des bassins versants, qui fournissent des quantités de MES non négligeables. Les changements d'occupation des sols pour les besoins agro-pastoraux (défrichement pour obtenir des terres arables et des pâturages) ont favorisé l'érosion des terrains. A contrario, des travaux de restauration des terrains en montagne (service RTM) ont été entrepris au 19ème siècle en vue de limiter cette érosion. Nous retiendrons les estimations de flux de MES comprises entre 3,4 Mt/an, réalisées par EDF, et 6,6 Mt/an, cité par l'IRSTEA d'après les calculs des Ponts et Chaussées (entre 1868 et 1889), dont 2,9 Mt/an sembleraient provenir du ravinement des terres noires (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5). Le Gard ne délivre que très peu de sédiments grossiers au Rhône. Ici encore le lit s'exhausse lorsqu'il débouche dans la plaine, favorisant l'alluvionnement et le tri granulométrique. Une partie des graviers les plus petits atteindrait le fleuve (sans doute inférieur à 10 000 – 60 000 m³/an).

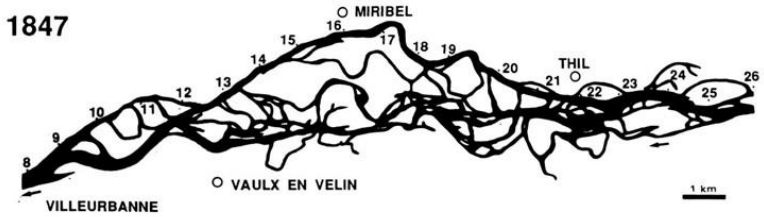
1.5. Le système fluvial du Rhône avant les grands aménagements

La topographie du lit dépend du substrat dans lequel le cours d'eau évolue : roche-mère, alluvions, colluvions. Les cours d'eau possédant un substrat de type roche-mère (forte capacité de transport car peu de matériaux se détachent et l'espace de liberté du chenal est limité géométriquement) et colluvions (particules très fines provenant principalement des versants latéraux) sont à différencier de ceux constitués d'alluvions. Les cours d'eau alluviaux dessinent leur lit dans les sédiments qu'ils transportent. Ils présentent une morphologie diversifiée et une rugosité variable en fonction de la pente et de leur position dans le réseau hydrographique qui régit leur géométrie, notamment leur pente, et leur granulométrie (Montgomery et Buffington, 1997). Le profil longitudinal des cours d'eau alluvionnaires (naturels) est idéalement concave du fait d'une augmentation du débit vers l'aval qui rend le transport possible sur des pentes plus faibles, et d'une diminution de la taille des particules transportées. Ce type de profil résulte d'un équilibre dynamique entre les processus d'érosions-dépôts. Dans la réalité, les profils des cours d'eau à l'équilibre ne sont pas toujours lisses du fait de l'activité tectonique ou des changements physiographiques.

Là encore, l'usage du présent dans la synthèse qui suit est de rigueur, alors que l'état du chenal a majoritairement évolué de façon radicale suite à l'anthropisation du linéaire. Le Rhône est avant tout un système alluvial. Sa charge de fond à l'état naturel est graveleuse jusqu'au delta de la Camargue, plus précisément au seuil de Terrin où affleurent des poudingues issus de la cimentation d'alluvions anciennes, puis sableuse jusqu'à la mer. De plus, le climat particulier qui régnait au cours du Petit Age Glaciaire (PAG) associé à une très forte pression démographique a provoqué une érosion de surface massive au sein du bassin versant du Rhône, entraînant une fourniture détritique importante au fleuve. La charge sédimentaire conséquente fournie au Rhône durant cette période a favorisé la formation d'un système en tresses très actif et à bancs mobiles, décrivant des chenaux multiples dynamiques et une charge de fond abondante et grossière (Figure 2-9).

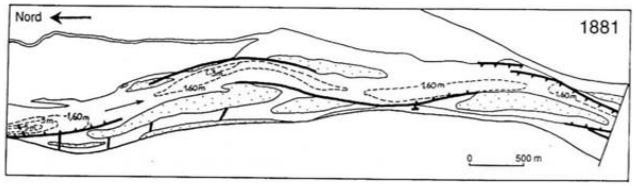
Le profil longitudinal du Rhône tel qu'on le voit à la fin du 19ème siècle (Figure 2-10) présente deux « anomalies »: il est tout d'abord convexe plutôt que concave à l'aval de Lyon, et très accidenté plutôt que lisse. La pente du Rhône à la fin du 19ème siècle est contrôlée par les ajustements morphologiques relatifs au charriage et aux affleurements de la roche mère ou à la charge grossière en place dans le chenal. Les études menées par différents auteurs (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4-5 ; Bravard, 2010 ; Malavoi et Bravard, 2010) sur l'évolution de la pente au 19ème siècle (Figure 2-11) décrivent les variations du profil du Rhône dont une synthèse est proposée ci-après.

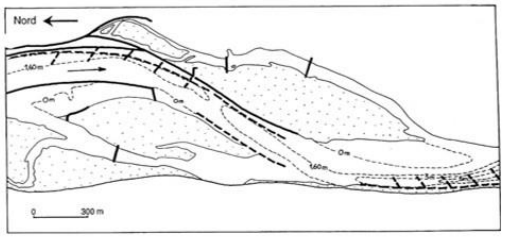
Plaine alluviale de Chautagne, Haut-Rhône (Bravard et Klingeman ,1993)



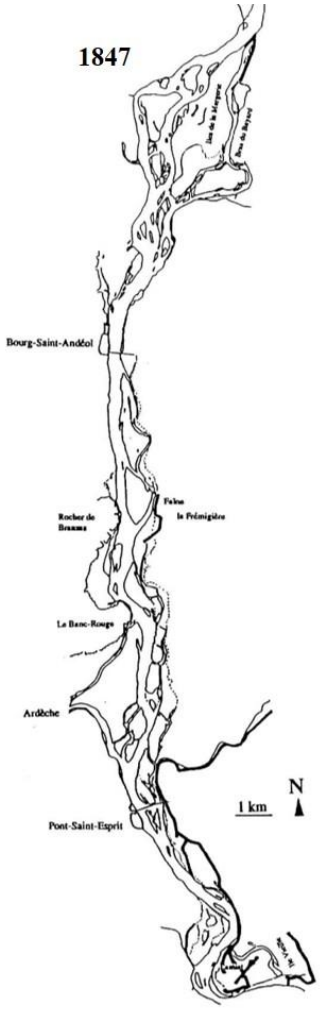
Plaine alluviale de Miribel-Jonage, Haut-Rhône (Poinsart et al., 1989)

Plaine alluviale de Péage de Roussillon, Rhône Moyen (Fruget, 1989)





Plaine alluviale de Pierre-Bénite au passage de Solaize (à droite) et de Millery-Grigny (en haut), présentant des aménagements (digues et épis) aval de Lyon (Poinsart et Salvador, 1993)



Plaine alluviale de Donzère-Mondragon présantant des digues insubmersibles (Poinsart et Salvador, 1993)

Figure 2-9 : Quelques exemples de zones de tressage sur le Rhône

Le profil en long du Haut-Rhône enregistre globalement vers l'aval une décroissance de sa pente, un alluvionnement de son lit et une réduction du charriage. Néanmoins, les pentes sont suffisamment fortes pour assurer le transport des graviers issus de l'Arve jusqu'à l'aval des gorges, à l'amont de Sault-Brénaz. Dans le secteur de Génissiat, la pente naturelle atteint jusqu'à 3‰ (i.e. en m/km soit 0,003 m/m) dans les gorges, ce qui correspond à la pente structurale et ne reflète pas l'activité morphologique. La pente caractéristique du lit mobile dans ce secteur se situe plutôt autour de 1,5‰. Les tronçons situés entre les PK -160 et -90 et entre les PK -35 et 0 (Figure 2-10 et Figure 2-11) présentent des pentes de transit. Ces pentes correspondent à des pentes fortes associées aux apports solides de l'Arve, du Fier, du Guiers et de l'Ain. Les plus fortes valeurs de pente, entre 0,8 et 1,7‰, se situent à l'aval des gorges du Rhône et de la confluence du Fier, qui apporte des graviers. La pente diminue vers l'aval, donnant lieu à un affinement granulométrique, qui augmente de nouveau du fait de la charge grossière qui compose le lit, héritée des contreforts des Alpes, et de la recharge sédimentaire du Guiers. A l'aval de la confluence du Guiers, le Rhône enregistre aussi une importante augmentation de la pente qui monte jusqu'à 1,1‰ (Figure 2-11). La pente décroît par la suite, et à l'aval du PK -90, les valeurs de pente chutent à 0,01‰, révélant un transport quasi nul. La Figure 2-10 montre deux concavités successives dans le profil du Rhône entre les PK -160 et -85, séparées par une rupture de pente au PK -100. La très forte pente entre les PK -70 et -60 correspond en réalité à un affleurement (Figure 2-10) du calcaire du Jurassique (Figure 2-5) et à des sédiments grossiers issus des cônes alluviaux du Pléistocène formés par les affluents jurassiens (Bravard, 2010). La pente décroit alors de nouveau puis augmente au niveau de la confluence de l'Ain. Cette décroissance correspond à une érosion progressive qui a débuté depuis la fin de la dernière période glaciaire (Würm) du fait d'une réduction drastique des apports solides (d'origine glaciaire). La pente reste forte depuis l'Ain jusqu'à Lyon, avec un pic à 1,2‰. Ce phénomène est dû à une importante fourniture de l'Ain en gravier et des héritages provenant des terrasses du Würm. La recharge importante en sédiments grossiers de l'Ain favorise l'augmentation de la pente et le développement d'un style tressé jusqu'à Lyon sur le secteur de Miribel-Jonage. Le dépôt des graviers a lieu majoritairement dans le chenal en tresses de Miribel-Jonage, n'atteignant qu'en faible partie la confluence de la Saône (< 30 000 – 50 000 m³/an d'après SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5).

C'est à partir de Lyon que le profil en long du Rhône prend une forme convexe, avec une pente moyenne augmentant de 0,4 à 0,8‰ par kilomètre (Figure 2-10 et Figure 2-11). A l'entrée de Lyon, le Rhône tend à l'alluvionnement et les apports principalement liquides de la Saône, dépourvus de graviers mais chargés de matières en suspension, amènent la pente à décroître dans le tiers amont du Bas Rhône. Le charriage entre la Saône et l'Isère est assuré par une pente moyenne estimée à 0,5‰ et un D_{50} plus ou moins constant de 40 mm (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5).

Au tiers central, à l'aval de l'Isère, la pente atteint 0,8‰ avec de fortes valeurs jusqu'à la confluence de l'Ardèche pouvant atteindre 1,4‰ à Montélimar. Cet accroissement de pente est à mettre en lien avec les recharges sédimentaires successives par les affluents de montagne mais aussi avec les contraintes tectoniques exercées lors de l'orogénèse alpine. Ces compressions ont entraîné le soulèvement de la moyenne vallée du Rhône durant le Quaternaire et ont permis, entre autre, les affleurements de dalles calcaires, très fréquents dans le secteur de Donzère-Mondragon. La particularité de ces affleurements rocheux successifs est qu'ils ne constituent pas un seuil au transport (Figure 2-10). Ce phénomène s'explique par le fait que la pente est structurale. Elle ne dépend plus de l'équilibre entre les apports solides et liquides mais est contrainte à la fois par le cadre structural, où le transport est dit « passif », et par la mobilité latérale du lit dans les alluvions, influencée par le charriage, i.e. une pente morphologique où le transport est dit « actif ».

La capacité de transport du Rhône à Donzère-Mondragon est estimée à 400 000 m³/an, alors qu'elle chute à Avignon (en aval) à 300 000 m³/an, malgré les apports de l'Ardèche. Cette diminution du transit, accompagnée d'une diminution progressive de la pente au niveau de l'Ardèche (de 0,8 à 0,46‰), s'explique par l'alluvionnement du Rhône d'environ 200 000 m³/an sur 70 km de long et 1 km de large. Les apports de l'Ardèche et l'alluvionnement du lit du Rhône sont alors remobilisés lorsque le fleuve est en crue.

A l'amont de la Durance, le Rhône transporte 200 000 à 300 000 m³/an de sédiments et présente une pente anormalement forte à l'étiage (0,59‰), lissée en période de crue. Cette anomalie est provoquée par l'ajustement du Rhône en réponse à l'augmentation des débits à la confluence et aux crues morphogènes afin d'assurer la continuité du profil en long. A l'aval de la Durance, près de 500 000 m³/an de graviers sont charriés par le Rhône.

Puis la pente diminue régulièrement à l'aval d'Arles, au niveau du delta de la Camargue jusqu'à atteindre 0‰ à l'embouchure. Le lit du Rhône montre alors une forte mobilité latérale, favorisée par le dépôt de la charge grossière provenant de l'amont sans exhaussement majeur du lit. La répartition des alluvions, effectuée lors du déplacement des bras du Rhône, aurait lieu sur une surface estimée à plus de 250 km² avant de se jeter dans la Méditerranée (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4).

En résumé, l'irrégularité de la décroissance de la pente et l'absence d'affinement granulométrique de la charge solide vers l'aval, qui font du Rhône un système alluvial particulier, s'explique par le fait que ces deux paramètres sont sous le contrôle :

- des terrains lithologiques traversés (décrit dans le paragraphe précédent) qui contraignent le fleuve latéralement (gorges du Haut-Rhône, défilés épigéniques du tiers amont) et altimétriquement (affleurements localisés du substratum, verrous glaciaires du Haut-Rhône, dalles calcaires du tiers central),
- des contraintes structurales imposées par les compressions tectoniques alpines à l'aval de Lyon,
- du régime hydrologique du Rhône et de ses affluents (apports liquides),
- des apports des affluents (recharge en graviers et/ou en fines),
- des zones de stockage sédimentaire telles que les ombilics glaciaires du Haut Rhône et les plaines de la basse vallée du Rhône.

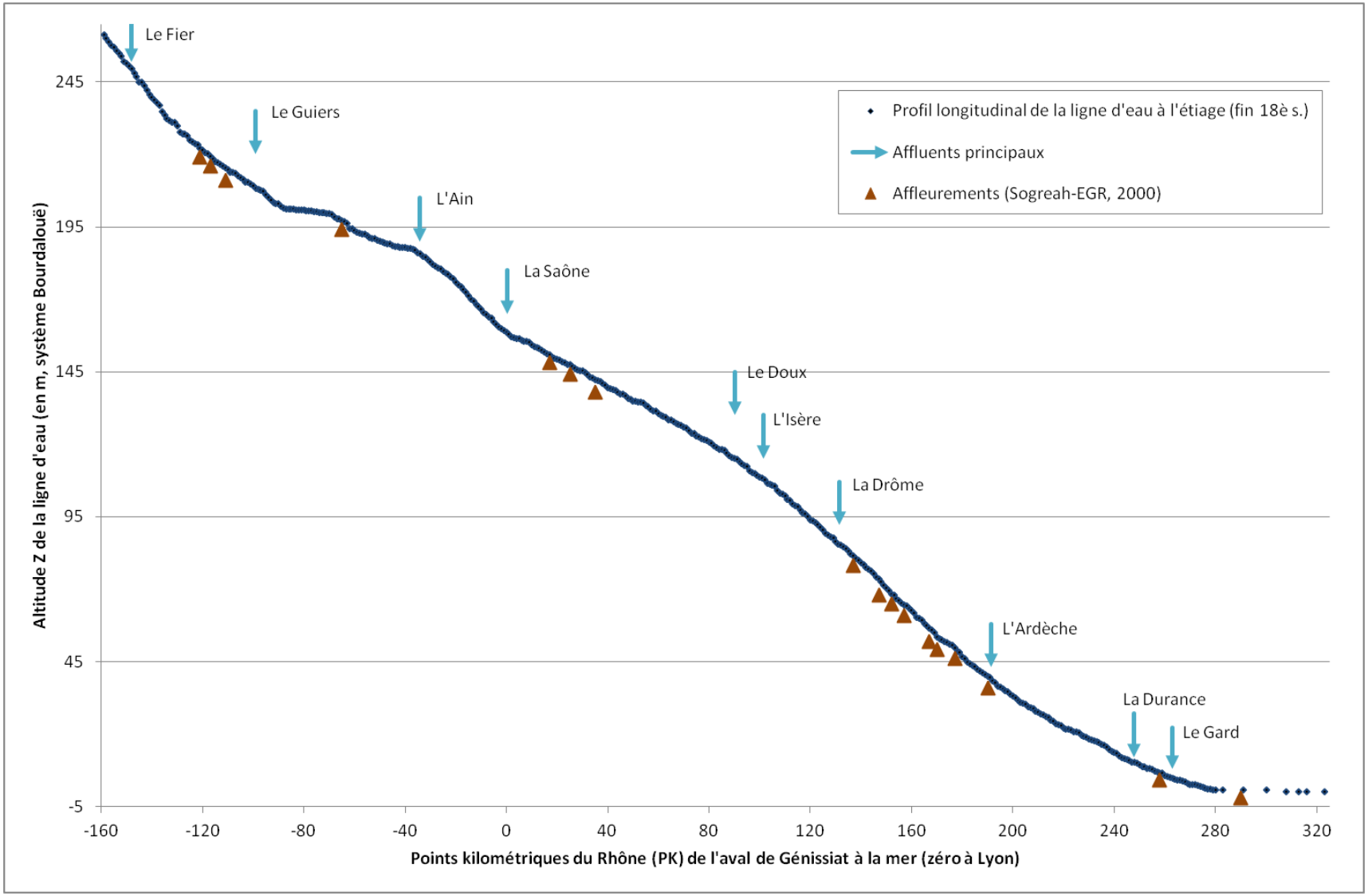


Figure 2-10 : Profil longitudinal de la ligne d'eau du Rhône à l'étiage de 1867-1868 sur le Haut-Rhône et de 1902-1903 sur le Bas-Rhône, entre Seyssel et la mer

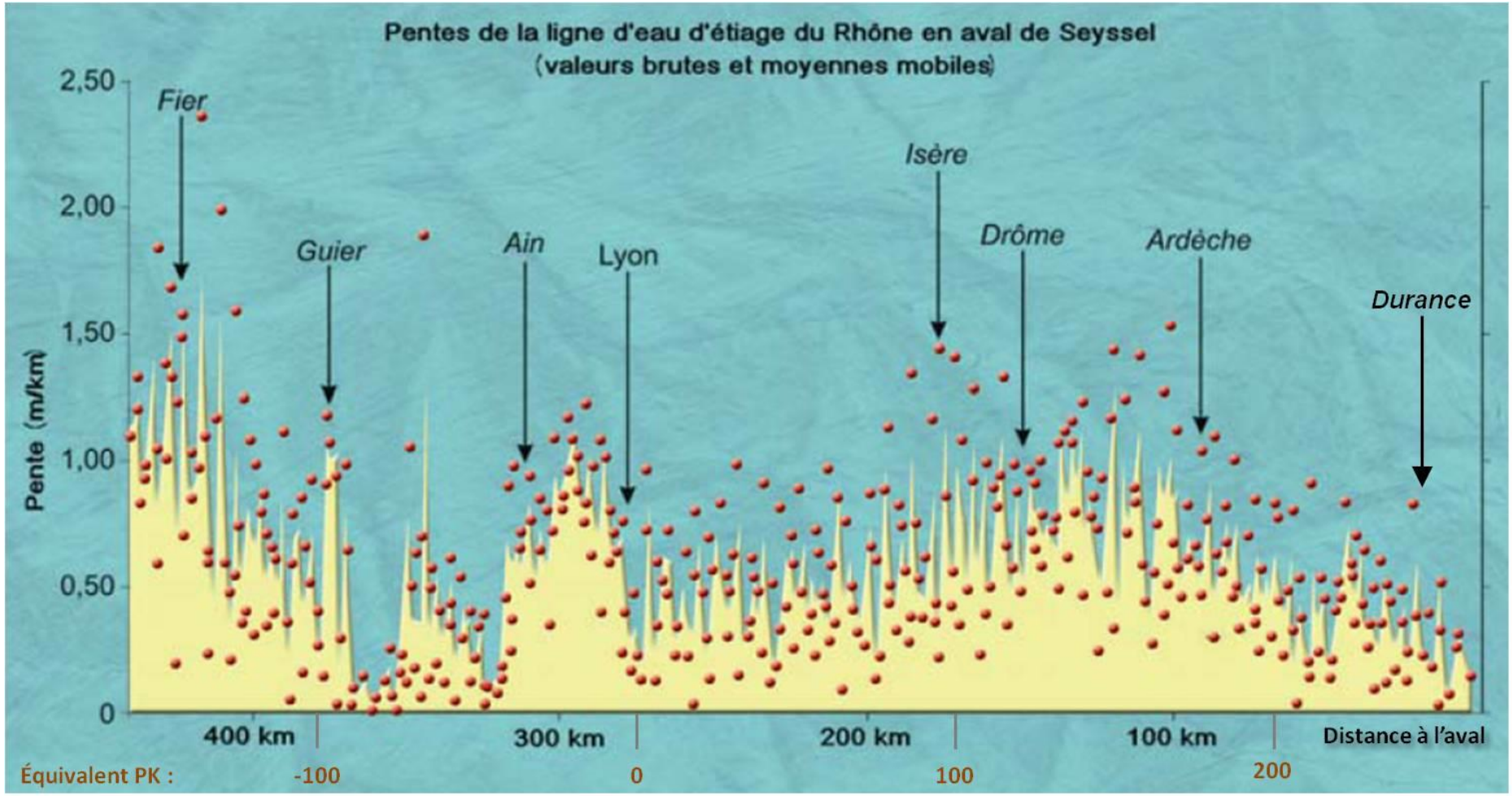


Figure 2-11 : Variations de la pente kilométrique de la ligne d'eau du Rhône à l'étiage de 1867-1868 sur le Haut-Rhône et de 1902-1903 sur le Bas-Rhône (entre Seyssel et la mer). Données antérieures aux grands aménagements. Modifiée d'après Malavoi et Bravard (2010), issue de Bravard (2010)

2. Contexte historique de l'anthropisation du continuum rhodanien

2.1. La transformation du paysage et l'évolution de l'occupation du sol

La vallée du Rhône constitue un axe navigable favorisant les échanges entre la Méditerranée et l'Europe. Durant l'Antiquité, les Grecs utilisaient cette voie pour pratiquer le commerce, puis, les Romains pour la conquête de la Gaule. Le Rhône a la particularité de relier deux grandes villes : Lyon et Marseille, et de traverser Genève, Valence, Avignon et Arles, des villes possédant un pouvoir économique et touristique important favorisant l'urbanisation croissante et l'imperméabilisation des sols. Mais c'est à l'aval de Lyon que le Rhône est devenu un axe majeur de transport et de développement industriel. Le Service de la Navigation est même allé jusqu'à marquer le début du « Rhône utile » en fixant, en 1840, le kilomètre 0 du fleuve à la Mulatière à Lyon (Bravard, 1996). Depuis le Moyen Âge, le fleuve a été domestiqué pour favoriser le transport fluvial de marchandises (matériaux de construction, denrées alimentaires, tonneaux de vin).

A partir du 18ème siècle, une complémentarité s'établit autour du fleuve, avec un système économique aussi bien agricole que manufacturier : la viticulture moderne tout au long du fleuve, la sériciculture (élevage du ver à soie dans les champs de muriers des Cévennes et dans la basse vallée du Rhône) permettant l'essor de l'industrie de la soie (Clerget, 1929), les usines de textile à Lyon, l'extraction de charbon à Saint-Etienne et dans les Cévennes, le développement des usines chimiques et métallurgiques, les matières première coloniales arrivant à Marseille... (Encyclopédie Larousse, 2012). Au 19ème siècle, l'encouragement au développement du commerce et de l'industrie, la volonté de pallier aux jours chômés à l'étiage où la navigation était impossible (Poinsart et Salvador, 1993), l'apparition des bateaux à vapeur, demandant un tirant d'eau plus important, et la concurrence des chemins de fer face à une navigation difficile sur ce fleuve tortueux (Bordeaux, 1920), ont poussé à la construction d'une voie fluviale rectiligne entre Lyon et la mer.

A partir de la Première Guerre mondiale qui suscite d'importants besoins en armement, l'industrie lourde prend son essor, jusqu'à transformer le couloir rhodanien en « couloir de la chimie » (Bravard, 1996). L'axe rhodanien connaît ensuite jusqu'à la Seconde Guerre mondiale un déclin économique et un isolement dus à la révolution industrielle du Nord et de l'Est du pays. Il apparaît alors nécessaire de réaménager intégralement le Rhône pour lui trouver un nouvel intérêt économique : la puissance du fleuve va être exploitée pour les besoins en hydroélectricité. Plus récemment, la volonté de retrouver le paysage naturel pour des questions de loisirs dans un premier temps (Bravard, 1996), puis de préservation écologique dans un second temps, conduit à restaurer le Rhône et ses berges.

2.2. Travaux de rectification et de corrections du chenal

Le chenal du Rhône a enregistré, au cours des deux derniers siècles, quatre grandes phases d'aménagement, qualifiées « d'aménagement à courant libre », qui ont conduit, au fur et à mesure, à la géométrie actuelle : d'abord par la construction d'ouvrages longitudinaux, puis par la construction d'une voie fluviale navigable. Les travaux sont principalement réalisés en aval de Lyon jusqu'à la mer (cf. paragraphe 2.1, p.73). Le chenal du Haut Rhône étant beaucoup trop dynamique et accidenté, les ouvrages, difficiles à construire, sont fréquemment déstabilisés. Malgré de nombreuses tentatives d'aménagement du Haut Rhône depuis le milieu du 19ème siècle, le projet de construction d'une voie

navigable sur sa totalité est finalement abandonné au 20ème siècle. Quelques portions du chenal en tresses du Haut Rhône ont toutefois été aménagées, pour les plus connues vers Seyssel, Chautagne, Sault-Brénaz et Miribel. Le trafic fluvial dans le Haut Rhône, bien qu'actif jusqu'en 1886, cessera définitivement en 1919 du fait des faibles capacités en tonnage (Aubert, 1939).

2.2.1. La protection de berges : les digues insubmersibles

Les premiers ouvrages ont été localisés sur le Bas-Rhône. Ils consistent en des digues longitudinales surélevées et insubmersibles protégeant la plaine, notamment de Camargue. Ce système, daté au moins du XIIème siècle, est le plus ancien et le plus sophistiqué du Rhône avec plus de 300 km de digues protégeant environ 165 000 ha. Sur le reste du fleuve, principalement en aval de Lyon, les endiguements ont été construits à partir du XVème siècle par les communautés rurales, puis plus largement au 19ème siècle par les syndicats de riverains et des grands propriétaires (Bravard et Clemens, 2008). Sur le Haut Rhône, la protection du lit majeur, localisée uniquement au niveau des plaines de tressage, est restée faible jusqu'au début du 19ème siècle, et n'a présenté que de maigres résultats face à la dynamique du fleuve qui « bousculait » les aménagements (Bravard, 1987).

Le but de ces digues insubmersibles était de contenir le fleuve dans le chenal, de limiter les inondations dans le lit majeur pour protéger les plaines agricoles et les habitations et de favoriser la circulation à pieds ou à cheval le long des berges, par le biais de chemins de halage par exemple (Bethemont, 1972), permettant de remplacer les haleurs par des chevaux (Figure 2-12). Dans la moyenne vallée du Rhône, ces ouvrages constituent près de 100 km de chaussées en terre vers 1860 puis s'étendent sur 300 km vers 1880, tout en ne protégeant que partiellement la plaine : sur 30 000 ha (Bravard et Clemens, 2008), une superficie 5 à 6 fois moins importante que sur le Bas-Rhône.

Figure 2-12 : Attelage de chevaux remontant des bateaux sur le Rhône (1831), par Alexandre Dubuisson (1805-1870). Coll. Sylvestre, Musée des Beaux-Arts de Lyon.

Cette technique d'endiguement, outre son efficacité limitée, présente de nombreux inconvénients. Tout d'abord, la protection des terres reste locale. Le chenal navigable divague entre des digues qui sont trop rectilignes et espacées les unes des autres. Ces ouvrages ne répondent finalement qu'à des

problématiques ponctuelles d'inondation ou de sapement de berge. De plus, l'affouillement profond le long des digues (jusqu'à 11 m sous l'étiage), provoqué par la puissance du courant en période de hautes eaux, perturbe le profil en long et déstabilise les ouvrages jusqu'à l'affaissement, nécessitant un entretien fréquent par apport de blocs rocheux. Enfin, la forte concentration du courant dans le chenal lors des crues entraîne l'apparition de brèches dans les digues (Poinsart et Salvador, 1993).

Le Service Spécial du Rhône, dépendant des Ponts et Chaussées, a été créé suite aux crues successives du milieu du 19ème siècle (crue générale de 1840 puis de 1856) qui provoquèrent de graves inondations et de nombreux dégâts, et à la construction de la voie ferrée reliant Paris, Lyon et Marseille (achevée en 1856) qui concurrençait directement la navigation sur le Rhône (Delahaye, 2009). L'objectif est d'aménager le fleuve de façon plus globale en renforçant la protection des berges et en augmentant le nombre de jours de navigation, le transport de marchandises étant perturbé par les hauts-fonds (seuils/radiers ou bancs) en périodes de basses eaux. Il s'agit alors de favoriser l'écoulement dans un lit unique de sinuosité réduite et d'augmenter la profondeur minimale à 1,6 m sous l'étiage conventionnel (tirant d'eau nécessaire à la navigation). La construction de digues insubmersibles est malgré tout maintenue jusque dans les années 1850-55 avant d'être définitivement abandonnée en faveur de techniques d'endiguement plus efficaces (Poinsart et Salvador, 1993).

2.2.2. La construction des digues submersibles

Dès 1840, l'ingénieur en chef O'Brien, du Service Spécial du Rhône, recommande l'aménagement d'une voie fluviale au sein même du fleuve en resserrant le lit par la construction de digues submersibles sur les rives et par le barrage des bras secondaires. L'écoulement du lit moyen se concentre alors dans un chenal unique, entre des digues longitudinales hautes arasées de 2 à 3,5 m au-dessus de l'étiage conventionnel, mais restant submersibles lors des hautes eaux afin d'éviter une concentration des flux trop importants. La concentration du courant a un double effet : elle augmente la hauteur d'eau dans le chenal et, en période de hautes eaux, la vitesse augmente et force l'érosion, ce qui permet d'uniformiser la pente du lit en éliminant les hauts-fonds, voire d'approfondir le lit (Poinsart et Salvador, 1993).

Afin d'adoucir la forte sinuosité du chenal sans la déformer, les digues submersibles ont d'abord été construites dans les concavités. La plupart du temps, l'endiguement est discontinu et parallèle malgré l'alternance des aménagements d'une rive à l'autre. Les digues dans les concavités ont été prolongées dans les convexités pour mieux orienter le courant. La présence de barrages (endiguement des bras secondaires) et de rares épis transversaux et/ou éperons peuvent leur faire face, pour repousser le courant loin des mouilles, zones d'eaux profondes où le courant est modéré (Poinsart et Salvador, 1993)

Cette technique, adoptée dans les années 1855, est très largement répandue sur le Rhône jusqu'en 1876. Du fait d'une trop grande efficacité, ce type d'aménagement s'est révélé négatif par rapport au processus d'auto-dragage du fond du lit, ne faisant que déplacer les hauts-fonds vers l'aval durant les crues et favorisant ainsi l'instabilité du fond du chenal. Les matériaux du lit, très mobiles, étaient emportés jusqu'à un élargissement local ou dans des secteurs non endigués (Poinsart et Salvador, 1993).

2.2.3. Les digues basses de resserrement et les premiers épis

Face aux perturbations qu'engendrent les précédents aménagements sur le lit du Rhône – migration des hauts-fonds, accentuation des reliefs (augmentation de la taille des hauts-fonds par approfondissement des mouilles) –, l'ingénieur en chef Jacquet commence en 1876 à travailler sur le fond du chenal afin de contrôler ces formes. Le chenal est, dans un premier temps, resserré par des digues basses arasées cette fois-ci de 1 à 1,5 m (au lieu de 2 à 3,5m) au-dessus de l'étiage conventionnel, ce qui lui permet de concentrer les basses eaux. Lorsque le niveau de l'eau augmente, ces digues se retrouvent noyées, ce qui permet l'étalement latéral du courant, limitant ainsi l'auto-dragage des fonds observé avec les digues submersibles. Les digues basses ont pour objectif de stabiliser le chenal : lorsqu'elles sont construites dans l'axe longitudinal de la mouille, elles constituent le niveau de base local empêchant l'approfondissement de la mouille et allant parfois jusqu'à la combler partiellement (Poinsart et Salvador, 1993).

A partir de 1880, l'ingénieur en chef Jacquet complète les aménagements en s'inspirant des travaux réalisés sur l'Elbe et le Rhin. Il s'agit d'une technique visant à stabiliser les fonds par l'introduction (1) d'épis plongeants, depuis la berge jusque dans le chenal en rive convexe afin de fixer l'alluvionnement et le tracé du chenal, prolongés par (2) les épis noyés, dans le chenal, plus précisément des enrochements disposés dans les mouilles, perpendiculairement à son axe. La construction d'épis noyés va aussi renforcer les digues basses dans les mouilles de concavité. Ces épis constituent des chambres de dépôt, c'est-à-dire des zones d'atterrissement préférentiel qui favorisent le comblement des mouilles et ainsi l'abaissement progressif des hauts-fonds par régulation.

L'efficacité de ces techniques est clairement attestée : (1) toutes les eaux d'étiage ont été réunies dans un chenal navigable unique (même s'il subsiste encore des bras secondaires) et (2) 20 % des hauts-fonds d'une profondeur inférieur à 1,6 m sous l'étiage conventionnel ont été supprimés entre 1876 et 1882 sur le Bas-Rhône. Malgré ces avancées majeures, les résultats sont jugés insuffisants compte tenu du budget attribué à ce projet : 35 millions de francs entre 1878 et 1884 (Poinsart et Salvador, 1993).

2.2.4. Les casiers Girardon

En 1884, l'ingénieur en chef Girardon reprend la direction des travaux et introduit une nouvelle conception de l'aménagement à courant libre. La technique qu'il met au point, se veut plus proche des conditions naturelles d'écoulement d'un cours d'eau graveleux à fond mobile. Les objectifs restent les mêmes : (1) réduire la sinuosité du chenal (passage à une sinuosité à grand rayon de courbure), (2) maintenir une largeur proche de 150 m et (3) atteindre une profondeur minimum de 1,6 m sous l'étiage conventionnel. En partant du postulat que les mouilles, localisées au niveau des concavités, sont séparées par des seuils situés aux niveaux où les courbures changent de direction, il différencie deux types de hauts-fonds (Poinsart et Salvador, 1993) :

- Le seuil favorisant le <u>bon passage</u> des navires (Figure 2-13-1) est disposé selon une diagonale, quasi parallèle aux berges, n'obstruant pas le chenal (profil en travers CD). Les extrémités des deux mouilles consécutives, séparées par le seuil, se suivent dans le prolongement l'une de l'autre. Cette configuration permet au thalweg de passer d'une berge à l'autre de façon progressive et régulière. Le seuil, de profondeur minimum comprise entre 1,5 et 2 m, forme un déversoir court. La rupture de pente du profil en long causée par la disposition mouille-seuil-

mouille est peu accentuée, ce qui n'entraîne pas l'augmentation visible de la vitesse de courant. La géométrie du chenal permet des conditions de navigation favorables.

- Le seuil qualifié de <u>mauvais passage</u> pour la navigation (Figure 2-13-2) est transversal dans le chenal (profil en travers CD). Les extrémités des deux mouilles successives se chevauchent. Cette organisation provoque le passage brusque du thalweg d'une berge à l'autre. Le seuil, de profondeur minimum inférieure à 1,5 m et pouvant chuter à 0,45 m dans certaines conditions (enregistrées sur le Rhône en 1875-80), constitue un déversoir long et faiblement noyé. La rupture de pente du profil longitudinal, provoquée par le défilé des formes, est très forte, ce qui induit une augmentation importante de la vitesse du courant. La faible capacité de mouillage au niveau du seuil, le changement brusque de direction de l'axe de navigation et la violence du courant imposent des conditions de navigation difficiles.

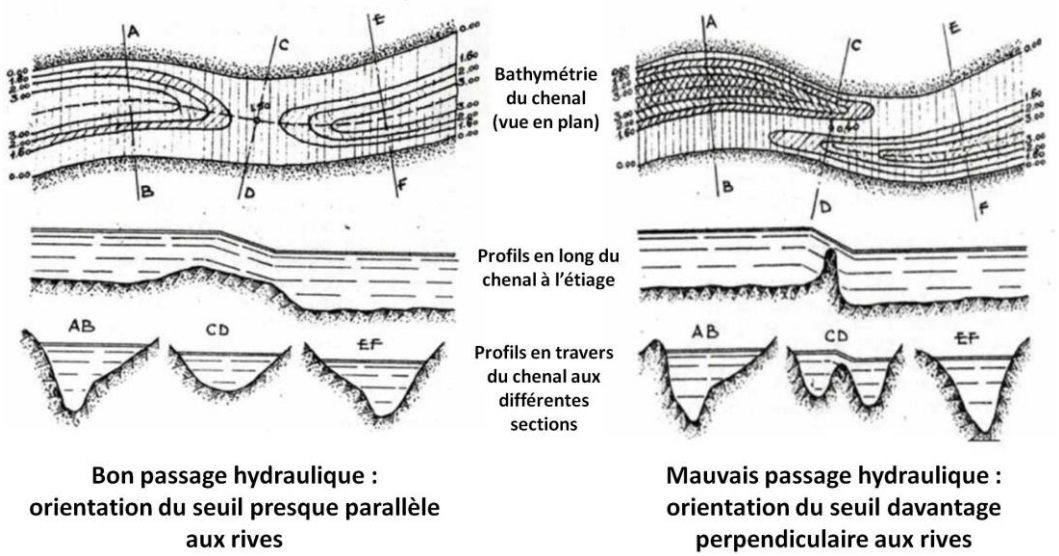


Figure 2-13 : Caractéristiques des hauts-fonds de type bon (1) et mauvais (2) passages hydrauliques pour la navigation. Modifié d'après Chamboredon (s.d.) in Perial (2012).

Girardon cherche alors à transformer les mauvais passages en bons passages. Pour ce faire, il parfait le système déjà en place en tenant compte de l'hydraulique, et notamment de la dynamique fluviale, par l'amélioration de l'utilisation des épis, des seuils de fond, des tenons et des traverses selon trois méthodes, synthétisées dans l'Annexe 2 :

<u>La concentration des eaux dans le lit mineur</u>

Les flux sont concentrés dans le chenal principal par la fermeture des bras secondaires (Figure 2-14, en haut) : (1) la construction, à l'entrée du bras, d'un barrage submersible, est calibrée pour ne concentrer que les basses eaux et laisser progresser les eaux plus hautes afin de ne pas augmenter la compétence du courant et éviter une incision trop importante du lit ; (2) la disposition régulière de traverses dans le bras permet de fixer le fond du lit et de diminuer la charge du barrage au moment du déversement en divisant les chutes d'eau (Girardon, 1894). Cette configuration permet de réguler l'entrée de l'eau dans le chenal principal afin d'éviter les dépôts et la création de seuils en dehors des inflexions (Girardon, 1902, cité dans Delahaye, 2009).

<u>La fixation des formes fluviales</u>

Les mouilles se tiennent dans les concavités, et plus la berge est haute et de courbure prononcée, plus les mouilles sont grandes. La construction de digues à parois raides et unies sur les deux rives entraîne

la création de profondeurs à la fois dans la concavité et dans la convexité, sur le même modèle que le mauvais passage décrit dans la Figure 2-13-2 (Poinsart et Salvador, 1993 ; Girardon, 1894 ; Fargue, 1868). Pour fixer les mouilles sur le modèle du bon passage, il est donc nécessaire de n'endiguer que les berges concaves par l'utilisation de digues basses reliées à la rive par des tenons, des traverses ou des rattachements (Figure 2-14, en bas), et calibrées pour maintenir les profondeurs dans la concavité et orienter le thalweg et le seuil (Girardon, 1902). En période de hautes eaux, cet aménagement empêche la création de courants transversaux dans le chenal qui peuvent être provoqués par le déversement de la lame d'eau à l'arrière des digues, risquant l'affouillement au pied des ouvrages. Les courants sont donc ralentis dans cet ensemble rectangulaire que forment la digue et les tenons, plus connus sous le nom de casier Girardon (Figure 2-15), favorisant le dépôt de sédiments et l'engraissement des marges. Les ouvrages transversaux sont quant à eux orientés vers l'amont, en pente depuis la rive vers la digue, et l'altitude des digues diminue progressivement vers l'aval. Ces orientations d'ouvrages permettent de redresser progressivement la courbure et d'entraîner le déplacement du thalweg dans l'axe du chenal (Poinsart et Salvador, 1993).

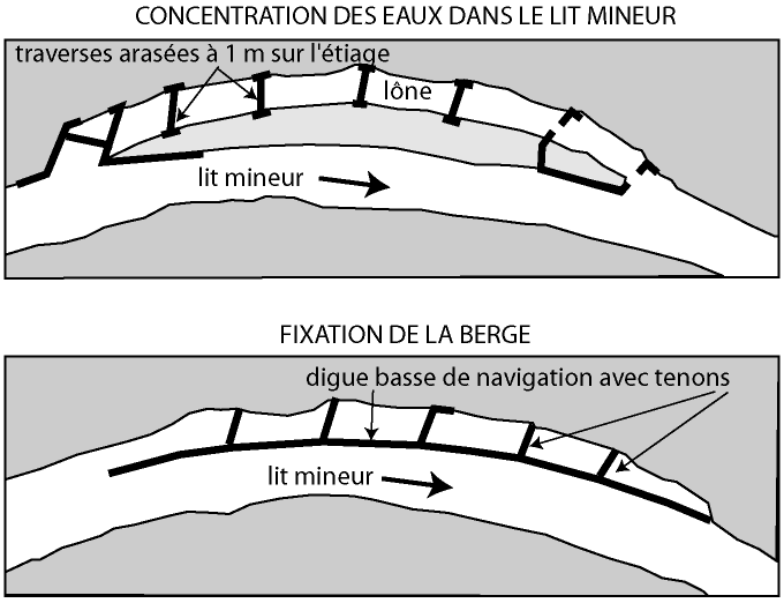


Figure 2-14 : L'aménagement à courant libre par la méthode Girardon. Réalisé par Delahaye (2009), d'après Bethemont (1972).

Afin de maintenir ce système en équilibre, la convexité doit présenter une plage à pente douce pour que le courant ne prenne pas de vitesse et pour assurer des profondeurs en rive concave. Leur consolidation peut se faire par l'utilisation d'épis plongeants (Figure 2-16) pour fixer ou forcer la création de plages (lorsque celles-ci n'existent pas) sur la convexité. Le courant devant être rejeté vers le thalweg, l'épi est incliné en direction de l'axe du chenal, en pente depuis la berge vers le chenal et orienté vers l'amont afin de ne pas accélérer la vitesse de courant (Figure 2-17). L'épi situé au maximum de la convexité présente la longueur, l'altitude (au niveau de la rive) et la pente les plus importantes. De part et d'autre de cet épi, les paramètres diminuent progressivement pour les autres épis proportionnellement à leur éloignement (Poinsart et Salvador, 1993). Pour maintenir les seuils se développant au droit de l'inflexion des courbures, il est nécessaire de conserver leur nombre et l'espacement préconisé par la configuration du bon passage hydraulique décrit dans la Figure 2-13-1 (Poinsart et Salvador, 1993).

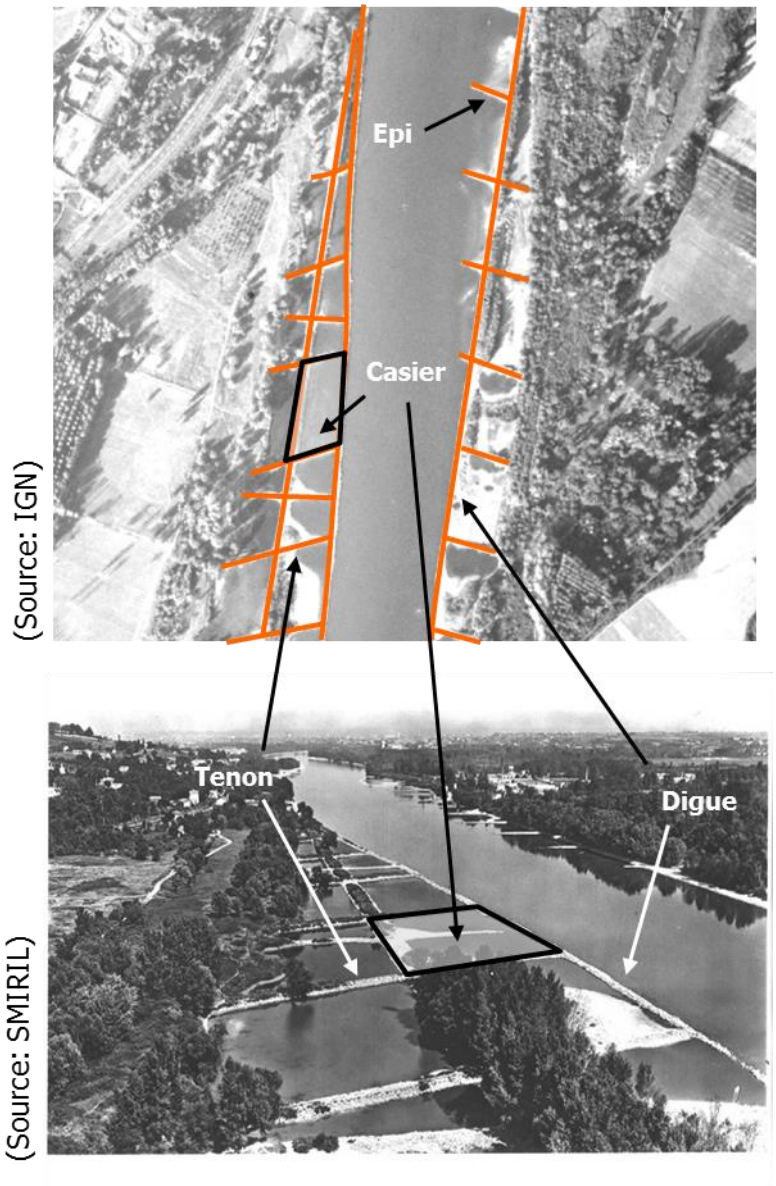


Figure 2-15 : Vue aérienne d'un système de casiers (ou carrés) dit Girardon que forme l'ensemble « tenon-digue » avant leur sédimentation.

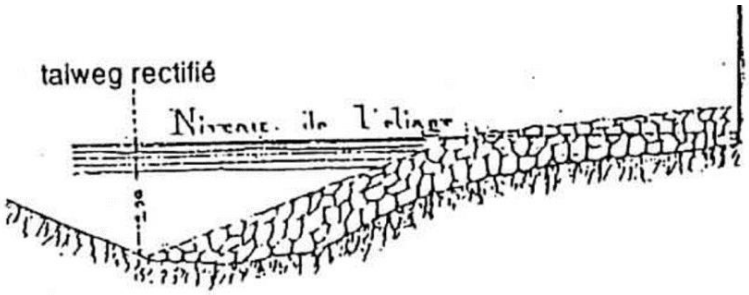


Figure 2-16 : Profil en long d'un épi plongeant dans le chenal (Poinsart et Salvador, 1993)

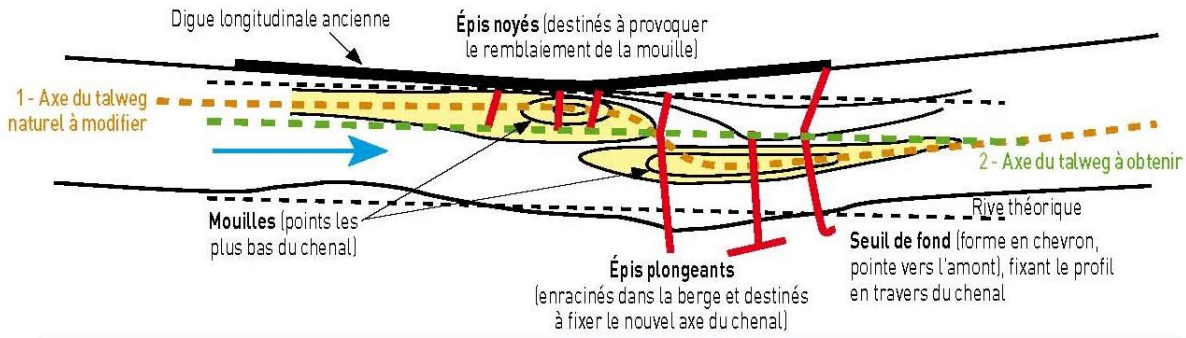


Figure 2-17 : Resserrement du lit et modification de l'axe du chenal pour favoriser la navigation par aménagement d'épis noyés, d'épis plongeants et de seuils de fond selon le système Girardon (Bravard et Clémens, 2008, d'après Poinsart et Salvador, 1993).

L'orientation des seuils et le resserrement du lit

L'orientation des seuils est plus complexe, se faisant parfois naturellement lorsque tous les paramètres sont fixés. Cependant, la résistance ou la pente du lit conditionnent fortement la réponse du chenal à un aménagement : il faut donc fixer le seuil comme pour établir une structure de base identique et obtenir les mêmes orientations d'un ouvrage à l'autre (Girardon, 1894). La fixation des seuils se fait à l'aide d'épis noyés, (Figure 2-18) qui sont disposés de façon régulière et perpendiculairement à l'axe de la mouille pour la remblayer (Figure 2-17), et à une profondeur suffisamment importante pour ne pas gêner la navigation (Poinsart et Salvador, 1993). Cette configuration permet de forcer la forme, de guider le passage d'une concavité à l'autre, et de fixer la position et l'orientation des seuils (Girardon, 1902 ; Girardon, 1894). Un épi noyé peut-être prolongé jusqu'à la berge opposée si l'ouvrage a besoin d'être renforcé, prenant alors le nom de seuil de fond (Figure 2-19). Il adopte une forme en chevron où la pointe, placée dans l'axe du thalweg à obtenir (théorique), est tournée vers l'amont (Figure 2-17) (Poinsart et Salvador, 1993).

La Figure 2-17 résume les fonctions assurées par les différents épis mis en place par Girardon et l'Annexe 2 synthétise les règles de construction et l'impact de chaque ouvrage. La mise en place des épis permet de favoriser la navigation en concentrant les écoulements dans le chenal sur un axe donné et en resserrant le lit mineur par déposition de sédiments fins sur les marges. Par conséquent, ces actions favorisent l'incision du lit et son uniformisation, augmentant ainsi le tirant d'eau, la capacité d'auto-curage et la stabilité du chenal navigable (Bravard et Clémens, 2008).

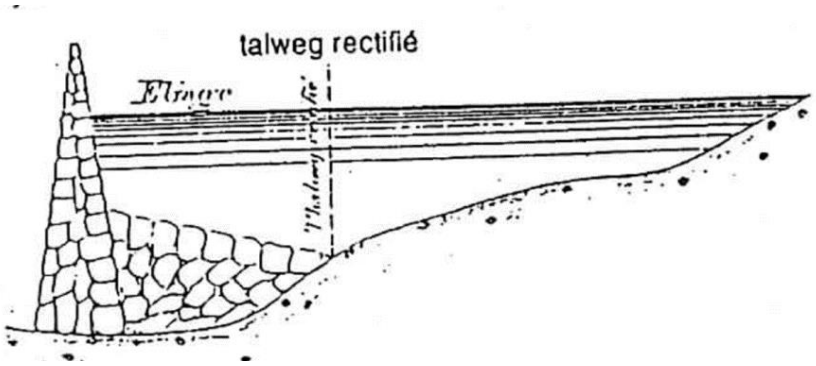


Figure 2-18 : Profil en long d'un épi noyé dans le chenal (Poinsart et Salvador, 1993)

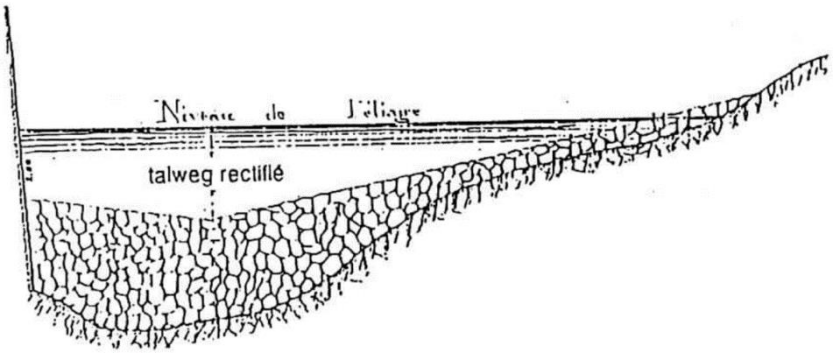


Figure 2-19 : Profil en long d'un seuil de fond dans le chenal (Poinsart et Salvador, 1993)

Ces aménagements sont une véritable réussite pour la navigation. Le tirant d'eau minimum pour l'étiage conventionnel a considérablement augmenté depuis les interventions de l'ingénieur en chef Girardon. Sous la direction de l'ingénieur en chef Jacquet, la profondeur minimale était inférieure à 0,5 m (sous 5 seuils) en 1878 et augmente à 0,8 m en 1882 (Poinsart et Salvador, 1993). Puis, suite aux aménagements Girardon, le mouillage minimum atteint 1,25 m en 1892 (Girardon, 1892, cité dans Delahaye, 2009), puis 1,35 m en 1919 (Delahaye, 2009). D'après Poinsart et Salvador (1993), le nombre de seuils dont la profondeur est inférieure à 1,6 m sur l'ensemble du Bas-Rhône passe de 87% en 1882 à 29% en 1887-88, et finalement à 4% en 1929-30. Selon Bethemont (1972) les mauvais passages sont progressivement éliminés passant de 187 en 1883 à 67 en 1928 puis à 59 en 1938. D'après un rapport réalisé par Girardon en 1892, les aménagements réalisés depuis 1860 ont permis de passer de 3 mois de chômage, 4 mois de navigation difficile (mouillage < 1,6 m = navigation à chargement réduit) et 5 mois de navigation facile à 14 jours de chômage, 14 de difficultés moindres et 11 mois de navigation facile (Girardon, 1892). L'amélioration des conditions de navigation et l'augmentation des échanges commerciaux n'ont cependant pas empêché le déclin du transport de marchandise par voie fluviale, les nouveaux navires nécessitant un mouillage encore plus important (Poinsart et Salvador, 1993).

Malgré leur succès, les ouvrages Girardon présentent une certaine fragilité et nécessitent un entretien régulier. Le système Girardon est utilisé sur un linéaire important du Rhône, principalement sur le Rhône aval, jusqu'à l'abandon des travaux de rectification en 1938. Ceux-ci sont sous la direction de l'ingénieur en chef Armand à partir de 1920. L'entretien des aménagements est quant à lui maintenu jusqu'à la mise en place des ouvrages hydroélectriques à dérivation (Poinsart et Salvador, 1993).

2.2.5. Impacts sur la morphologie du Rhône

Le système mis en place par Girardon a profondément marqué le chenal du Rhône par la construction d'une voie navigable directement dans le lit mineur. C'est une perturbation définitive du système fluvial : la transformation a non seulement été latérale par la création d'un bras unique, mais aussi verticale par l'incision du lit mineur. Le linéaire du Rhône est progressivement chenalisé, mettant fin à la divagation du fleuve et aux inondations régulières de sa plaine alluviale. Le fleuve passe d'un style en tresses, où se développent des bancs mobiles graveleux ou sableux et des bras secondaires fonctionnels, à un style sinueux, à chenal unique où siègent des bancs latéraux (Arnaud-Fassetta, 2003 ; Antonelli et al., 2004 ; Provansal et al., 2012). De nombreux secteurs ont été largement artificialisés. Plus localisée dans le Haut-Rhône, la disparition définitive du tressage est majoritaire à l'aval de Lyon. Le chenal a connu successivement la disparition des tresses, l'assèchement des bras secondaires et le changement du profil transversal (Figure 2-20 et Figure 2-21).

Les aménagements ont ainsi totalement modifié les processus morphodynamiques dans le but d'imposer l'alluvionnement préférentiel de certaines zones : la sédimentation dans les bras secondaires, la création de plages dans les convexités et le remblaiement des casiers Girardon. Au sein de ce système, la sédimentation demeure continue, notamment en période de décrue, lorsque le courant perd de son énergie et favorise le dépôt des sédiments fins (sables et limons) et de matière organique. L'efficacité de ces ouvrages est telle que l'alluvionnement massif des marges a progressivement déconnecté le chenal de ses berges en barrant les bras secondaires (atterrissement par accumulation principalement limoneuse) et par engraissement (augmentation de la hauteur des marges) (Fruget, 2003). Les marges alluviales sont alors de moins en moins alimentées en eau et remobilisées par les crues. De plus, cette sédimentation a provoqué le colmatage des marges et par conséquent un apport excessif de nutriments favorisant le développement d'espèces invasives et entraînant la perte de la diversité des milieux et des habitats. Ces impacts ont de lourdes conséquences sur la préservation des écosystèmes alluviaux : la diminution des zones de refuge et d'habitat d'espèces rivulaires que constituent les bras secondaires, et plus généralement la disparition de la ripisylve et de la faune riveraine de la plaine alluviale (Fruget, 2003).

D'autre part, les digues ont permis l'édification d'un chenal unique où se concentrait la plus grosse partie du débit. Ce forçage a entraîné l'augmentation de la vitesse du courant favorisant l'incision du lit et l'uniformisation du profil lorsque les formes fluviales n'ont pas été fixées par les épis. Les bancs de graviers dans le chenal principal endigué ont été supprimés par érosion (Michelot, 1983, cité dans Perial, 2012). La protection des berges a aussi impliqué la limitation de leur érosion, c'est-à-dire d'une source d'apports solides (Bravard et Peiry, 1993). La sédimentation dans les ouvrages et la réduction de la recharge latérale du fleuve réduisant les apports grossiers ont d'autant plus favorisé l'incision du lit selon le phénomène d'*hungry water* (Kondolf, 1997 ; vu dans le chapitre 1). Les endiguements ont toutefois facilité l'exhaussement local des fonds en période de hautes eaux par perte de compétence lors des débordements, phénomène observé par Bravard (1987) au niveau du passage du Chaffard à Brégnier-les-Avenières.

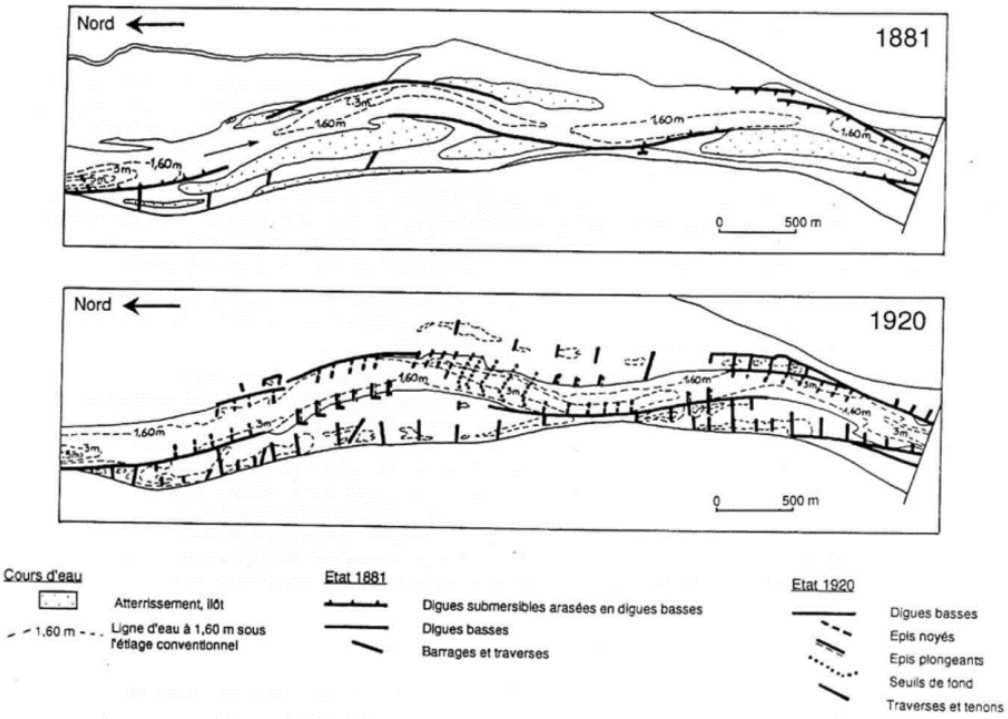


Figure 2-20 : Evolution du Rhône à Pierre-Bénite entre 1881 et 1920 (Poinsart et Salvador, 1993)

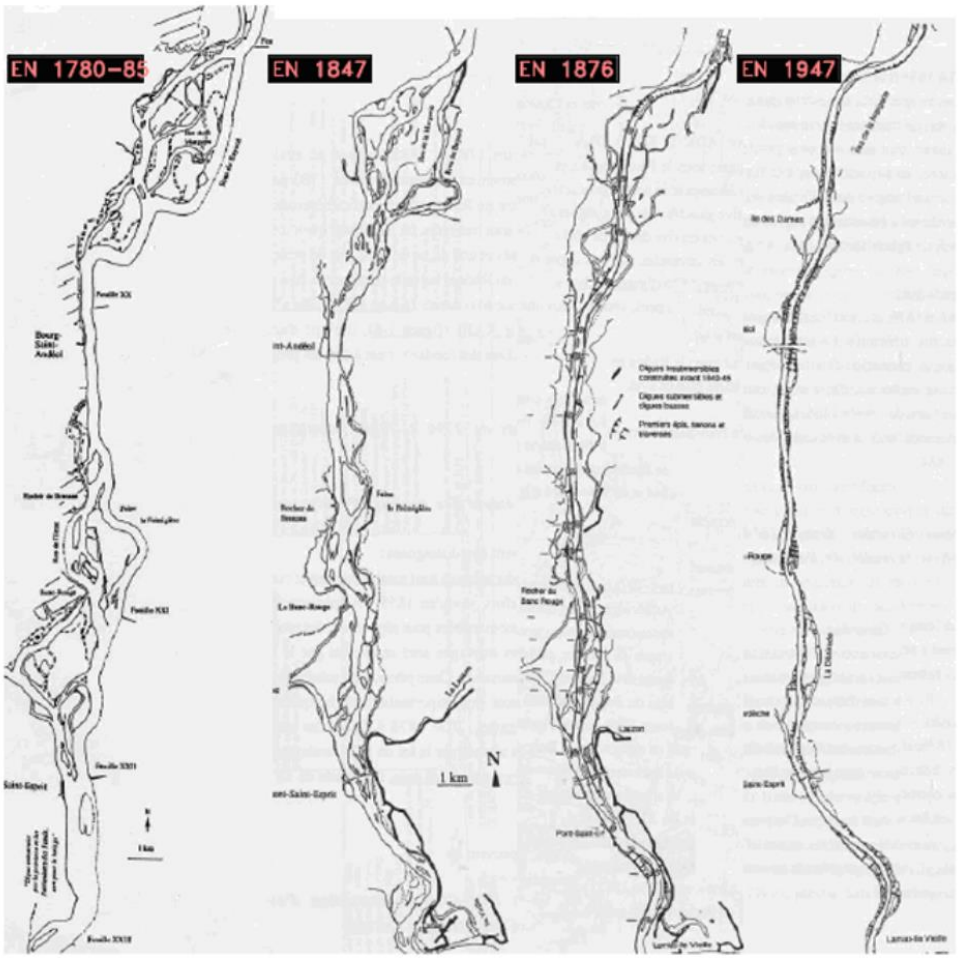


Figure 2-21 : Evolution du tracé du Rhône à Donzère-Mondragon entre 1780 et 1947 (Poinsart, 1992)

En résumé, l'artificialisation des berges a eu de nombreux impacts sur la dynamique du lit :

- l'arrêt de la mobilité latérale du chenal par la stabilisation des berges,
- la contraction de la bande active et la déconnexion des marges alluviales par endiguement et remblaiement des aménagements latéraux,
- la diminution des apports par dépôt dans les ouvrages et limitation de l'érosion des berges,
- l'incision du plancher alluvial par concentration du débit (augmentation de la vitesse du courant) et déficit sédimentaire, provoquant le lissage du profil et la disparition des hauts-fonds non fixés (bancs, seuils).

Les aménagements de correction et de rectification du chenal ont modifié à la fois l'espace fluvial et la morphologie, permettant une maîtrise relative du fleuve. Ils ont mis définitivement fin au Rhône sauvage en simplifiant le tracé de son chenal. La sédimentation dans les marges alluviales, provoquée par les endiguements, perturbe durablement l'écoulement en lit mineur. L'énergie des crues n'est plus dissipée latéralement par l'inondation de la plaine alluviale mais est contenue verticalement dans le chenal principal (Bravard, 1994), ce qui entraîne une augmentation des fréquences de débordements et des hauteurs d'inondation à l'aval. Le remblaiement entraîne aussi un appauvrissement de sédiments transitant dans le fleuve et favorisant la mobilité du fond, ce qui provoque une régression de la biodiversité par la diminution : (1) du renouvellement du milieu par les crues, (2) des apports en nutriments et (3) des formes fluviales, et par conséquent des habitats aquatiques.

2.3. Les grands travaux d'aménagement hydroélectrique

Les premiers aménagements

Les tout premiers aménagements à but énergétique ont débuté en 1871 à Bellegarde, sur le site des Pertes du Rhône, où des turbines actionnaient des poulies, et se sont poursuivis en 1899 à Jonage avec la construction hydroélectrique de Cusset (aménagement sur le canal de dérivation de Jonage) afin d'alimenter Lyon en énergie (Bravard et Clemens, 2008). Mais c'est sous la direction de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), que se déroulera la deuxième grande phase d'aménagement du chenal. Entre 1948 et 1986, les grands travaux d'aménagement hydroélectrique du Rhône français se font par la construction de 18 ensembles d'aménagements, soit 19 barrages, 19 centrales (ou usines) hydroélectriques, 14 écluses et 16 canaux de dérivation (Figure 2-22).

La Compagnie Nationale du Rhône

Créée en mai 1933, la CNR est née de la volonté d'un aménagement global de la vallée à des fins de production d'énergie, d'irrigation et de navigation moderne. C'est en juin 1934 que le ministre des Travaux Publics accorde à cette société d'intérêt général la concession du Rhône jusqu'en 2023. Elle a, en outre, pour mission de mettre en valeur le fleuve par les ressources financières tirées de l'hydroélectricité. Les travaux sont réalisés selon un projet général d'aménagement élaboré dans les années 1930 et approuvé par le gouvernement en 1935. Ce projet fixe les principes d'aménagement et le programme des travaux à réaliser.

Historique et principe de fonctionnement des aménagements hydroélectriques

Ce sont les contraintes géographiques et topographiques, tels que les rétrécissements de la vallée ou la présence d'affluents importants, qui ont majoritairement conditionné les types d'aménagement. Par ailleurs, les choix techniques du projet général d'aménagement ont aussi fortement été influencés par

l'urbanisation, le développement économique du secteur et la volonté de préserver les voies routières et ferroviaires (Bravard et Clemens, 2008).

Les travaux débutent à Génissiat en 1937 mais, interrompus par la Seconde Guerre mondiale, ne reprennent qu'en 1946 pour s'achever en 1948, avec pour priorité de subvenir aux besoins en énergie du pays particulièrement plus importants en cette période de reconstruction. C'est dans cette optique que les travaux se poursuivent rapidement en 1947 d'abord à Donzère-Mondragon, puis à Seyssel en 1951, à Montélimar en 1953, à Baix-Le Logis Neuf en 1957 et à Beauchastel en 1960 (Tableau 2-6).

En 1965, la production d'énergie seule n'est plus rentable pour la CNR, qui doit alors se tourner vers un aménagement à buts multiples : la construction accélérée des centrales hydroélectriques, la réalisation d'une voie navigable moderne, adaptée aux navires de grand gabarit entre Lyon et la mer, et l'aménagement pour l'agriculture et le développement de l'irrigation. L'aménagement de Pierre-Bénite (de 1962 à 1966) s'inscrit dans cette nouvelle orientation et sert à établir un modèle théorique pour les constructions qui suivent d'abord depuis le Rhône moyen à la mer à Bourg-lès-Valence (1965-68), Vallabrègues (1966-70), Saint-Vallier (1968-71), Avignon (1970-73), Caderousse (1972-75), Péage-de-Roussillon (1974-77) et Vaugris (1977-80), puis dans le Haut Rhône à Chautagne (1978-81), Belley (1979-81), Brégnier-Cordon (1981-84) et Sault-Brénaz (1984-86) (Tableau 2-6).

Le barrage de Génissiat est le seul du Rhône à être de type montagnard : l'usine est intégrée dans le barrage de moyenne chute, et l'ouvrage possède un réservoir qui s'étend sur près de 23 km avec une hauteur de chute de 75 m. A l'exception de Seyssel, barrage-usine mis en service en 1952 pour réguler le débit en compensant les éclusées de Génissiat juste à l'amont, et de Vaugris (1980), barrage-usine et écluse au fil de l'eau, les autres aménagements hydroélectriques respectent une organisation type à l'image de l'ouvrage de Cusset. Ce sont donc quinze aménagements qui suivent la même configuration (Figure 2-23):

1) Un canal de dérivation à faible pente, creusé parallèlement au fleuve sur une longueur de 5 à 20 km et une largeur de 120 à 200 m, court-circuite le chenal naturel. L'usine hydroélectrique et l'écluse sont implantées sur ce canal. Le tronçon à l'amont de l'usine est appelé canal d'amenée et canal de fuite à l'aval.
2) Un barrage mobile, c'est-à-dire à hauteur ajustable (surélévation de l'eau), est implanté sur le bras naturel court-circuité du fleuve appelé alors vieux Rhône. Le barrage crée une retenue, de longueur variant entre 5 et 20 km et de largeur comprise entre 300 et 500 m, maintenue par des endiguements latéraux dimensionnés pour la crue millénale. Le barrage renvoie la majeure partie du débit à l'usine par l'intermédiaire du canal d'amenée. Ce débit est turbiné par la centrale hydroélectrique au fil de l'eau qui restitue la totalité du flux dérivé au Rhône par le canal de fuite en aval de l'usine.

C'est le barrage qui contrôle les débits selon une consigne d'exploitation spécifique qui permet de maintenir le niveau réglementaire de l'eau et de répartir les flux entre l'usine et le barrage. Il garantit un débit réservé (minimum) au vieux Rhône, largement inférieur au débit d'origine, détournant ainsi les écoulements du bras naturel. Globalement, les vieux Rhône reçoivent, hors périodes de crue où la capacité du canal est dépassée, entre 10 et 50 m^3/s contre un débit moyen naturellement reçu avant aménagement compris entre 335 et 1700 m^3/s (Figure 2-24). Près de 50% du Rhône est régulé par les ouvrages CNR avec environ 150 km de fleuve court-circuité et 225 km de retenues (Fruget, 2003).

Des contre-canaux sont aménagés le long des endiguements (Figure 2-23) afin de collecter les eaux percolant au travers des digues perméables, de drainer les cultures et d'assurer l'équilibre piézométrique des nappes (Bravard et Clemens, 2008).

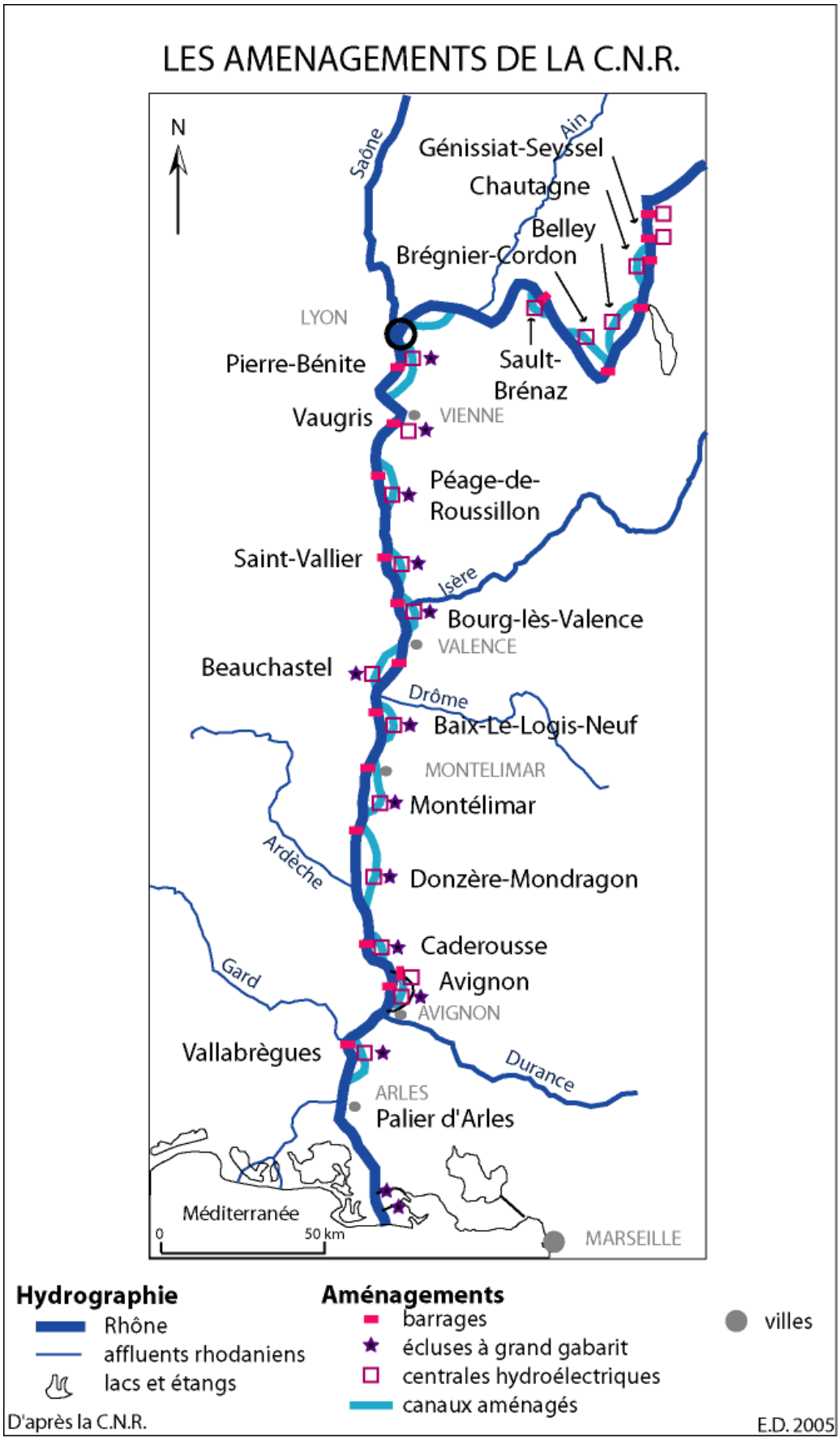


Figure 2-22 : Carte des aménagements de la Compagnie Nationale du Rhône depuis la frontière suisse à la mer (Delahaye, 2009)

Secteur	Barrage	Type de barrage	Début travaux	Mise en service	Débit max dérivé (m^3/s)	Production moyenne par an (milliard de kWh)	Hauteur chute (m)	Puissance installée (MW)	Longueur retenue (km)	Longueur dérivation (km)
Génissiat	Génissiat	Barrage-usine	1937-46	1948	750	1,7	67 m	420 MW	23	Ø
Seyssel	Seyssel	Barrage-usine	1951	1951	600	0,165	8,25 m	45 MW	11	Ø
Chautagne	Motz	A dérivation	1978	1981	700	0,454	17 m	90 MW	5	8,7
Belley	Lavours	A dérivation	1979	1981	700	0,449	17 m	90 MW	5	15,1
Brégnier-Cordon	Champagneux	A dérivation	1981	1984	700	0,324	13,7 m	70 MW	12	8
Sault-Brénaz	Villebois	A dérivation	1984	1986	700	0,245	9,7 m	45 MW	28	1,55
Pierre-Bénite	Pierre-Bénite	A dérivation	1962	1966	1400	0,535	9 m	80 MW	4,5	11,2
Vaugris	Vaugris	Barrage-usine+écluse	1977	1980	1400	0,335	6,7 m	72 MW	19	Ø
Péage de Roussillon	Saint-Pierre-de-Bœuf	A dérivation	1974	1977	1600	0,85	12,2 m	160 MW	15,7	11,3
Saint-Vallier	Arras	A dérivation	1968	1971	1650	0,7	11,5 m	120 MW	19,5	4,5
Bourg-Lès-Valence	Roche-de-Glun	A dérivation	1965	1968	2300	1,1	11,7 m	186 MW	11,1	9,9
Beauchastel	Beauchastel	A dérivation	1960	1963	2100	1,2	11,8 m	192 MW	15	6,5
Baix le Logis-Neuf	Pouzin	A dérivation	1957	1960	2260	1,2	14,75 m	210 MW	8,8	9,2
Montélimar	Rochemaure	A dérivation	1953	1957	2200	1,6	16,5 m	270 MW	9	13,5
Donzère-Mondragon	Donzère	A dérivation	1947	1952	1970	2,14	22,5 m	354 MW	4	28
Caderousse	Caderousse	A dérivation	1972	1975	2280	0,84	8,6 m	190 MW	11,5	4,5
Avignon	Sauveterre + Villeneuve	A double dérivation	1970	1973	2400	0,935	9,5 m + 10 m	120 MW + 60 MW	12	8
Beaucaire	Vallabrègues	A dérivation	1966	1970	2200	1,3	13,5 m	210 MW	18	7
Grand Rhône	Pallier d'Arles			1974						

Tableau 2-6 : Principales caractéristiques des ouvrages de la Compagnie Nationale du Rhône (Source CNR)

Aménagement type du Rhône (© Photothèque CNR).

Figure 2-23 : Aménagement CNR type sur le Rhône (Photothèque CNR dans Bravard et Clemens, 2008)

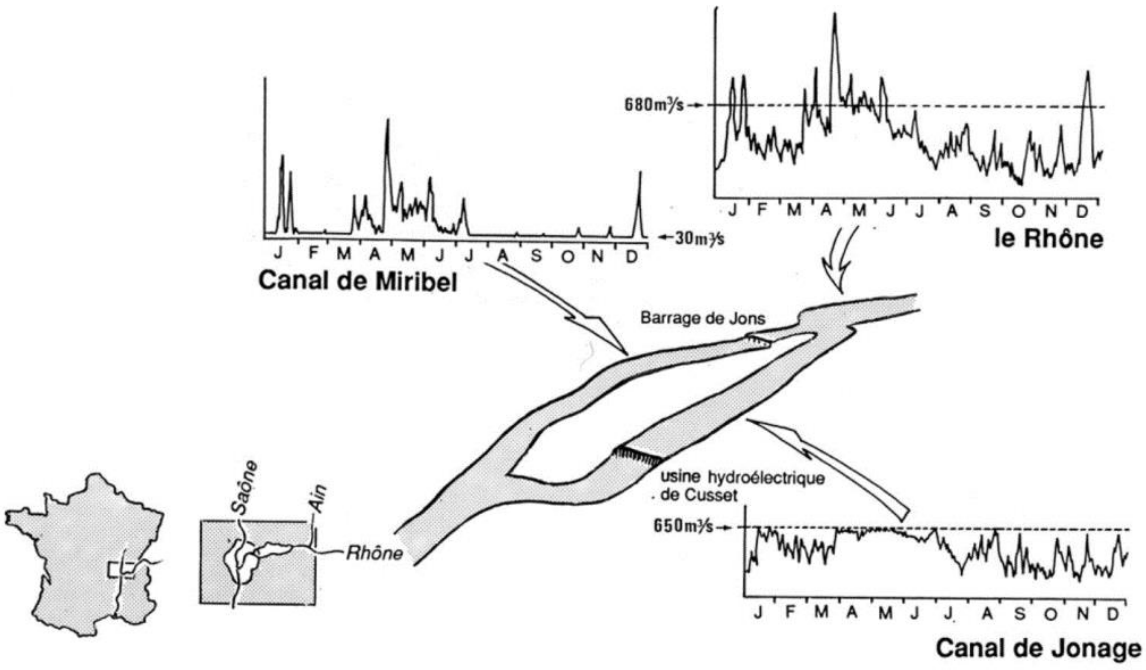


Figure 2-24 : Hydrogrammes du Rhône et des canaux de Miribel et Jonage pour l'année 1986 (Poinsart et al., 1989)

Génissiat exclu, les aménagements du Rhône ont été conçus comme une succession de chutes de faibles hauteurs au fil de l'eau, où la hauteur d'eau est contrôlée par la retenue du barrage aval. Au module, la hauteur de chute est maximale et le plan d'eau est quasi horizontal (Figure 2-25). Les aménagements à faible chute ont permis de préserver l'espace et les terres mises en valeur de la vallée du Rhône. Les centrales hydroélectriques possèdent un débit d'équipement (le débit maximal dérivé i.e. turbinable par l'usine) de 700 m^3/s en moyenne pour le Haut Rhône et de 1400 à 2400 m^3/s pour le Bas Rhône (Tableau 2-6). Au-delà de ce débit, le barrage s'ouvre progressivement, selon la consigne d'exploitation de l'ouvrage en question, pour évacuer le débit excédentaire dans le vieux Rhône, entraînant le basculement des plans d'eau pour retrouver la pente naturelle du fleuve en crue. En période de crue, lorsque le débit est beaucoup trop important, les turbines sont à l'arrêt et l'usine laisse passer le débit. Le dimensionnement des ouvrages n'est pas adapté pour contenir et écrêter les crues du Rhône. En effet, le cahier des charges de la CNR ainsi que la gestion et l'exploitation des ouvrages imposent l'écoulement naturel des crues au travers des aménagements (Bravard et Clemens, 2008).

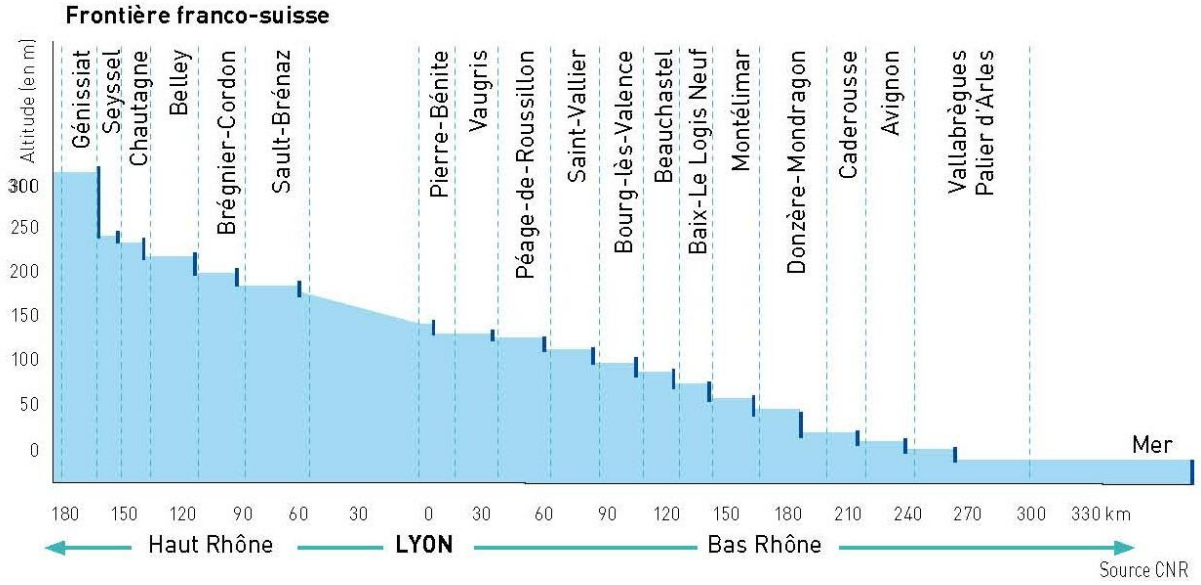


Figure 2-25 : Profil longitudinal de la ligne d'eau contrôlée par les barrages de la CNR (Bravard et Clemens, 2008)

Afin de ne pas aggraver l'écoulement naturel en crue, lorsque les digues insubmersibles empêchent la dissipation des crues sur le lit majeur ou sur les champs d'expansion, la CNR a cherché à (1) conserver le même volume d'écoulement et à améliorer la débitance du lit (débit maximum du transit sans débordement) grâce à des travaux compensatoires de morcellement des berges et de dragage du lit entre les endiguements, (2) empêcher l'exhaussement des lignes d'eau en amont des endiguements en limitant leur longueur, (3) préserver la capacité d'écrêtement du Rhône pour les fortes crues provoquant un champ d'expansion important et réduire la fréquence d'inondation des riverains pour les crues plus faibles par la construction de digues déversantes, (4) soulager les vieux Rhône d'une partie des débits de crue par la conception de canaux de dérivation capables de compenser certains champs d'expansion (Bravard et Clemens, 2008).

Les travaux engagés sur le Rhône par la CNR ont permis d'ouvrir le fleuve à la navigation moderne sur plus de 300 km grâce aux 14 écluses à grand gabarit construites entre Lyon et la mer, de développer près d'un millier d'hectares répartis sur une trentaine de sites industriels et portuaires, dont la construction du port Edouard-Herriot à Lyon dès 1934, et de construire des ports de plaisance, des haltes nautiques et des zones de loisirs. Elle a aussi permis l'irrigation et la protection contre les crues

de milliers d'hectares (Bravard et Clemens, 2008 ; Delahaye, 2009). D'un point de vue énergétique, la capacité moyenne de production des 19 centrales hydroélectriques est de 16 milliards de kWh/an (Tableau 2-6), soit environ 4 % de la production d'électricité nationale et 25 % de la production hydroélectrique (Bravard et Clemens, 2008).

2.3.1. Conséquences des barrages sur les débits liquides et solides

La perturbation de la dynamique sédimentaire est apparue bien avant la construction des aménagements hydroélectriques suite aux différentes phases de chenalisation, mais aussi aux extractions massives dans tout le bassin versant. Dans ce contexte, il devient très difficile de distinguer l'impact exact des aménagements hydroélectriques sur la morphodynamique du Rhône. Il est néanmoins certain que la présence des barrages a entraîné des modifications du transit des graviers suite à la perturbation de la pente dans les retenues et du débit dans les vieux-Rhône.

La gestion des barrages vise à maintenir un niveau d'eau constant en un point de réglage situé en général légèrement en amont dans la retenue. Les lignes d'eau varient entre un plan quasi horizontal pour de faibles débits et un plan incliné pour les forts débits, provoqué par l'ouverture du barrage. La réduction de la pente dans la retenue est d'autant plus marquée que le débit est faible et ce n'est que pour les crues exceptionnelles que la ligne d'eau tend vers la pente naturelle.

L'ouverture des vannes de fond du barrage en période de crue permet ainsi la chasse des matériaux déposés à l'amont immédiat du barrage sans pour autant que celui-ci soit totalement transparent. Une perte de charge au barrage a été calculée pendant des crues exceptionnelles, ce qui implique une pente à l'amont de l'ouvrage inférieure à la pente naturelle. Le transit des graviers sur toute la partie amont ne peut donc être que partiel, ne permettant pas aux vannes de fonds d'évacuer l'ensemble la charge de fond mais uniquement les sédiments accumulés au niveau du barrage. En principe, la transparence d'un barrage est observée à partir de la crue centennale où la perte de charge devient négligeable. La crue peut alors assurer le transit des apports amont et la remobilisation d'une partie de la sédimentation de la retenue. Toujours est-il qu'une perte de charge significative est observée sur une grande partie des retenues même lors des grandes crues du Rhône (Tableau 2-7). Précisons ici que la perte de charge à un barrage correspond à la dissipation de l'énergie dans le système. L'écoulement se définie par sa charge hydraulique, c'est-à-dire la hauteur ou la colonne d'eau. La perte de charge correspond au ralentissement de l'écoulement, induit par le remous provoqué par le barrage vers l'amont sur une certaine longueur d'amortissement.

Dans le vieux Rhône, le débit réservé est quasi constant, sauf lorsque le débit maximum turbinable par l'usine est dépassé, entraînant l'augmentation du débit excédentaire. La fréquence des débits morphogènes diminue fortement par la dérivation de l'écoulement dans le canal, entraînant la réduction de la capacité de transport dans le Rhône court-circuité (RCC). De plus, même en période de crue, la majorité des vieux Rhône ont leur ligne d'eau influencée par la retenue aval. La dynamique des vieux Rhône se retrouve alors doublement perturbée par la réduction des débits, dictée par le barrage amont, et par la réduction de la pente motrice, imposée par le barrage aval.

Le Rhône retrouve l'intégralité de son débit liquide à l'aval de la restitution, tandis que le débit solide est fortement diminué par (1) l'accumulation des sédiments à l'amont du barrage, (2) la réduction de la capacité de transport solide dans le vieux Rhône et (3) l'absence de transit des apports amont par le canal, la prise d'eau étant conçue pour éviter l'entrée des graviers. La restitution se fait généralement

dans le remous de la retenue aval, ce qui induit une pente motrice plus faible et limite ainsi la puissance érosive de l'eau de la dérivation dépourvue en sédiments.

Perte de charge au barrage lors de crues exceptionnelles			
AMENAGEMENT	Date	Débit m³/s	Perte de charge m
SEYSSEL			
CHAUTAGNE	1990	2850	3.1
BELLEY	1990	1950	env 1.5
BREGNIER CORDON	1990	1800	3.0
SAULT-BRENAZ	1990	2550	> 3
PIERRE BENITE	1983	4500	1.0
VAUGRIS	1983	4500	0
PEAGE DE ROUSSILLON	1983	4540	3.8
SAINT VALLIER	1983	4520	env 2.5
BOURG LES VALENCE	1993	5530	?
BEAUCHASTEL	1993	6520	0
BAIX LOGIS NEUF	1993	6720	1.6
MONTELIMAR	1994	6980	> 2
DONZERE MONDRAGON	1994	6980	0.6
CADEROUSSE			
VALLABREGUES	1988	10360	> 1 ?

Tableau 2-7 : Perte de charge au barrage observée lors des crues exceptionnelles du Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4)

D'après Bravard et Clemens (2008), les volumes annuels de graviers transportés dans les vieux Rhône ont été divisés par 15 à 100, et le transit dans les retenues, fortement réduit, n'est possible qu'en période de crue. Le transport de sédiments fins aurait diminué de moitié depuis les aménagements mais ne serait perturbé en réalité que par les grands barrages réservoirs (notamment Génissiat et sur les affluents).

2.4. La mobilisation du stock sédimentaire

2.4.1. Les extractions et les dragages

Depuis la seconde moitié du 20ème siècle, les extractions de granulats ont été massives dans le bassin versant du Rhône. Elles consistent en un prélèvement au fond du cours d'eau dans le but d'exploiter des matériaux pour la construction (remblais ou béton). Les extractions ont été réalisées dans le lit majeur des cours d'eau mais surtout dans leur lit mineur. Ces prélèvements privent le cours d'eau de sa charge solide mobilisable. De plus, ils ont laissé des fosses qui ont soit constitué une zone de piégeage des sédiments perturbant la progression par charriage, soit provoqué l'incision progressive et/ou régressive du plancher alluvial jusqu'à la rencontre d'un point dur (Piégay et Peiry, 1997). Selon Bravard (1987) et Poinsart (1992), les extractions réalisées directement sur le Rhône ont eu un impact

majoritairement local. Ce sont les prélèvements effectués sur les affluents, d'extraction principalement de montagne, qui ont provoqué un déficit sédimentaire beaucoup plus lourd (Peiry et Bravard, 1989 ; Blanc et al., 1989 ; Gautier, 1994 ; Landon et Piégay, 1994). Ils ont fait l'objet d'extractions importantes dans le cadre de concessions, réduisant considérablement les apports sédimentaires au Rhône.

Les prélèvements en lit mineur ont continué jusqu'en 1994 date à laquelle les extractions de type industriel dans le chenal des cours d'eau sont interdites afin de ne plus déstabiliser le transit sédimentaire.

Face aux problèmes d'entretien du lit, la CNR a dû directement agir sur les mouvements de matériaux sur le Rhône et ses affluents en optant pour une stratégie de dragage et d'extraction. Il faut distinguer les extractions de matériaux grossiers (du sable grossier au galet) participant au transport par charriage, des déplacements sans extraction de matériaux fins, ou dragage (des sables fins aux argiles) participant au transport par suspension. Les dragages correspondent à une remobilisation des sédiments qui sont remis en suspension pendant leur extraction.

La mise en mouvement des matériaux par extraction ou remobilisation répond à la nécessité de gestion du lit du Rhône pour :

- maintenir un chenal navigable pour un gabarit donné, majoritairement par dragage avec restitution,
- entretenir les ouvrages par remobilisation des sédiments stockés majoritairement à l'amont des barrages, des vannes, ou des écluses,
- permettre une exploitation électrique optimale par les dragages énergétiques à la restitution consistant à augmenter la hauteur de chute des usines hydro-électriques pour la production énergétique,
- prévenir des crues en maintenant le fond du lit à une altitude identique à celle qui a servi pour calibrer les digues,
- entretenir le lit des vieux Rhône par décapage des bancs et charruage, et les confluences par extraction mécanique là où les sédiments s'accumulent.

Depuis les années 70, ce sont près de 12,5 Mm^3 de graviers qui ont été extraits du Rhône et 13,3 Mm^3 de matériaux fins qui ont été remobilisés (Tableau 2-8). La mobilisation des matériaux, notamment l'extraction de graviers, même pour des besoins d'entretien, n'est pas sans conséquence sur la dynamique sédimentaire du chenal : elle contribue en partie à la discontinuité du transit.

	GRAVIERS EXTRAITS				MARERIAUX FINS REMOBILISES			
AMENAGEMENT	VOLUME MOY. AN. (milliers de m3/an)	PERIODE	NBRE ANNEES	VOLUME (milliers de m3)	VOLUME MOY. AN. (milliers de m3/an)	PERIODE	NBRE ANNEES	VOLUME (milliers de m3)
GENISSIAT	24	70/98	21	509	48	87/98	12	579
SEYSSEL	3	87/98	12	38	41	87/98	12	492
CHAUTAGNE	2	92/98	7	15	41	92/98	12	492
BELLEY	0	87/98	12	0	6	87/98	7	45
BREGNIER CORDON	40	85/98	8	320	1	92/98	7	8
SAULT BRENAZ	3	92/98	7	19	0	92/98	7	0
PIERRE BENITE	31	87/98	12	374	30	87/98	12	359
VAUGRIS	132	87/98	12	1 587	33	87/98	12	398
PEAGE DE ROUSSILLON	2	87/98	12	26	61	87/98	12	734
SAINT VALLIER	35	92/98	7	246	28	87/98	12	334
BOURG LES VALENCE	41	75/99	25	1 027	168	87/98	12	2 019
BEAUCHASTEL	31	87/98	12	371	65	87/98	12	779
BAIX LOGIS NEUF	56	71/98	28	1 577	107	86/98	13	1 387
MONTELIMAR	28	71/98	24	680	137	87/98	12	1 648
DONZERE MONDRAGON	162	84/98	14	2 266	79	87/98	12	947
CADEROUSSE	96	87/98	12	1 154	60	87/98	12	720
AVIGNON	6	92/98	7	45	43	87/98	12	517
VALLABREGUES	107	87/98	12	1 287	120	87/98	12	1 439
PALIER D'ARLES	98	88/98	9	881	32	87/98	12	382
TOTAL	899			12 422	1 101			13 279

Tableau 2-8 : Bilan des extractions de graviers et des remobilisations des matériaux fins réalisées par la CNR entre 1970 et 1999 (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A6)

2.4.2. Les chasses

Les opérations de chasses, ou hydro-curages, consistent à évacuer les sédiments stockés en amont des barrages par l'intermédiaire d'un déversement rapide du flux au travers des vannes de l'ouvrage vers l'aval. Ces interventions impliquent la vidange totale (pour barrages concernés) ou partielle des retenues successives d'amont en aval afin d'assurer la continuité du transit sédimentaire. Les sédiments fins accumulés dans le fond du chenal sont alors remis en suspension, entraînant la progression d'une eau fortement chargée en limons, qui affecte la qualité des eaux du fleuve. La quantité de MES augmente vers l'aval, de même que la concentration en micropolluants (d'origines industrielle, agricole ou naturelle) et en ammoniaque, produit par la décomposition de la matière organique et s'échappant des boues lors de leur mobilisation, rendant le milieu abrasif et anoxique (risque de diminution de la quantité d'oxygène dissous dans l'eau) pour les espèces piscicoles.

Les chasses du Rhône résultent de la nécessité de prévenir des risques d'inondation de la ville de Genève, en Suisse, et de déstabilisation des barrages par accumulation des sédiments dans les retenues. En effet, les barrages suisses de Verbois et de Chancy-Pougny, situés à l'aval du Léman, reçoivent les eaux de l'Arve chargées en sédiments qui se déposent dans les retenues. La première étape consiste à vidanger les retenues, c'est-à-dire à les vider afin de permettre au Rhône de retrouver un débit naturel. Puis la chasse est assurée par les apports rapides et conséquents du Léman, contrôlés au barrage du Seujet, et de l'Arve, en crue, qui permettent d'amorcer la mobilisation. Lorsque les eaux arrivent au barrage de Génissiat, celui-ci joue alors un rôle d'évacuateur de la charge sédimentaire vers l'aval, et tente d'assurer une dilution adéquate afin de maintenir la qualité de l'eau et de limiter la mortalité des poissons. Les chasses de 1965 ont provoqué un très fort taux de mortalité des espèces piscicoles jusqu'à Lyon et une forte altération de la qualité des eaux qui alimentent la métropole. C'est à partir de ce constat que l'organisation et le suivi des chasses se met en place entre la Suisse et la France afin de limiter l'impact sur la qualité du milieu et la mortalité des poissons. Depuis la mise en

place du suivi des chasses, les techniques n'ont cessé de s'améliorer, et les mesures des flux réalisées en continu n'ont cessé de se diversifier : suivi de la qualité de l'eau (micropolluants dont les polychlorobiphényles ou PCB et le mercure, MES, oxygène dissous...), écologique (faune aquatique, vieux Rhône restaurés), et des champs captant AEP (Alimentation en Eau Potable). Des pêches de sauvetage permettant le déplacement des poissons dans les zones refuges sont organisées lorsque l'on observe de la mortalité.

Au total, le Rhône a subi 19 chasses de barrage : 18 entre 1947 et 2003 (devenues triennales en 1967), puis une en 2012. Ces neuf années d'interruption résultent de la volonté de ne pas perturber les travaux de restauration écologique dans les lônes et les vieux-Rhône (IRSTEA, 2012), de la résolution à espacer les chasses compte tenu de leur impact sur la biodiversité et de l'opposition croissante des pêcheurs, malgré les progrès réalisés pour limiter les dommages sur l'environnement, et de l'évolution du contexte juridique français et européen, impliquant une consultation publique préalable du côté français, qui a ralenti la procédure (GE, 2012). Cette dernière chasse a remobilisé près de 1,7 Mm^3 de MES, visiblement accumulés depuis la chasse de 2003 (IRSTEA, 2012). Les fortes précipitations ont provoqué la crue des affluents du Haut-Rhône, favorisant une importante remise en suspension des fines, ce qui a entraîné la mort de nombreux poissons côté suisse, l'arrêt des opérations et l'accumulation de fines dans la retenue de Génissiat, obligeant la CNR à draguer près de 10 000 m^3 de sédiments (CNR, 2012 & 2013).

Même si le suivi permet de préserver au mieux l'environnement, il est important d'élaborer une solution alternative aux grandes chasses afin d'assurer une continuité dans le transit des sédiments, telle que l'ouverture plus régulière des vannes de fond en période de crue (conjointement aux opérations de dragages) avec une automatisation du suivi des flux en continu (MES, O_2, polluants) afin de libérer des quantités de particules moins nocives.

2.5. Impact de l'anthropisation sur le Rhône

Au cours des deux derniers siècles, le transport solide a sans cesse été perturbé par les interventions humaines successives s'inscrivant aux dépens d'une dynamique sédimentaire naturelle déjà complexe. Le fleuve se développe dans un chenal présentant une morphologie compliquée : les successions d'ombilics (fosses de remplissage) et de verrous du Haut-Rhône, les défilés épigéniques du Rhône moyen, les affleurements, et la géométrie imposée par la géologie. A cela s'ajoute de nombreux points de recharge sédimentaire (affluents, remobilisation d'héritages) qui viennent redynamiser le linéaire.

Les changements affectant l'occupation des sols dans le bassin versant au cours du 19ème siècle ont fortement perturbé les flux solides. Ils ont à la fois conduit à une augmentation des apports sédimentaires résultant de l'érosion des sols par la multiplication des terres agricoles et le surpâturage puis à leur diminution suite aux travaux de reboisement et surtout à la déprise agro-pastorale. Sont venus s'ajouter les nombreuses extractions réalisées en lit mineur sur le fleuve et ses affluents, le privant de sa charge sédimentaire mobilisable, créant des fosses de piégeage ou favorisant l'incision du lit.

Puis les travaux successifs de correction et de rectification du chenal et de ses affluents principalement au 19ème siècle ont définitivement modifié le style fluvial : le Rhône est passé d'un tracé en tresses avec une tendance au méandrage, à un chenal à lit unique à peine sinueux (Figure 2-27 et Figure 2-28). Les marges alluviales, sans cesse dynamisées par les crues, étaient composées de bras secondaires

comportant de nombreux milieux aquatiques, semi-aquatiques et terrestres abritant une forte diversité d'espèces (Figure 2-26-A, Fruget, 2003).

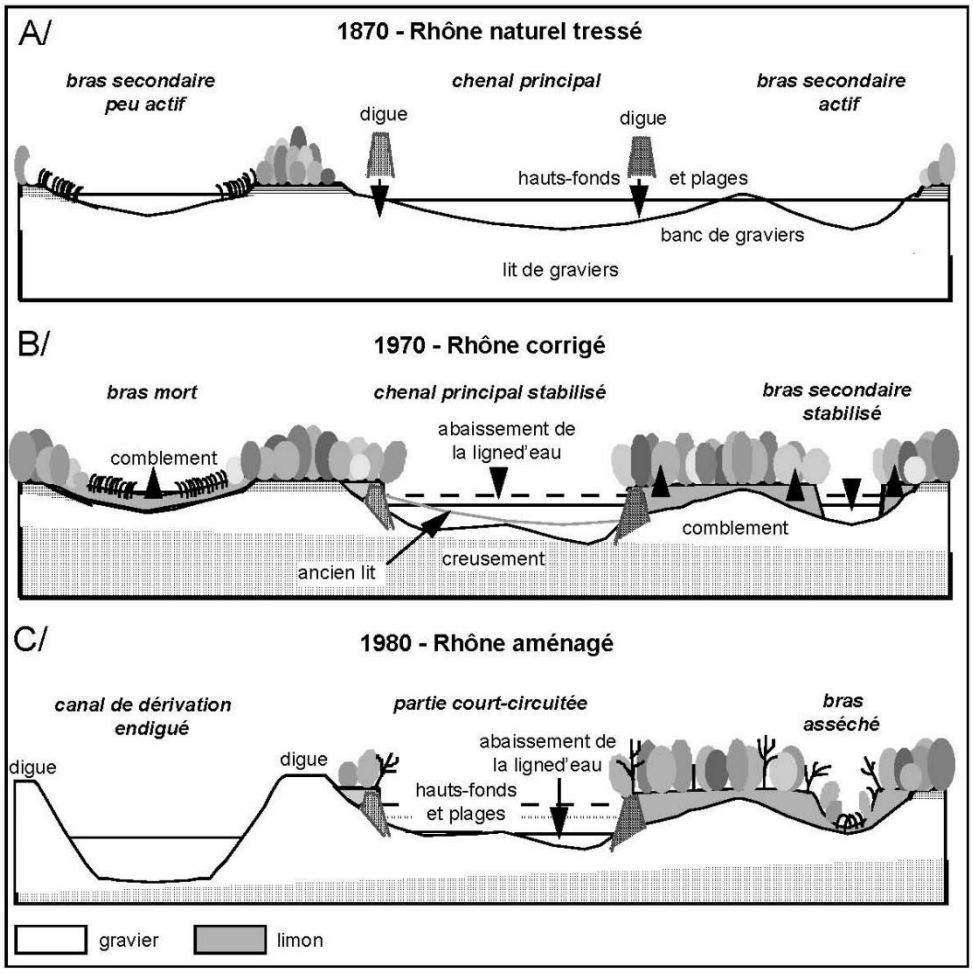


Figure 2-26 : Changement du profil transversal du Rhône à la suite des différents travaux de rectification de son cours depuis 1850. A – 1870 : profil avant les endiguements Girardon ; B – 1970 : profil un siècle après les premiers endiguements Girardon ; C – profil après l'aménagement CNR (Fruget, 2003, in Persat et al., 1995).

Le développement de la voie navigable à partir du milieu du 19ème siècle a été marqué par les constructions successives de digues longitudinales insubmersibles puis submersibles, d'épis et des casiers Girardon. Les eaux ont alors été concentrées dans un chenal unique aux berges stabilisées (Figure 2-26-B). Le lit mineur s'est incisé et les bras secondaires se sont comblés ou sont en cours de sédimentation. L'enfoncement du lit a provoqué l'abaissement de la ligne d'eau et par conséquent l'assèchement d'une partie des bras du fleuve et la transformation des îles et des berges couvertes de graviers et de végétation alluviale en forêts (Figure 2-26-B). D'après une étude du Service de la Navigation, les larges plaines alluviales bordant le Rhône avant les endiguements fonctionnaient comme de petits lacs, totalisant des surfaces inondées de 2470 km^2 entre l'exutoire du Lac Léman et la mer, dont 275 km^2 pour le Haut-Rhône et 1644 km^2 à l'aval de Vallabrègues (Fruget, 2003).

Enfin, entre les années 50 et les années 80, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), lance des grands travaux d'aménagement pour les besoins hydroélectriques, le développement de la navigation à grand gabarit et l'irrigation des terres agricoles. Le tracé du fleuve est bouleversé par la construction

de canaux dérivant l'eau de son cours naturel et entraînant l'abaissement de la ligne d'eau et des modifications dans le régime des crues (Figure 2C).

Au fur et à mesure, depuis ces deux derniers siècles, le Rhône a été déconnecté de sa plaine alluviale en cloisonnant l'écosystème (Figure 2-27 et Figure 2-28). La dynamique latérale, traduite par les processus d'érosion-dépôt, a quasiment disparu suite aux endiguements du 19ème siècle. L'enfoncement du lit et la dérivation du débit ont provoqué l'abaissement des nappes phréatiques et par conséquent l'apport en eau de la végétation alluviale. Les inondations ont diminué en fréquence et en durée par la dérivation des écoulements. Les barrages ont définitivement créé un système discontinu en compartimentant l'espace fluvial (Fruget et Michelot, 1997 ; Fruget, 2003). En définitive, c'est tout le fonctionnement écologique qui a été touché avec une nette réduction de la diversité de la faune, de la végétation riveraine et des espèces piscicoles par la modification de la ligne d'eau et des débits. Cette évolution a également favorisé le développement d'espèces invasives en lien avec les perturbations anthropiques (Michelot, 1989 ; Fruget et Dessaix, 2003 ; Gonzalez et al., 2010).

Enfin, c'est à l'aval que les impacts se font le plus ressentir, là où les facteurs locaux se conjuguent avec l'ensemble des pressions qui s'exercent dans tout le bassin-versant (Provansal et al., 2014) : la réduction de la largeur d'écoulement a modifié le régime hydrologique du Rhône provoquant des crues destructrices et la diminution des apports de l'amont est un des facteurs du recul du trait de côte du delta (Provansal et al., 2003 ; Sabatier et al., 2006).

En résumé, le Rhône a connu deux grandes phases d'aménagement permettant d'identifier trois grandes périodes de l'évolution du fleuve, qualifiées par Bethemont (1972) et Bravard (1987) de : fleuve naturel, fleuve corrigé et fleuve aménagé. La structure et la dynamique actuelles du Rhône résultent de la superposition de ces phases d'aménagement enregistrées durant les deux derniers siècles.

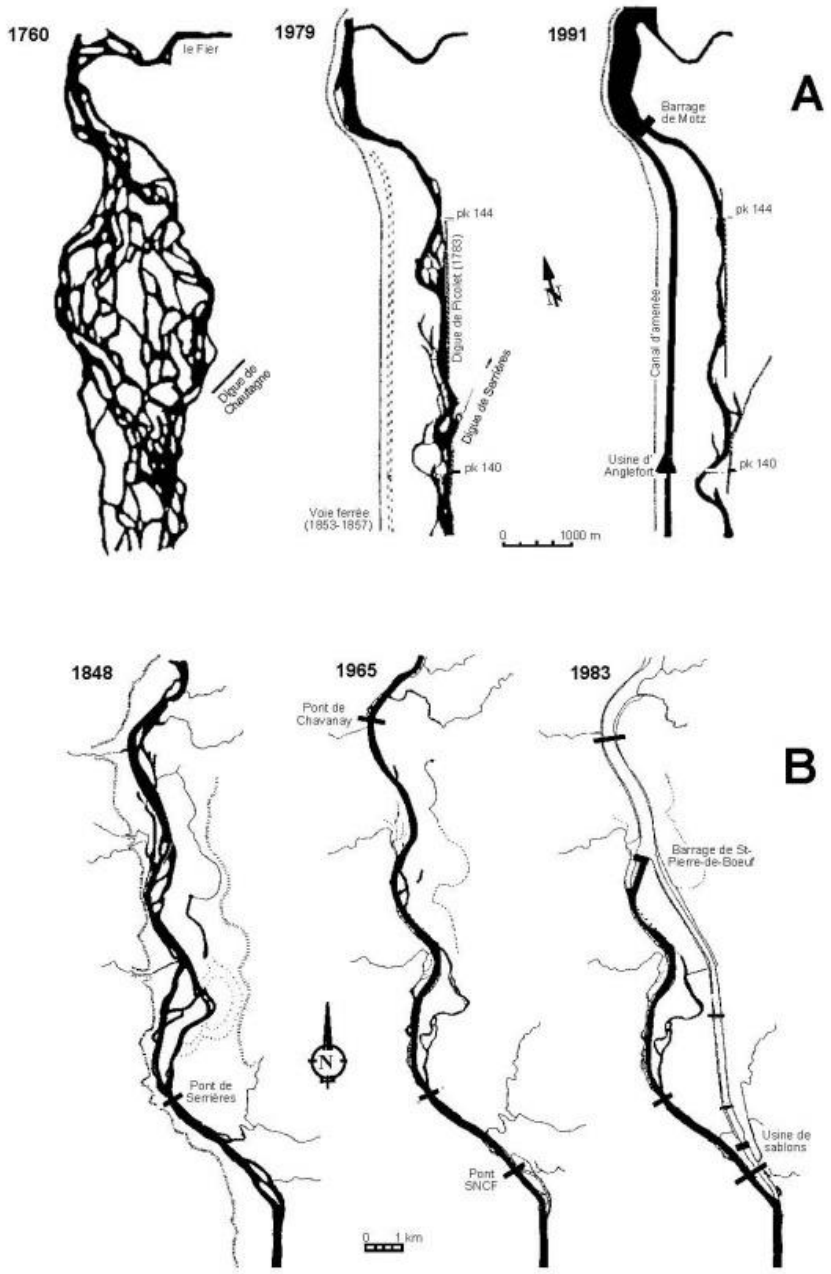


Figure 2-27 : Evolution morphologique des plaines alluviales de Chautagne sur le Haut-Rhône (A - D'après Klingeman et al., 1998) et de Péage-de-Roussillon sur le Rhône Moyen (B - D'après Fruget, 1989) avant les endiguements du 19ième siècle, après les endiguements du 19ième siècle et après les aménagements CNR. Tiré de Fruget (2003)

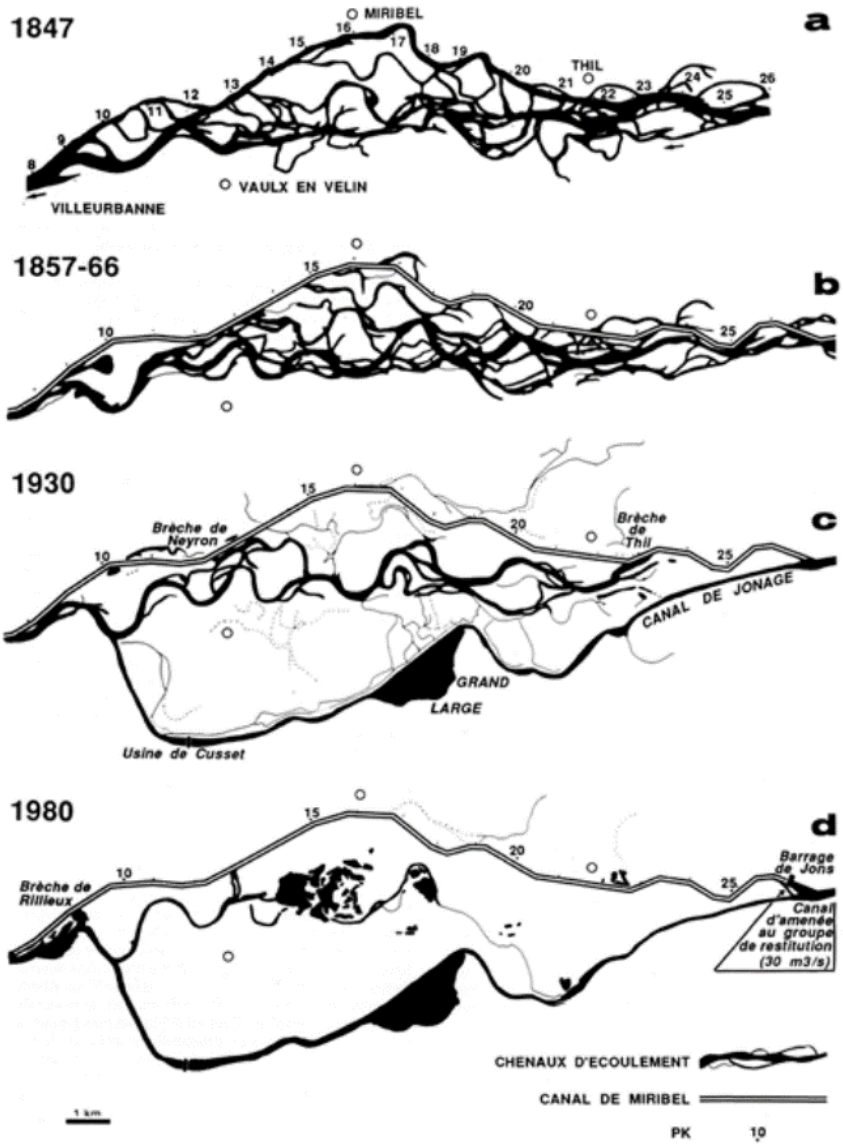


Figure 2-28 : Evolution morphologique de la plaine alluviale de Miribel-Jonage a) 1847, avant aménagement – b) 1857-66, après achèvement de l'endiguement – c) 1930, après la construction du canal de Jonage et un important assèchement de la plaine entre les deux canaux – d) 1980, l'état actuel. (Poinsart et al. 1989)

3e Chapitre : *Evolution verticale du lit du Rhône et dynamique des formes depuis le 19ème siècle*

1. L'évolution du profil en long : quelques éléments de diagnostic

1.1. Le profil en long et l'ajustement vertical

Dans le chapitre 1, nous avons vu que les cours d'eau s'ajustaient par l'intermédiaire des variables de réponse, notamment la largeur du lit, la pente ou plus communément le niveau altimétrique du lit. Ces deux dernières variables sont extraites du profil en long d'un cours d'eau qui représente graphiquement l'altitude du lit en fonction de la distance aval.

Etude de profils

Quand on évoque l'étude de la pente, il est nécessaire de distinguer les différentes façons de la mesurer. En se focalisant sur la pente moyenne (effectuée sur plusieurs kilomètres), nous cherchons à comprendre le contexte physiographique du continuum fluvial, pour une étude plus globale. Tandis qu'en étudiant la pente locale (notre cas tous les 500 m), nous cherchons à comprendre les changements locaux résultant par exemple des différents aménagements (casiers Girardon et barrages) ou résultant de l'agencement des mésohabitats ou faciès intra-fluviaux. Lorsque plusieurs profils en long ont été levés, il est possible d'étudier l'évolution altimétrique du lit entre ces levés topographiques et d'identifier des zones d'exhaussement et d'incision. Ceci peut se faire avec les lignes d'eau d'étiage ou avec le talweg. La ligne d'eau, mesurée généralement à l'étiage, permet de lisser la variabilité longitudinale des altitudes. Elle facilite le calcul de la pente d'un cours d'eau car le point altimétrique aval est toujours plus bas que le point immédiatement amont, contrairement au fond topographique qui présente une certaine rugosité matérialisant une alternance de pentes positives et négatives. La difficulté de l'analyse des lignes d'eau dans le temps est qu'elle n'est valable que si les mesures ont été réalisées pour des débits identiques. L'étude du fond du lit, correspondant au talweg, c'est-à-dire à la ligne des plus bas-fonds (ligne de plus grande pente qui rejoint les points les plus bas de la section en travers du cours d'eau), est plus adaptée à la caractérisation des faciès morphologiques puisque le talweg décrit l'irrégularité du lit où l'altitude ne décroît pas d'un point à l'autre. Le talweg reflète la dynamique hydrosédimentaire du cours d'eau du fait qu'il représente la zone de concentration maximale des vitesses (Richards, 1976 ; Couvert et al., 1999). Il correspond par conséquent aux points des sections qui s'ajustent le plus rapidement suite à une perturbation. Dans ce dernier cas, notamment lorsque les formes sont mobiles, il faut alors simplifier le profil en le lissant (par l'intermédiaire d'une moyenne mobile par exemple) afin de faciliter les comparaisons altimétriques inter-dates. L'analyse du talweg est pertinente car elle reflète la dynamique hydrosédimentaire du fleuve à court et long termes. Il nous a semblé plus pertinent d'étudier à la fois les variations verticales du lit et les faciès morphologiques. Le choix s'est donc porté sur une analyse de l'évolution du talweg. Nous nommerons le talweg par le terme générique de profil en long pour la suite de l'étude.

Ajustement du profil

L'ajustement du profil en long d'un cours d'eau trace une forme concave caractéristique (Figure 3-1) quand il est à l'équilibre, et ce sur plusieurs milliers d'années (Church, 1995). La forme du profil, nommé aussi profil d'équilibre, résulte d'un équilibre dynamique entre les processus d'érosion et de dépôt autour des conditions imposées par les variables de contrôle (Malavoi et Bravard, 2010). L'ajustement du profil peut être global, c'est-à-dire par rapport à un niveau de base situé à l'aval du

cours d'eau (niveau de la mer pour les fleuves ou confluence pour les affluents, lacs), ou local, au niveau des points de contrôle tels qu'un seuil ou une modification de la largeur de la vallée. Le profil en long s'ajuste en fonction des variations naturelles ou anthropiques de ce niveau de base. Si celui-ci s'incise, une rupture de pente (*knickpoint*) est observée entre le profil et le niveau de base entraînant l'incision plus ou moins rapidement vers l'amont afin de rattraper l'altitude du niveau de base. On parle alors d'érosion régressive du profil (Figure 3-2).

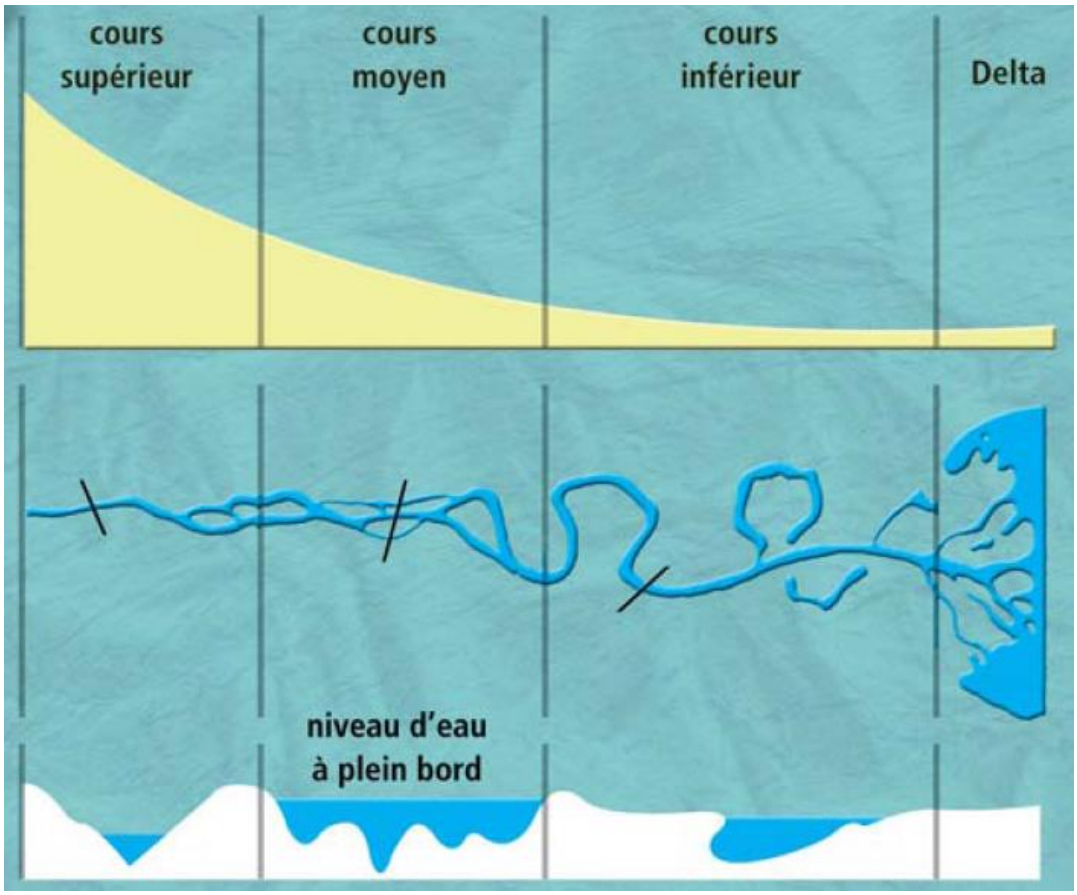


Figure 3-1 : Schéma théorique de l'évolution amont-aval d'un cours d'eau et des caractéristiques des trois grandes variables de réponse : pente, style fluvial, géométrie en travers (Malavoi et Bravard, 2010).

Les modifications importantes des apports liquides et solides peuvent aussi provoquer un ajustement global du profil en long. Une réduction importante des apports solides relativement aux apports liquides provoque un déficit de la charge par rapport à la capacité de transport et entraîne une incision sur l'ensemble du profil. Cette incision correspond à une érosion progressive majoritairement causée par le déficit sédimentaire rendant le cours d'eau plus compétent pour éroder le fond du chenal de l'amont vers l'aval (concept d'*hungry water* vu dans le chapitre 1) jusqu'à ce qu'elle recouvre une quantité suffisante de charge grossière ou qu'elle atteigne une pente plus faible, qui diminue la capacité de transport jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse avec les apports. Lorsque ce point est atteint, la partie aval du profil s'exhausse par accumulation des sédiments érodés sur la partie amont. Ce double ajustement entraîne alors le basculement du profil en long autour d'une zone seuil (dite de basculement) où les processus s'inversent (Figure 3-3, Malavoi et Bravard, 2010).

Les pressions humaines sont aussi à l'origine de modifications du profil en long, comme cela a été détaillé dans les chapitres précédents. Les travaux de chenalisation favorisent l'érosion progressive en amplifiant localement la capacité de transport du chenal, tandis que l'implantation de barrage (ou de

seuils artificiels) conduit conjointement à un exhaussement progressif à l'amont par stockage des matériaux et à une érosion progressive à l'aval de l'ouvrage, du fait du déficit du cours d'eau en charge sédimentaire (cf. chapitre 1). Les extractions dans le lit peuvent aussi provoquer une érosion à la fois régressive et progressive.

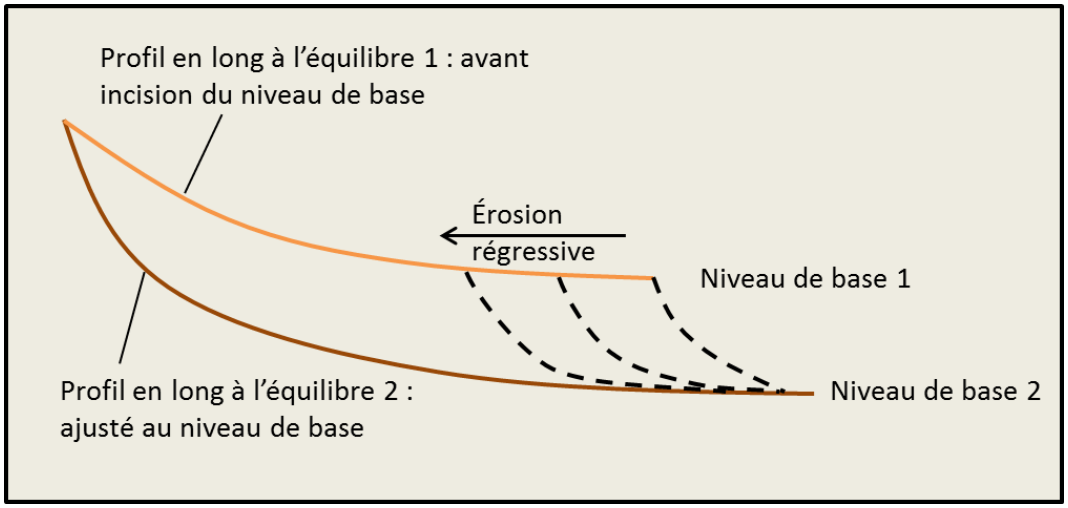


Figure 3-2 : Schéma de l'érosion régressive par rapport aux variations du niveau de base du cours d'eau (Parrot)

La pente constitue le principal facteur de contrôle de l'affinement granulométrique car elle diminue généralement vers l'aval et entraîne une décroissance de la compétence de la rivière à mettre en mouvement les sédiments (Rice, 1999 ; Gomez et al., 2001). La forme du profil d'une rivière peut être perturbée entre autres par l'activité tectonique, la variabilité lithologique, l'érosion intense liées aux crues, ou encore des apports sédimentaires importants causés par exemple par des avalanches, la déforestation, les éruptions volcaniques, l'arrivée d'affluents, etc. (Madej, 1999 ; Malavoi et Bravard, 2010).

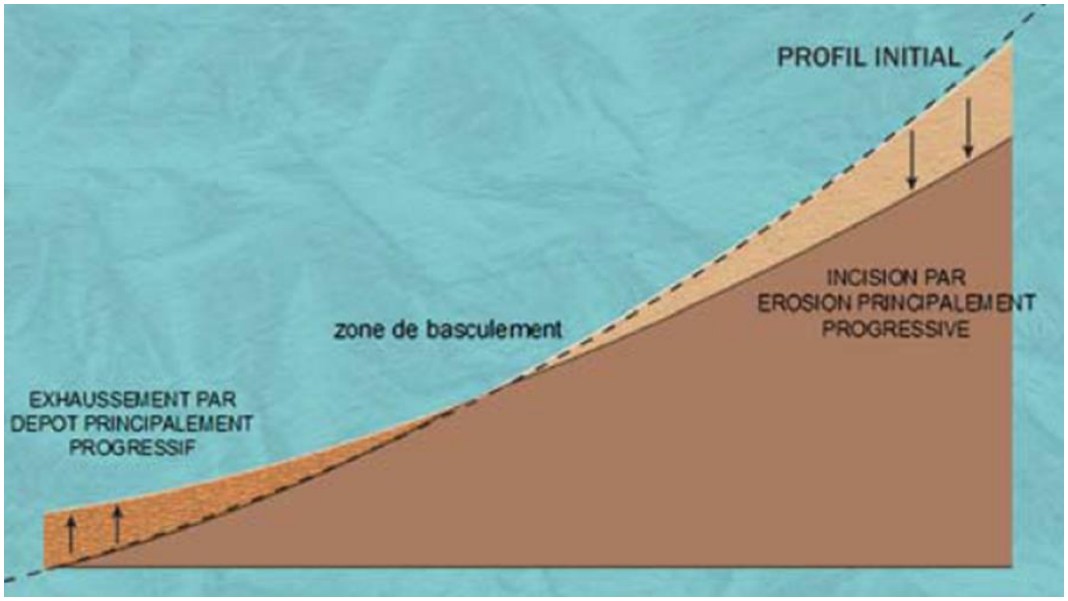


Figure 3-3 : Basculement du profil en long suite à une réduction drastique du débit solide (Malavoi et Bravard, 2010)

1.2. Les faciès morphologiques

Le chenal en eau peut se décomposer en plusieurs unités spatiales selon des critères hydrauliques et morphologiques. On parle alors de faciès morphologiques. Les faciès morphologiques constituent un sous-système d'une portion de cours d'eau ayant une topographie du fond, une pente de la surface en eau, une profondeur, une granulométrie et une vitesse caractéristiques.

En parcourant la littérature, on constate qu'il n'existe pas une typologie type (Malavoi et Souchon, 2002 ; Moir et Pasternack, 2008). En effet, selon les auteurs, les critères privilégiés pour l'identification des types de faciès diffèrent. Les tests conduits par Jowett (1993) montrent que la détermination des seuils et des mouilles est très complexe. De nombreuses études se sont heurtées au problème. Elles se basent sur des points spécifiques et descriptifs, sans pour autant arrêter de critères précis pour d'identifier les mésoformes, :

- la granulométrie du chenal (Leopold et al. 1964, Mosley 1982),
- la pente de la ligne d'eau (Yang 1971; Delacoste et al., 1995),
- les classes de hauteur d'eau et de vitesse (Allen 1951),
- la topographie du lit (Richards 1976),
- le nombre de Froude (Wolman 1955),
- les descriptions des caractéristiques de la surface en eau (Mosley 1982).

Dans tous les cas, il s'agit d'identifier des faciès d'écoulement compris comme des portions de cours d'eau, qui présentent, sur une certaine longueur, une homogénéité du point de vue de ces différents descripteurs (Malavoi, 1989). Les tailles de ces faciès peuvent être très différentes, et ce, quelle que soit la taille de la rivière. En effet, l'identification des seuils et des mouilles constitue une part importante de la caractérisation des lits fluviaux.

Montgomery et Buffington (1997) ont répertorié cinq types d'alternance de faciès alluviaux : les cascades, les plats-mouilles, les plats, les seuils-mouilles et les dunes-rides. Chacun des faciès constituant un type de chenal est répertorié et caractérisé dans le Tableau 3-1. La Figure 3-4 et la Figure 3-5 illustrent, respectivement en plan et en coupe longitudinale, les cinq alternances de faciès décrites par Montgomery et Buffington (1997). Grant et al. (1990) ont étudié, sur deux cours d'eau, les différentes unités du chenal et ont déduit les pentes moyennes du lit pour lesquelles ces faciès se formaient (Tableau 3-2). La formation des seuils et des mouilles s'effectue à de faibles pentes, contrairement aux cascades, aux rapides et aux plats lotiques qui sont des faciès de forte pente.

Les hydrobiologistes, utilisent les seuils et les mouilles comme des unités d'échantillonnage au sein même d'un cours d'eau (Allen 1951, Pridmore et Roper 1985, Jowett 1993) et pour décrire les habitats aquatiques des poissons (Baglinière et Champigneulle, 1982 ; Glova et Duncan, 1985 ; Jowett, 1993), appelés aussi mésohabitats (Kershner et al., 1992). Carbonneau et al. (2012) en font état en évoquant le concept de Riverscape. Ce concept représente une perspective écologique qui décrit les rivières comme une combinaison de tendances à grande échelle en énergie, en matière et en structure d'habitat. L'application de ce concept fluvial nécessite des informations sur la distribution spatiale des habitats à travers les systèmes fluviaux.

Les géomorphologues, considèrent les faciès, principalement les alternances seuils-mouilles, comme des unités fondamentales des cours d'eau (O'Neil et Abrahams, 1984 ; Newbury et Gaboury, 1993 ; Malavoi et Souchon, 2002). Ces faciès représentent des formes fluviales à des échelles différentes, traduisant l'instabilité inhérente des lits alluviaux. Ils reflètent à la fois la dissipation optimale de

l'énergie et, à long terme, les contraintes exercées par la géologie, la morphologie, la couverture végétale et le climat (Beschta et Platts, 1986). En effet, les géomorphologues définissent les faciès en lien avec la topographie car celle-ci retranscrit les conditions hydrauliques (Richards, 1976). Ils définissent alors ces faciès comme des ondulations dans la topographie du lit (O'Neill et Abrahams, 1984). Les seuils et les mouilles observés lors de faibles débits, révèlent une structure héritée des précédents évènements de crue. Pour des débits importants, les mouilles constituent des zones où les courants convergent et le lit s'incise, tandis que les seuils sont des zones où les courants divergent et la charge de fond se dépose (Keller et Melhorn, 1973 ; Jackson et Beschta, 1982 ; Frissell et al., 1986).

Les perturbations (crues importantes, gros apports sédimentaires) peuvent ainsi modifier la morphologie du lit d'un cours d'eau et aussi influencer les habitats aquatiques (Madej, 1999). L'étude du talweg peut être réalisée à la fois longitudinalement et temporellement. Les profils du fond du lit sont très sensibles au déplacement des formes fluviales (surcreusements dans les coudes, alternances seuil-mouille…) et enregistrent les conditions hydrauliques du cours d'eau (Richards, 1976), contrairement aux profils de ligne d'eau qui ne permettent pas d'appréhender les anomalies locales (Couvert et al., 1999). Dans notre cas, nous exploitons les profils en long du talweg pour identifier et caractériser les faciès, notamment après chaque phase d'aménagement.

Le talweg peut permettre de déterminer le nombre de faciès, leur taille, l'espacement entre les faciès et leur distribution sur le linéaire. Gostner et al. (2012) ont utilisé les données du talweg pour calculer un indice de diversité des habitats (talweg diversity ou TWD). Ils ont par ailleurs souligné que la pente du talweg, dans les cours d'eau naturels, variait de façon importante du fait de la présence des seuils et des mouilles, ce qui impliquait un fort TWD, tandis que dans le cas d'une section chenalisée, la pente du talweg restait plutôt uniforme.

	Dune ripple	Pool riffle	Plane bed	Step pool	Cascade	Bedrock	Colluvial
Typical bed material	Sand	Gravel	Gravel-cobble	Cobble-boulder	Boulder	Rock	Variable
Bedform pattern	Multilayered	Laterally oscillatory	Featureless	Vertically oscillatory	Random	Irregular	Variable
Dominant roughness elements	Sinuosity, bedforms (dunes, ripples, bars) grains, banks	Bedforms (bars, pools), grains, sinuosity, banks	Grains, banks	Bedforms (steps, pools), grains, banks	Grains, banks	Boundaries (bed and banks)	Grains
Dominant sediment sources	Fluvial, bank failure	Fluvial, bank failure	Fluvial, bank failure, debris flows	Fluvial, hillslope, debris flows	Fluvial, hillslope, debris flows	Fluvial, hillslope, debris flows	Hillslope, debris flows
Sediment storage elements	Overbank, bedforms	Overbank, bedforms	Overbank	Bedforms	Lee and stoss sides of flow obstructions	Pockets	Bed
Typical confinement	Unconfined	Unconfined	Variable	Confined	Confined	Confined	Confined
Typical pool spacing (channel widths)	5 to 7	5 to 7	None	1 to 4	<1	Variable	Unknown

Tableau 3-1 : Caractéristiques de chaque type de chenal (ensemble de faciès morphologiques). Montgomery et Buffington (1997).

Faciès morphologique	Mouille	Seuil	Rapide	Cascade	Plat
Pente moyenne (‰)	**0,005**	**0,011**	**0,029**	**0,055**	**0,173**

Tableau 3-2 : Pente moyenne du lit de chaque faciès morphologiques, déterminée par Grant et al. (1990) sur deux cours d'eau en Oregon

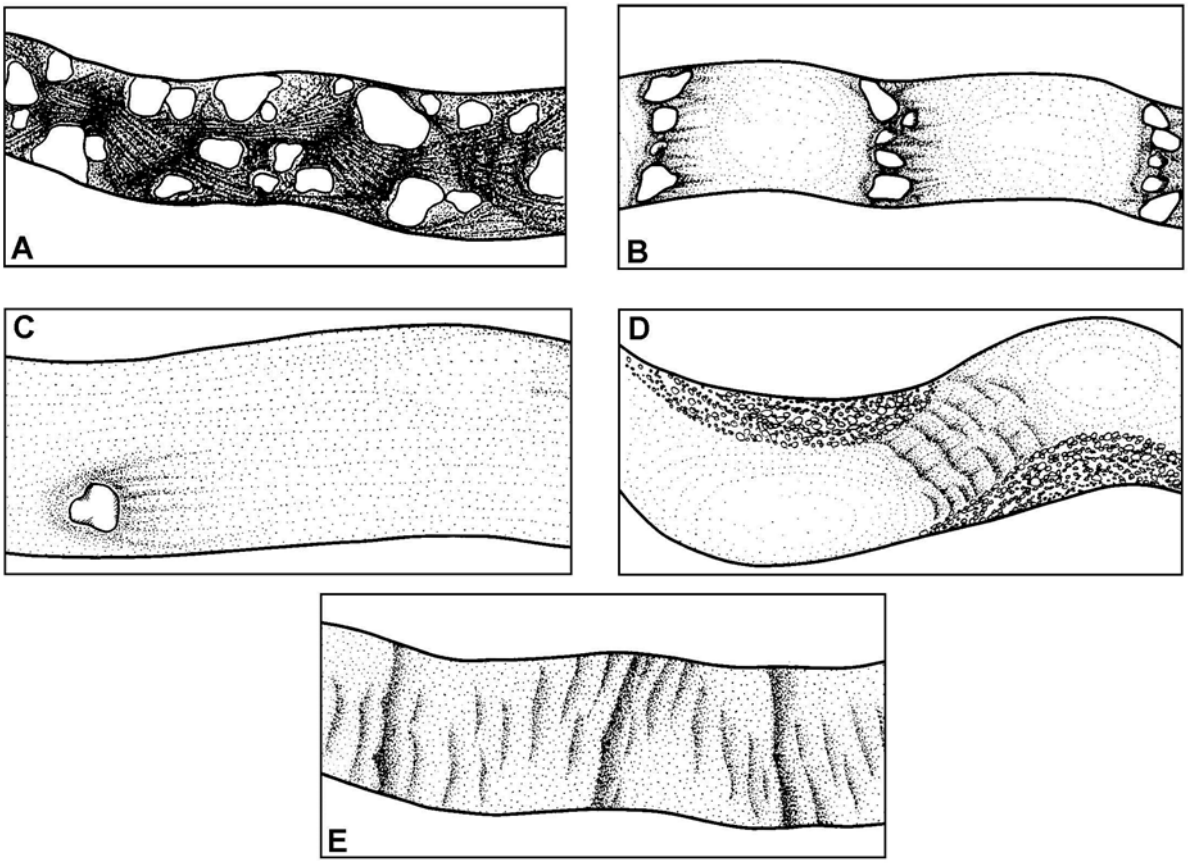


Figure 3-4 : Représentations schématiques en plan des alternances de faciès typiques de substrats alluvionnaires à faibles débits : (A) succession de cascades présentant des débits turbulents autour des blocs ; (B) alternance de plats-mouilles avec des zones turbulentes au niveau des plats, et plus calmes au niveau des mouilles ; (C) plat présentant un flux uniforme ; (D) alternance seuil-mouille avec des débits importants sur les seuils et faibles au niveau des mouilles ; (E) alternance dunes-rides formés en fonction de la direction du courant. Montgomery et Buffington (1997).

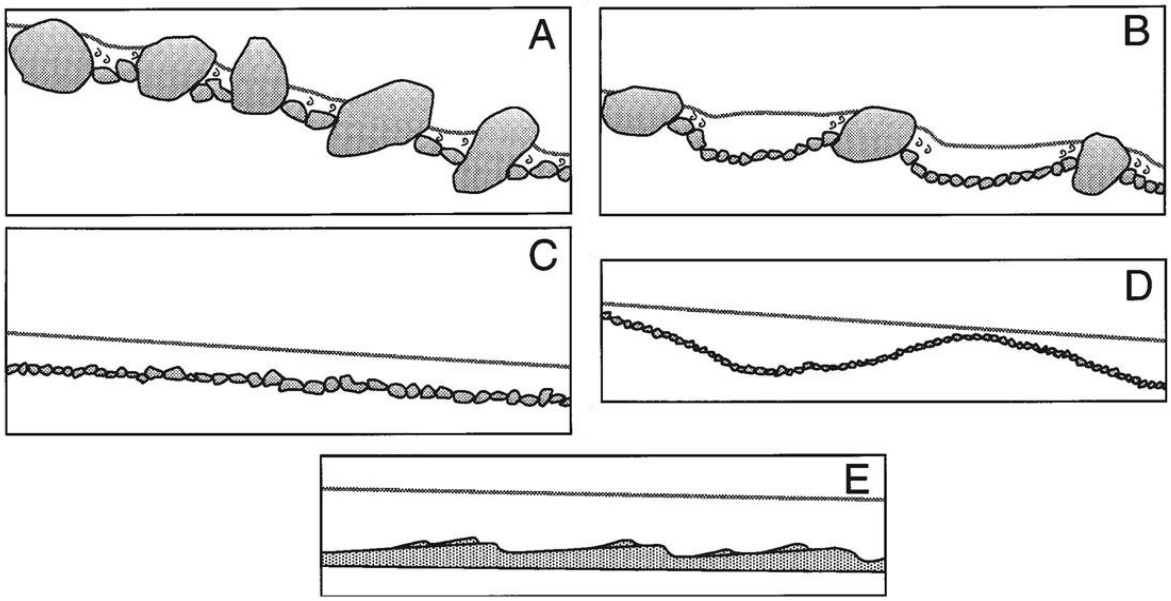


Figure 3-5 : Représentation schématique du profil longitudinal des cinq alternances de faciès type : (A) cascades ; (B) plats-mouilles ; (C) plat ; (D) seuils-mouilles ; (E) dunes-rides. Montgomery et Buffington (1997).

2. Analyse historique de l'évolution verticale du lit du Rhône

Les variations du profil en long du talweg entre chaque phase d'aménagement sont analysées afin de suivre l'évolution de la morphologie du lit. Cette analyse nécessite des données bathymétriques récentes (post-aménagements CNR) et anciennes (antérieurs aux aménagements CNR). L'étude est axée sur le continuum du Rhône avec d'une part les vieux Rhône (RCC) et d'autre part le Rhône total. Les canaux sont quant à eux exclus de l'analyse car ils constituent des voies artificielles.

2.1. Matériel et méthodes

2.1.1. Extraction de profils en long à partir des données numériques

Dans un premier temps, nous avons utilisé des données bathymétriques actuelles (entre 1999 et 2008) du chenal. Elles consistent en une succession de profils en travers, issus de la Base de Données Topographique du Rhône (BDT-Rhône) de l'IGN. Ces données ont été fournies par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) sur l'ensemble du Rhône, et par Voies Navigables de France (VNF) sur les secteurs non gérés par la CNR (entre Sault-Brénaz et l'amont de Lyon). A partir des données de la BDT, nous avons sélectionné un profil en travers tous les 500 m. Le profil en long a été extrait par sélection des points les plus bas, c'est-à-dire le talweg (Figure 3-6). Ce profil constitue l'état de référence actuel, que nous nommerons profil en long (ou talweg) actuel (ou récent). Par la suite, la CNR nous a fourni plusieurs jeux de données de profils en travers distants de 500 m, sur plusieurs années depuis les derniers aménagements. La Figure 3-7 a été obtenue grâce au recensement des données bathymétriques disponibles sur le logiciel BATHY de la CNR. Elle met en évidence les secteurs où la densité de point est la plus forte spatialement et temporellement, et ainsi de sélectionner de manière stratégique les zones où la donnée est disponible (1) en continu longitudinalement et à intervalle régulier au cours du temps, (2) à l'amont et à l'aval des aménagements et (3) avant la construction des barrages. Le tracé de chaque profil en long du Rhône a été vérifié par projection planimétrique. Les points situés dans les contre-canaux ou ne suivant pas une logique hydraulique (ex. : concentration du courant dans la convexité) ont alors été corrigés.

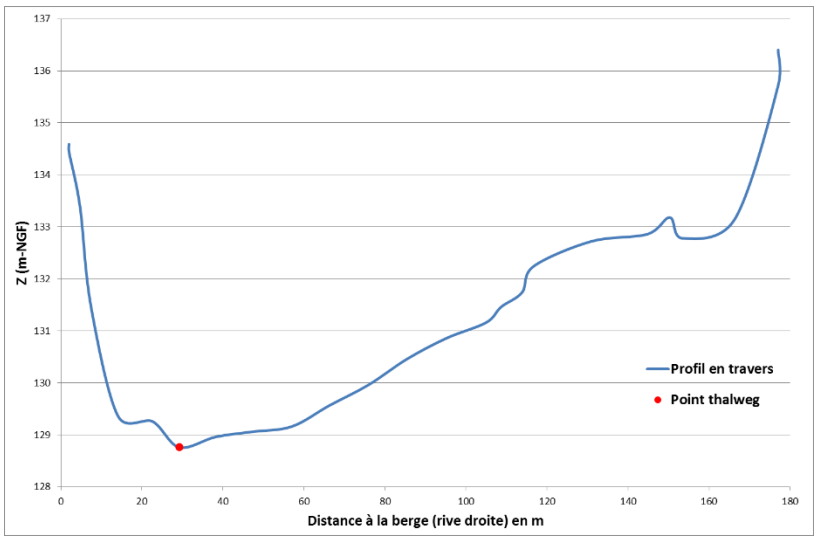


Figure 3-6 : Un exemple de profil en travers du chenal du Rhône à partir duquel le talweg a été extrait.

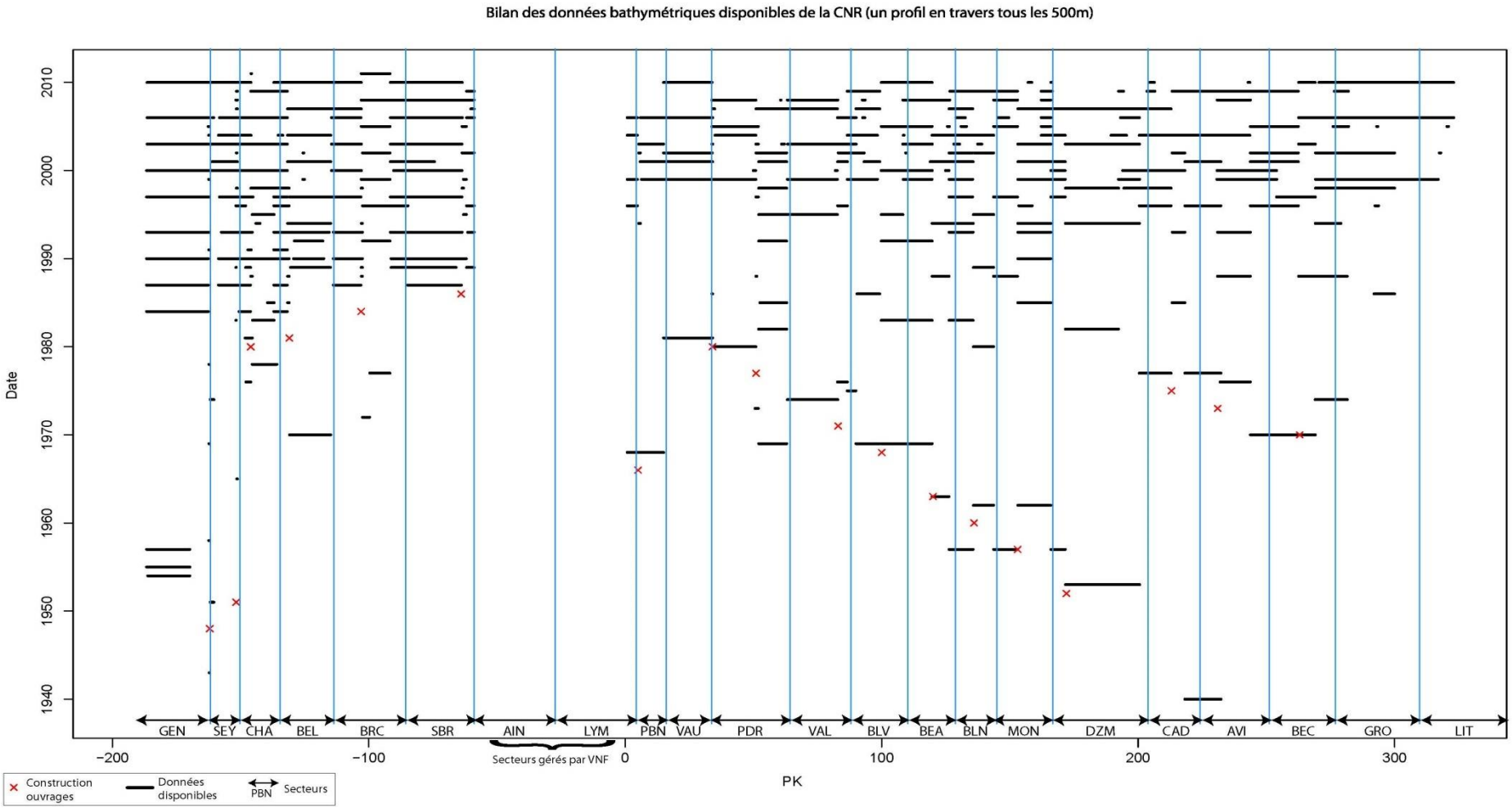


Figure 3-7 : Bilan des données bathymétriques disponibles à la CNR depuis les derniers aménagements (un profil en travers tous les 500 m)

2.1.2. Extraction du profil en long à partir de cartes historiques

Un total de 53 cartes de relevés bathymétriques scannées entre Lyon et la mer, antérieures à la construction des barrages et correspondant à la période de construction des ouvrages Girardon, a été récupéré auprès de G. Raccasi, en format image (JPEG) non géoréférencée (Figure 3-8). Ces cartes, proviennent de la Direction Régionale CNR d'Avignon. Celles entre Lyon et Montélimar datent de 1897, soit 30 cartes entre le PK 0 et le PK 181, et celles entre Montélimar et la mer de 1907-08, soit 23 cartes entre le PK 181 et le PK 323. Très peu de travaux d'aménagements de rectification du chenal ont été menés en amont de Lyon. Par ailleurs, nous ne possédons pas de cartes historiques du Haut Rhône, à savoir avant les aménagements CNR, pouvant nous servir de période de référence pour cette section du fleuve. Cette étude historique du Rhône est donc réalisée sur le tronçon entre Lyon et la mer.

Ce jeu de données a été géoréférencé par Ambert (2013) et Mathieu (2013), lors de leur stage de troisième année de licence, afin d'extraire les données bathymétriques du talweg antérieures aux aménagements hydroélectriques. Les BK (Bornes Kilométriques) figurant sur les cartes historiques (Figure 3-8), sont les ancêtres des actuels PK (Points Kilométriques) mis en place par la CNR. La présence des BK sur les berges du Rhône est antérieure à la construction des barrages. Ces bornes permettaient, comme les PK, de se repérer sur le chenal par rapport à la rive. Les modifications du tracé du chenal et les variations latérales de la morphologie du lit induites par les aménagements Girardon, ont entraîné un décalage des PK par rapport aux BK sur certains secteurs. Les bornes historiques (BK) n'ont pas été considérées comme des points d'amer pour le géoréférencement, puisqu'elles ne correspondent pas exactement à l'emplacement des PK sur la rive. D'après Raccasi (2008), la linéarisation du secteur entre Beaucaire et Arles aurait entraîné la diminution de la longueur moyenne des demi-PK (en 2006) de 14 m par rapport aux valeurs des demi-BK de 1876. Toutefois, après rectification de nos cartes historiques, il a été possible d'établir une correspondance longitudinale entre les valeurs des BK et des PK.

Les points du talweg des cartes historiques ont été extraits, par digitalisation, tous les 500 m aux BK correspondant aux PK des points du profil en long actuel (à ± 14 m). Ces points, référencés selon le système de nivellement altimétrique Bourdalouë, ont d'abord été convertis sous le système Lallement puis en IGN69. Ce profil en long représente l'état de référence le plus ancien du lit, correspondant à la période de construction des aménagements Girardon, soit 13 ans après le début de leurs implantations (1884), et 57 ans après les premiers travaux d'endiguements (années 1840). Ce profil en long représente l'état de référence du lit lors de la construction des aménagements Girardon.

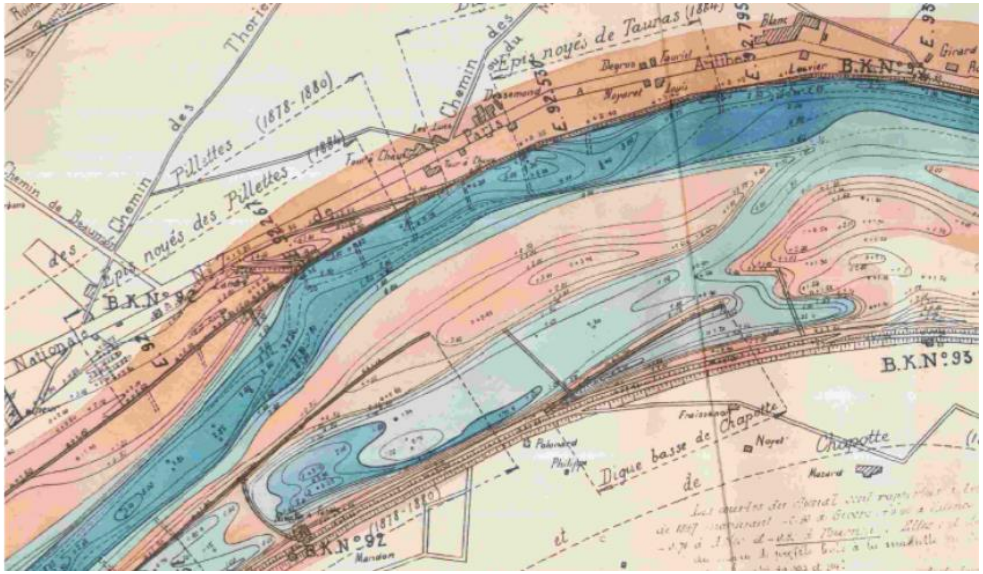


Figure 3-8 : Exemples de cartes bathymétriques du chenal datant de 1897, entre le BK 76 et BK 93.

2.1.3. Profils de synthèse pour étudier l'impact des aménagements en aval de Lyon

Cinq profils en long synthétiques (correspondant aux talwegs) ont été reconstitués à partir des données bathymétriques historiques et récentes entre Lyon et la Méditerranée, section du Rhône où les données sont les plus complètes. Le but de cette démarche est de mieux évaluer l'effet potentiel des pressions anthropiques et des caractéristiques naturelles sur l'altitude du fond du lit du Rhône (Figure 3-9) : la chenalisation, avec la construction des casiers Girardon, l'aménagement hydroélectrique, avec la construction de barrages et le court-circuitage du chenal, et enfin les épisodes de crues successives susceptibles de remanier le fond du lit. Comme les levés topographiques issus des données CNR ne couvrent pas la totalité du continuum aux différentes dates, nous avons décidé de reconstituer des profils synthétiques en combinant plusieurs levés réalisés à des dates proches. Ces profils synthétiques, rassemblés à l'aide des cartes bathymétriques historiques de 1897-1907/08 et des données numériques de la CNR, couvrent l'ensemble du continuum en aval de Lyon :

- Le **1er profil** (1897-1907/08) correspond au levé réalisé au moment de la construction des casiers Girardon (13 ans après leurs implantations et 57 ans après le début des endiguements). On considère que ce profil caractérise le lit en début d'ajustement aux ouvrages Girardon.
- Le **2ème profil** (1953-1999), établi séquentiellement avant chaque aménagement CNR, représente le lit résultant pour tout ou partie d'un ajustement aux aménagements Girardon.
- Le **3ème profil** (2007-2010) correspond au profil actuel (ou récent). Il résulte pour tout ou partie d'un ajustement aux aménagements CNR.
- Le **4ème profil** (1996-1999) correspond au profil antérieur aux évènements de crue de 2001, 2002 et 2003. Il constitue un état de référence permettant d'étudier la réponse du lit actuel à ces évènements relativement rares.
- Le **5ème profil** (2004-2006) correspond au profil postérieur aux grandes crues citées précédemment. Il résulte pour tout ou partie d'un ajustement à ces évènements.

Les deux derniers profils ont été établis pour évaluer la mobilité actuelle du chenal en lien avec des crues critiques ou significatives. En effet, trois crues potentiellement morphogènes se sont succédé durant cette phase, avec des périodes de retour de 10 à 100 ans pour les crues les plus fortes (Tableau 5-2). La crue de mars 2001, provoquée par la Saône et l'Ain suite à de fortes précipitations et à la fonte nivale induite par des températures très douces, s'est principalement fait ressentir entre Lyon et Donzère-Mondragon. La crue généralisée de 2002 a eu lieu suite à une forte pluviosité sur toute la façade Est de la France. La crue de 2003, considérée comme la plus grande crue historique enregistrée, s'est propagée de Valence à la mer, en réaction à de fortes précipitations d'une durée exceptionnelle (évènements cévenols) qui ont entraîné une crue de la plupart des affluents du Rhône.

Les dates retenues permettent d'établir des comparaisons sur plusieurs décennies et surtout d'essayer de déterminer le rôle potentiel de chacun des aménagements et la capacité récente du chenal à réagir à des événements rares. Afin de mettre en évidence les variations verticales entre deux phases de modifications, la comparaison des profils deux à deux (le plus récent moins le plus ancien) a été réalisée afin de caractériser quatre grandes périodes d'ajustements aux pressions humaines et naturelles (Figure 3-9) :

- La **période 0** correspond au différentiel altimétrique entre le 3ème profil et le 1er. Elle permet de faire un état des lieux des changements globaux de 1897 à nos jours, afin d'évaluer la conséquence globale des aménagements sur l'évolution du chenal depuis cette date.
- La **période 1** correspond au différentiel altimétrique entre le 2ème profil et le 1er. Elle permet une première évaluation des impacts potentiels de la phase de chenalisation sur le fond du lit.
- La **période 2** correspond au différentiel altimétrique entre le 3ème profil et le 2ème. Elle représente l'évolution du chenal depuis la mise en place des barrages.
- La **période 3** correspond au différentiel altimétrique entre le 5ème profil et le 4ème. Elle permet de rendre compte de la sensibilité et la réactivité actuelles du chenal suite à des épisodes morphogènes correspondant ici aux crues de 2001 à 2003.

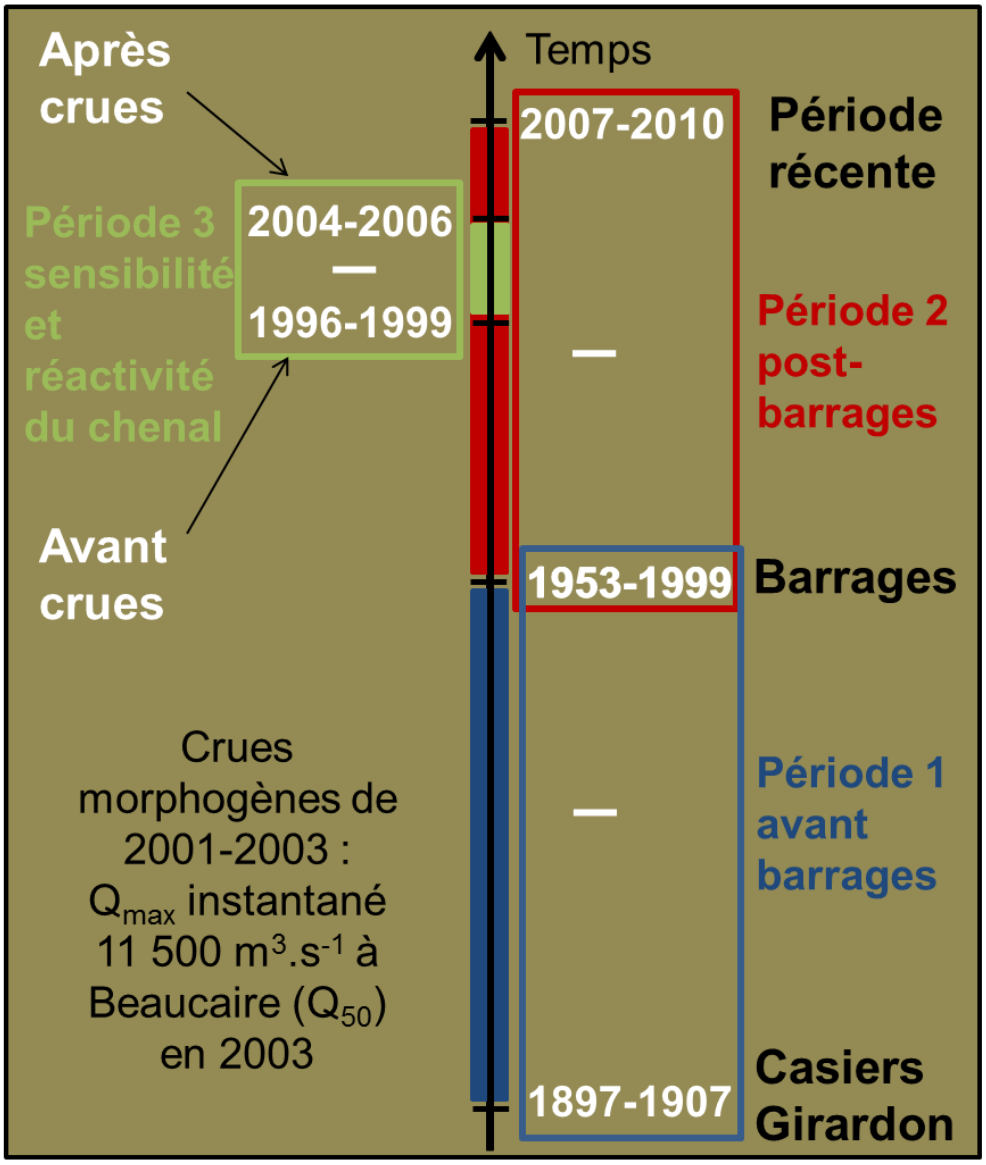


Figure 3-9 : Différentiel altimétrique réalisé entre les profils en long correspondant à chaque période d'étude (avant/après aménagements-crues morphogènes)

	Qmax instantané aux stations (m3/s)							
Crues	**Ternay**	***Retour***	**Valence**	***Retour***	**Viviers**	***Retour***	**Beaucaire**	***Retour***
2001	4780	*Q20*	6020	*Q10*	6270	*Q10*		
2002	4650	*Q20*	6600	*Q20*	7550	*Q50*	10200	*Q50*
2003			5500	*Q10*	7900	*Q50*	11500	*Q100*

Tableau 3-3 : Débit maximal instantané et période de retour pour les crues de 2001 à 2003 aux différentes stations hydrologique entre Lyon et la mer (Ternay au PK 15.2, Valence au PK 109.7, Viviers au PK 166.5, Beaucaire au PK 269.6)

2.1.4. Recensement des profils en long anciens et récents

Le Tableau 3-4 résume l'ensemble des données bathymétriques fournies et utilisées lors de cette étude. Ces données bathymétriques permettent d'étudier l'évolution altimétrique du profil en long. Disponibles entre chaque période d'aménagement, elles permettent de quantifier les impacts successifs de la construction des casiers Girardon puis des barrages.

Période	Dates disponibles	Localisation	Source
Construction casiers Girardon	1897	Lyon à Montélimar	Planches bathymétriques, archives CNR
Construction casiers Girardon	1907-1908	Montélimar à la mer	Planches bathymétriques, archives CNR
Mise en service des barrages et période récente	1951-2011	Amont de Génissiat à la mer	Données numériques, BD CNR, BD VNF et BDT Rhône

Tableau 3-4 : Bilan des jeux de données bathymétriques disponibles sur le Rhône

Nous disposons de très peu de données sur la partie amont du Rhône. Contrairement à la section aval de Lyon, il n'existe pas pour la section amont de cartes bathymétriques anciennes car les casiers Girardon n'ont été construits qu'en aval, l'amont de Lyon n'ayant pas été rendu navigable. Il n'existe donc pas d'état de référence du chenal avant la construction des barrages pour la Rhône amont. Les données numériques de la base de données de la CNR sont moins importantes dans le temps et dans l'espace en amont de Lyon. Nous n'avons donc pas pu encadrer des évènements de crue potentiellement morphogènes pour évaluer la réactivité actuelle du chenal. De plus, les données bathymétriques anciennes du secteur de Miribel-Jonage, en aval de la confluence de l'Ain (de Sault-Brénaz à l'amont de Lyon) et géré par VNF (Voies Navigables de France), n'ont pas pu nous être fournies. Néanmoins, ce secteur a fait l'objet de nombreuses études des variations verticales (Winghart et Chabert, 1965 ; Poinsart et al., 1989 ; Poinsart, 1994 ; Bravard et al., 1991 ; Malavoi, 2000 et 2008 ; ARTELIA, 2012).

C'est pourquoi, l'étude de l'évolution de la bathymétrie du lit du Rhône qui suit a été découpée en trois parties :

- une analyse des variations verticales du lit post-aménagements hydroélectriques du Léman à la mer i.e. à partir des données CNR disponibles entre 1951 et 2011,

- une étude de l'évolution des profils en long de Lyon à la mer entre 1897-1908 (cartes historiques) et 2010 (données CNR) comprenant une analyse des variations verticales entre les aménagements Girardon et les aménagements CNR, entre les aménagements CNR et la période actuelle, et enfin avant et après les grandes crues de 2001 à 2003,
- une synthèse bibliographique sur le secteur de Miribel-Jonage entre 1847 et 2011 à partir de données historiques et de données EDF.

2.2. Evolution verticale du lit entre 1951 et 2011 de Génissiat à la mer (données CNR)

Une première étude de l'évolution nette du profil en long (i.e. cumul du différentiel entre chaque profil) a été réalisée en chaque point et à chaque date où la mesure existait à partir des données fournies par la CNR, depuis le milieu du 20ème siècle, période de construction des barrages, à nos jours (données répertoriées dans la Figure 3-7). Le nombre d'années entre chaque levé varie entre 1 et 5 ans. Cette étude permet de mettre en relief les zones de stockage et de déstockage sédimentaires sur l'ensemble de la période depuis 1951, date à laquelle le premier levé a été réalisé suite à la construction du barrage de Génissiat, dans un premier temps pour le linéaire amont de Lyon et dans un second temps pour le linéaire aval de Lyon.

2.2.1. Etude du tronçon de Génissiat à Jons

L'Annexe 3 et l'Annexe 4 permettent d'établir une comparaison du talweg actuel à celui de la période de construction des barrages dans le Haut Rhône. Elles montrent que le profil en long n'a pas drastiquement changé après la construction des barrages sur les quelques sections pour lesquelles les données anciennes sont disponibles. Mais il n'est pas possible de mesurer les conséquences de leur construction du fait du manque de données sur de nombreux secteurs et surtout de l'absence d'un état de référence (avant la construction des barrages).

La Figure 3-10 montre la tendance globale des variations altimétriques nettes, correspondant à la somme des variations altimétriques entre toutes les dates disponibles de 1951 à 2011. A l'amont de la confluence de l'Ain, les zones semblent être majoritairement en exhaussement dans les retenues des barrages, avec une sédimentation plus importante à l'amont de Génissiat et Belley (barrage de Lavours). Quelques secteurs sont en incision à l'aval des barrages, de façon plus marquée à Génissiat, Chautagne (barrage de Motz) et Belley. Les variations entre le profil d'implantation des barrages et le profil actuel montrent une succession de zones en incision et en exhaussement. Ce sont les secteurs de Chautagne et Belley qui semblent montrer les variations altimétriques (incisions + exhaussements) les plus fortes, suivis de Brégnier-Cordon (Figure 3-10 et Annexe 3). Par ailleurs, le profil a très peu varié dans le secteur de Sault-Brénaz depuis la construction du barrage (Figure 3-10 et Annexe 4).

Les profils de la BD CNR entre 1951 et 2011 ont été projetés par secteur et par date afin de suivre année par année les changements induits par les barrages depuis leur mise en place (Figure 3-11 à Figure 3-14).

Génissiat

On observe un net exhaussement du profil en amont du barrage de Génissiat et quelques plus faibles variations au niveau de la retenue de Seyssel (Figure 3-11). L'aval immédiat du barrage de Génissiat

apparaît successivement incisé localement entre 1951 et 1974 suite à la construction de l'ouvrage, puis exhaussé en 2003. Deux incisions marquées ressortent aussi à l'amont de la retenue de Génissiat, respectivement au PK -186 et au PK -183.5. Ces incisions sont le résultat d'extractions. Le comblement des fosses est limité du fait d'une réduction des apports de l'Arve. Celle localisée au PK -183.5 enregistre un comblement plus significatif, qui pourrait s'expliquer par l'effet hydraulique de la retenue de Génissiat.

Seyssel

Les fosses observées dans la retenue de Seyssel juste en aval du barrage au PK -161 et au PK -157.5 (Figure 3-11 et Figure 3-12) pourraient résulter d'un déficit sédimentaire possiblement induit par le barrage de Génissiat. Ces deux fosses sont séparées par une zone stable, qui pourrait être composée de sédiments grossiers difficilement mobilisables, voire pavée, à l'instar de ce que révèle le prélèvement réalisé au PK -156. La fosse à l'aval du barrage pourrait, d'autre part, correspondre à un surcreusement du lit induit par la construction du barrage de Seyssel. Ces interprétations sont difficilement vérifiables puisque les données les plus anciennes datent respectivement de 1951 et de 1987, soit après la construction des barrages, et les prélèvements dans le chenal sont finalement peu nombreux (deux).

Chautagne

La retenue de Chautagne (Figure 3-12), à l'aval du Fier, montre un très léger exhaussement depuis 1988 qui pourrait résulter des apports du Fier puisque les sédiments prélevés dans cette partie sont majoritairement des fines. Il n'existe que peu de données à l'amont du Fier pour pouvoir conclure (1996 et 2001). Dans le vieux Rhône de Chautagne, les formes du fond du lit présentes dans les années 80 étaient beaucoup plus marquées et se sont atténuées à partir des années 90, avec notamment de fortes incisions, parfois jusqu'à près de 5 m, et des exhaussements ou comblements de fosses pouvant aller jusqu'à 7 m. Ce processus de lissage du lit s'est accompagné de nombreuses fluctuations au cours des années, avec des alternances d'incisions et d'exhaussements entre chaque profil.

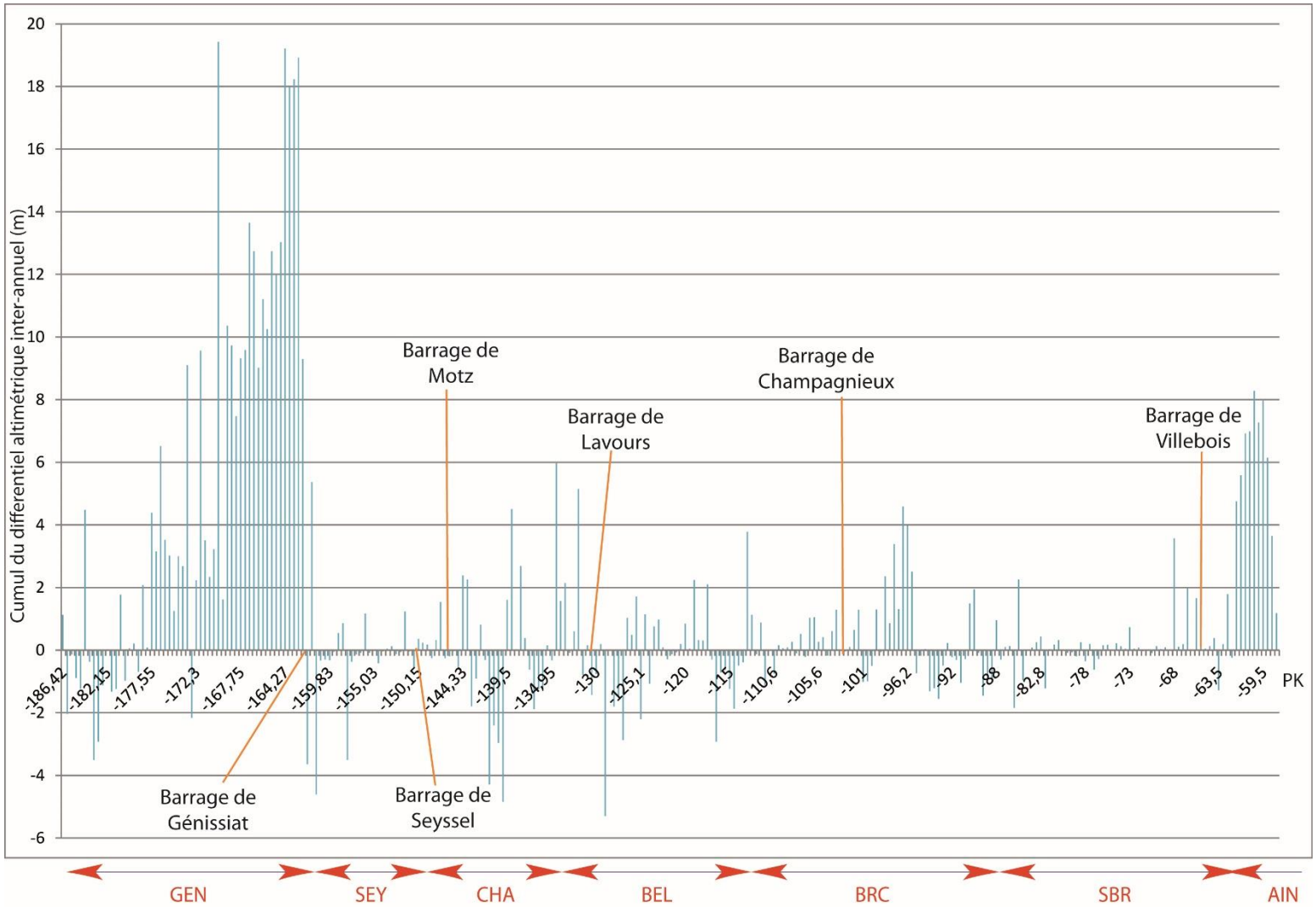


Figure 3-10 : Cumul du différentiel altimétrique interannuel en chaque point du profil en long représenté par les PK (évolution nette des altitudes Z au cours du temps), depuis les implantations des barrages (à partir de 1951) à nos jours (2011) (=somme des variations altimétriques entre toutes les dates disponibles). Zone en amont de Lyon, représentation des secteurs de Génissiat (GEN), Seyssel (SEY), Chautagne (CHA), Belley (BEL), Brégnier-Cordon (BRC), Sault-Brénaz (SBR) et l'Ain (AIN).

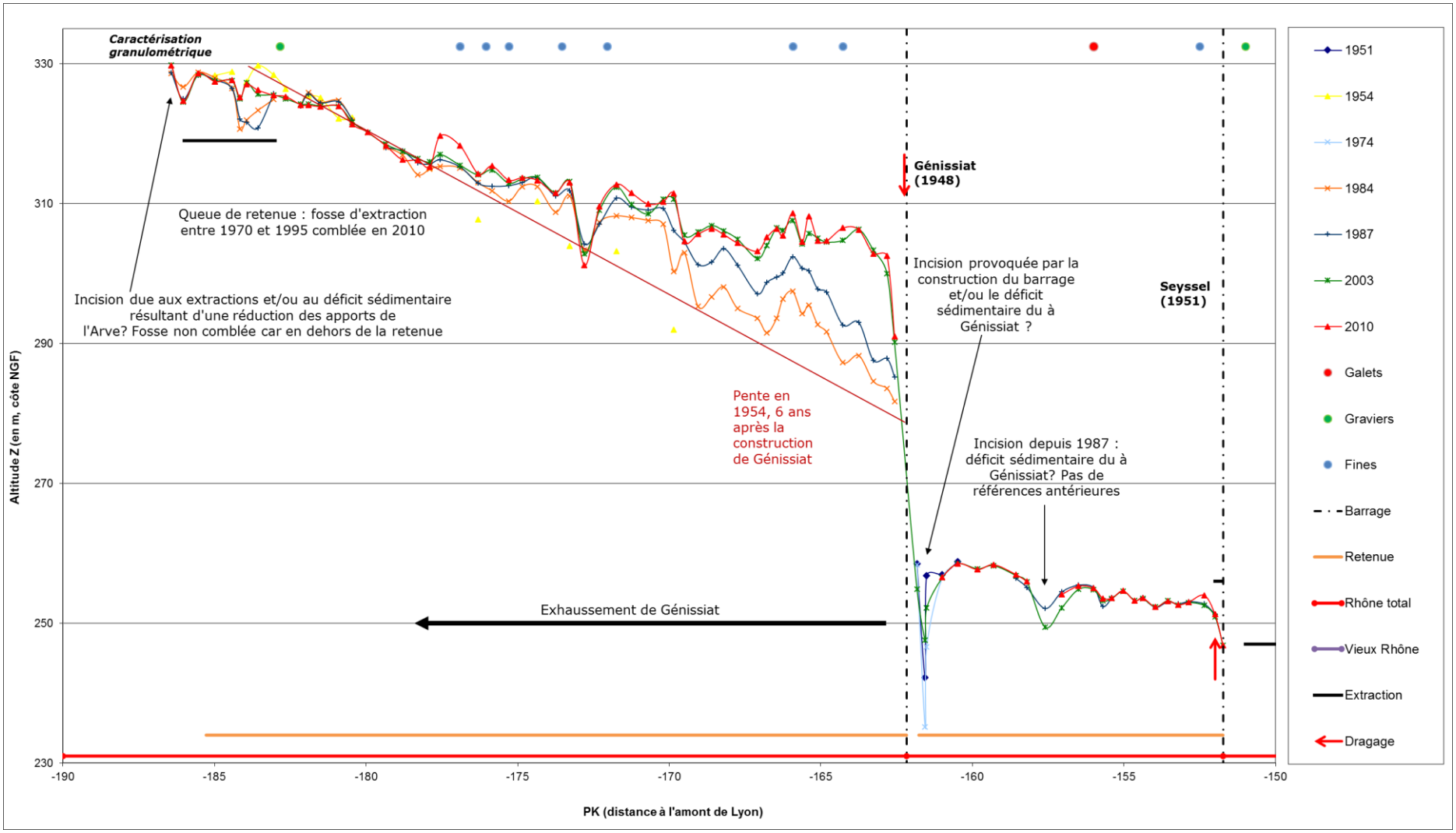


Figure 3-11 : Profils en long depuis la construction des barrages dans les secteurs de Génissiat et Seyssel (extraits BD BATHY CNR)

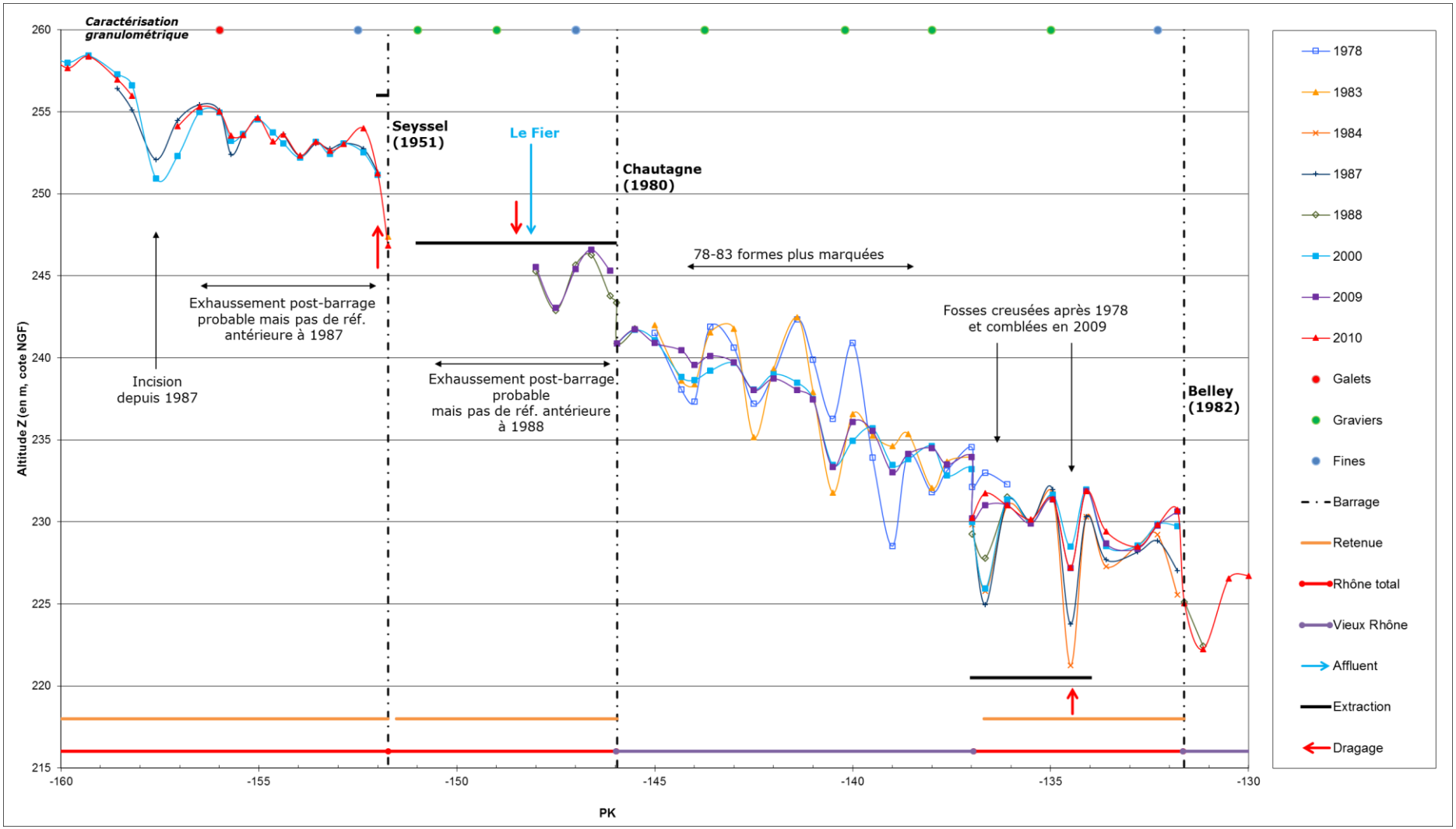


Figure 3-12 : Profils en long depuis la construction des barrages dans les secteurs de Seyssel, Chautagne et Belley (extraits BD BATHY CNR)

Belley

Les fosses laissées par les extractions des années 80 dans la retenue de Belley se sont peu à peu comblées et le profil a connu un exhaussement continu à l'amont du barrage (Figure 3-12). Les sédiments prélevés sont ici des fines. De nombreuses variations topographiques du lit du vieux Rhône apparaissent à l'aval du barrage de Belley (Figure 3-13). Le vieux Rhône de Belley est découpé en trois zones ayant subi de nombreuses fluctuations longitudinales entre 1970 et 1989 : une phase d'incision pouvant aller jusqu'à 4 m entre le PK -130.5 et -127, une phase d'exhaussement pouvant atteindre près de 2 m entre le PK -127 et -117, et une phase d'incision pouvant aller jusqu'à 3 m entre le PK -117 et -114.5. Des années 90 à nos jours, une alternance d'incisions et d'exhaussements du lit s'est développée sur l'ensemble du vieux Rhône sans pour autant réussir à combler les fosses creusées dans le lit.

Brégnier-Cordon

Le Rhône total de Brégnier-Cordon s'est exhaussé depuis 1987, notamment à l'amont du barrage et de la retenue (Figure 3-13). Dans le vieux Rhône de Brégnier (Figure 3-14), les formes du fond du lit ont été globalement lissées jusqu'à l'amont de la retenue de Sault-Brénaz. Des exhaussements et une forte mobilité verticale du profil en long (de plus d'1 m entre chaque profil) sont observés à l'aval du Guiers laissant supposer qu'une charge sédimentaire serait encore amenée par cet affluent.

Sault-Brénaz

Le profil n'a presque pas été modifié dans le reste de la retenue de Sault-Brénaz (Figure 3-14). Le profil en long du vieux Rhône alterne entre un exhaussement de 1,5 m à l'aval du barrage entre 1990 et 2008, et une incision de 3 m entre 1989 et 2008.

Le Haut Rhône a connu jusqu'en 2011 des modifications de profil suite aux implantations des barrages. Le comblement ou non des fosses et les modifications des formes fluviales montrent que le transport sédimentaire est encore actif dans cette partie du Rhône. Le stockage à l'amont des barrages et l'incision à leur aval montrent que les barrages modifient la dynamique sédimentaire.

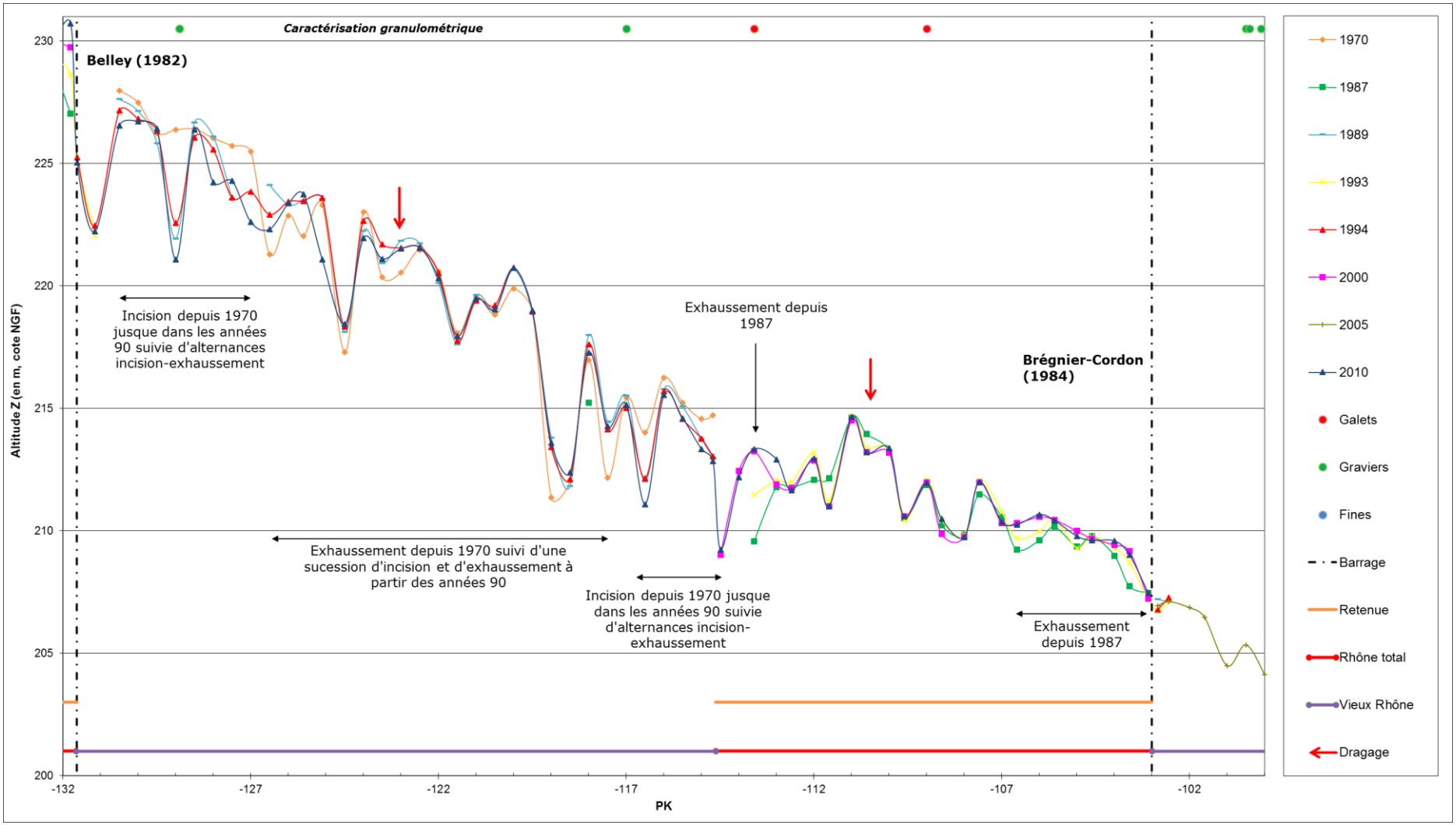


Figure 3-13 : Profils en long depuis la construction des barrages dans les secteurs de Belley et Brégnier-Cordon (extraits BD BATHY CNR)

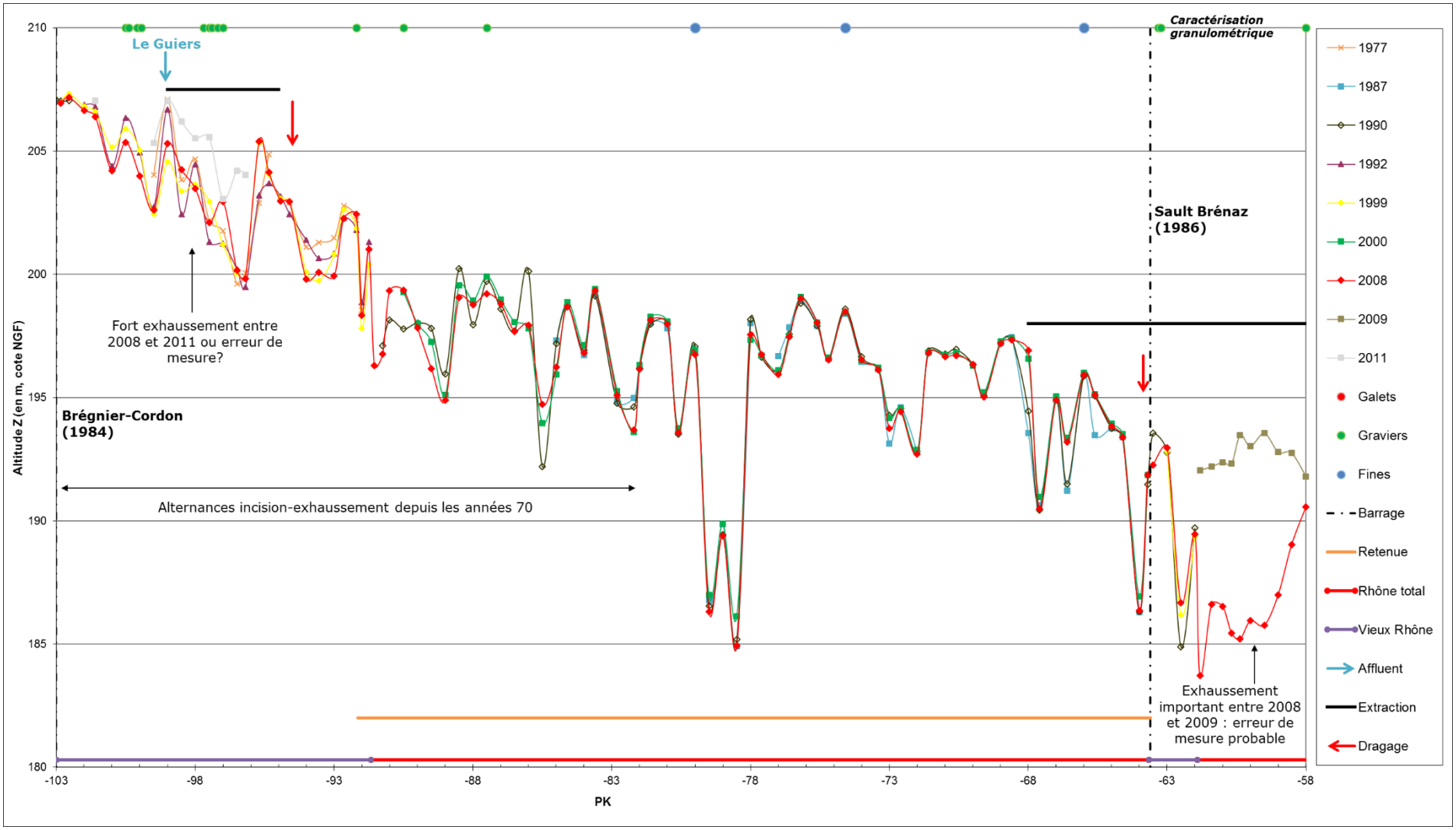


Figure 3-14 : Profils en long depuis la construction des barrages dans les secteurs de Brégnier-Cordon et Sault-Brénaz (extraits BD BATHY CNR)

2.2.2. Etude du tronçon de Lyon à la mer

Quant à la section à l'aval de Lyon (Figure 3-15), elle se caractérise par une incision dominante, principalement à l'aval des barrages mais aussi à l'aval des vieux Rhône de Péage de Roussillon et Donzère-Mondragon (proches restitutions). Néanmoins, ce linéaire présente aussi des zones en exhaussement, principalement à l'amont des ouvrages.

Le rôle des barrages dans les variations altimétriques du profil en long du Rhône en aval de Lyon n'est pas identique sur l'ensemble de ce linéaire. La tendance générale depuis 1951 montrant un exhaussement du lit en amont des barrages et une incision à l'aval n'est pas vérifiée sur l'ensemble du linéaire. Mais elle est observée avec des impacts parfois très localisés dans les secteurs du Rhône médian et aval, à l'exception du secteur d'Avignon, qui voit la retenue du barrage de Sauveterre s'inciser (Figure 3-15). Cette incision est à mettre en lien avec les extractions réalisées à l'amont du barrage d'Avignon. L'hypothèse de départ que le profil en long établit un rééquilibrage entre chaque barrage paraît pertinente sur ces secteurs.

Cette hypothèse est confirmée par l'étude de Troussier (2012), sur l'évolution du profil en long entre la confluence de la Drôme et celle de l'Ardèche depuis 1957 (Figure 3-16). Au niveau des barrages de Baix-le Logis Neuf (barrage du Pouzin), de Montélimar (Rochemaure) et de Donzère-Mondragon (Donzère), les retenues montrent une accumulation des matériaux tandis que l'aval des ouvrages est incisé. L'exhaussement a été le plus important à l'amont du barrage de Donzère-Mondragon puis du barrage de Montélimar. Les taux d'érosion ne semblent pas se démarquer à l'aval des ouvrages. Les apports de la Drôme (PK 131,5), ainsi que ceux de l'Isère (PK 102) et de l'Eyrieux (PK 126) plus à l'amont, sont difficiles à identifier sur ces bilans de variation altimétrique. La Drôme aurait la capacité d'alimenter le Rhône en gravier ; l'Eyrieux apporterait de faibles quantités de graviers et fines et l'Isère des matières en suspension (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5). Les différences de stockage dans les retenues peuvent donc s'expliquer par l'impact des crues, qui font transiter la charge vers l'aval. Elles pourraient aussi s'expliquer par les extractions de graviers et les dragages d'entretien du fleuve, qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

A l'aval de Beaucaire (PK 255), on constate un exhaussement dans la retenue en amont du barrage de Vallabrègues pouvant correspondre au stockage des fines provenant de la Durance (Figure 3-15). A l'aval du barrage, le profil montre une incision jusqu'à la mer, excepté au niveau de la diffluence entre le Petit Rhône et le Grand Rhône, i.e. le début du delta, où le profil s'exhausse.

Les variations altimétriques du profil en long seront développées plus en détail dans le paragraphe suivant. Cela permet de mieux appréhender les conséquences respectives de la période de chenalisation, de la période d'implantation hydroélectrique et d'un épisode de fortes crues.

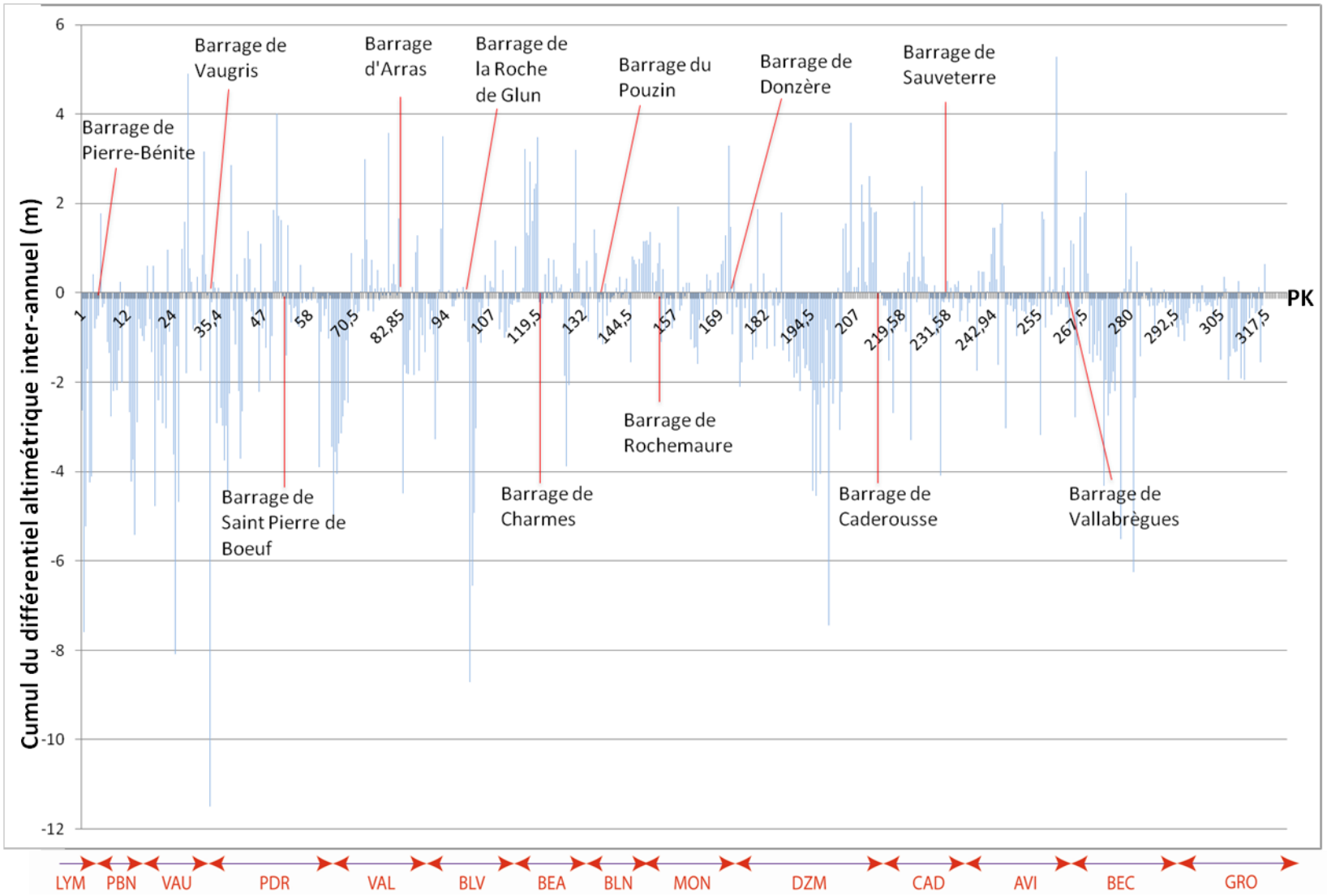


Figure 3-15 : Evolution nette des altitudes Z en chaque point du profil en long (représenté par les PK) au cours du temps, depuis les implantations des barrages (à partir de 1951) à nos jours (2011) (=somme des variations altimétriques entre toutes les dates disponibles). Zone en aval de Lyon, représentation des secteurs de Lyon-Miribel (LYM), Pierre-Bénite (PBN), Vaugris (VAU), Péage de Roussillon (PDR), Saint-Vallier (VAL), Bourg-lès-Valence (BLV), Beauchastel (BEA), Baix-le-Logis Neuf (BLN), Montélimar (MON), Donzère-Mondragon (DZM), Caderousse (CAD), Avignon (AVI), Beaucaire (BEC) et Grand Rhône (GRO)

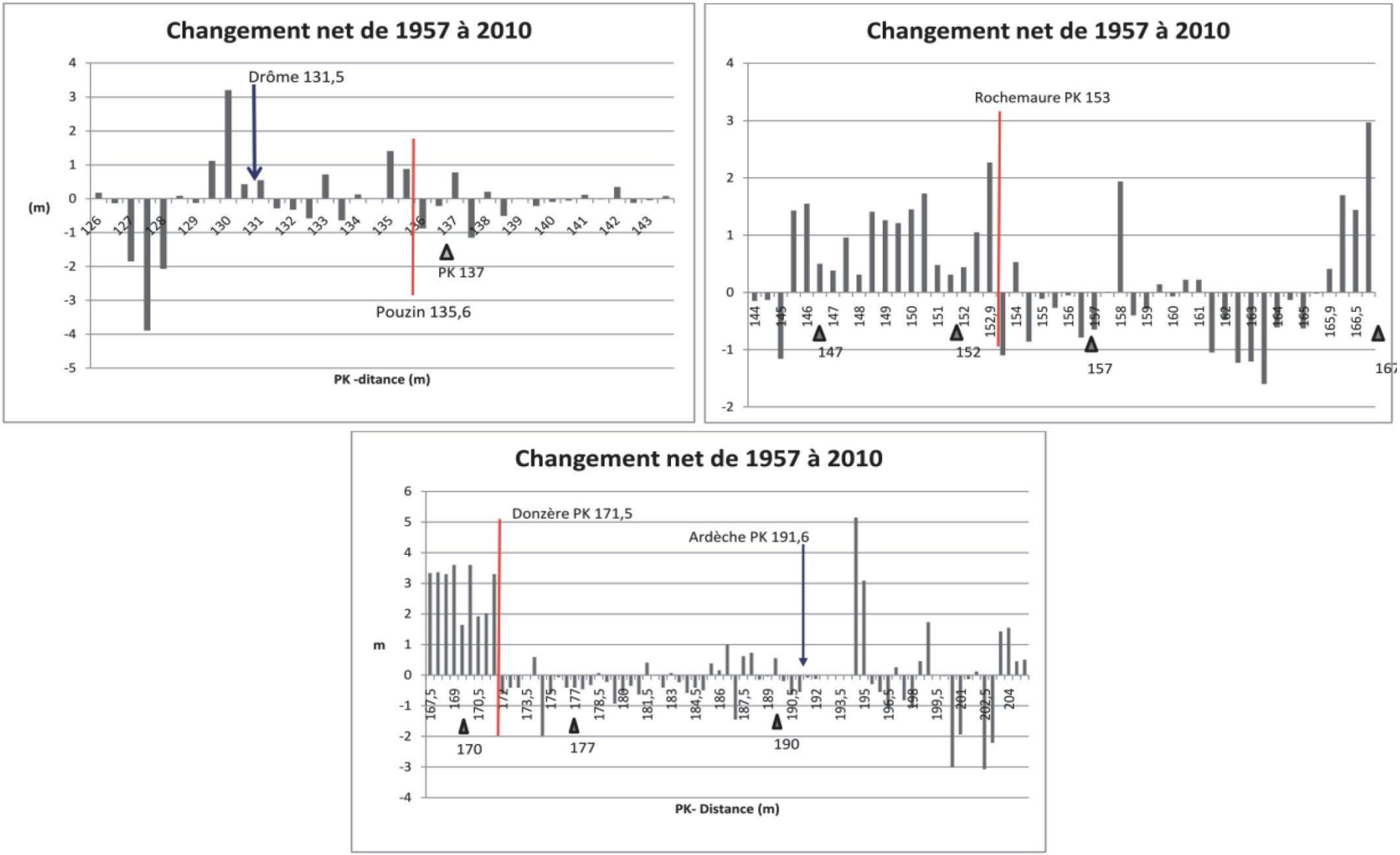


Figure 3-16 : Evolution nette des profils en long de 1957 à 2010 à l'aval de Lyon entre les PK 126 et 204, entre la Drôme et l'Ardèche. Les variations sont étudiées au niveau des barrages du Pouzin (Baix-le Logis Neuf), de Rochemaure (Montélimar) et de Donzère (Donzère-Mondragon). Les affleurements rocheux sont symbolisés par un triangle. Réalisé par Troussier (2012).

2.3. Evolution altimétrique du lit par période entre 1897/1907-08 et 2010, de Lyon à la mer

Cette étude vise à mesurer l'effet morphologique des phases d'aménagement et des épisodes de crues successives à partir des cinq profils en long synthétiques établis dans le paragraphe 2.1.3 (p. 113).

Dans un premier temps, les profils en long correspondant à la chenalisation, à la construction des barrages et à la période récente ont été représentés sur trois agrandissements, entre les PK 0 et 100 (Annexe 5), entre les PK 100 et 190 (Annexe 6) et entre les PK 190 et 320 (Annexe 7), afin d'évaluer l'évolution altimétrique du profil en long suite aux aménagements. Les deux profils correspondant aux périodes avant et après les grandes crues de 2001 à 2003 ont aussi été tracés et comparés afin d'évaluer la sensibilité et la réactivité du fleuve aujourd'hui aux crues de grandes ampleurs. Ces observations des modifications locales du profil en long ont été menées sur les agrandissements entre les PK 0 et 100 (Annexe 8), les PK 100 et 190 (Annexe 9) et les PK 190 et 320 (Annexe 10).

Dans un second temps, les variations altimétriques entre chaque profil en long (différentiel altimétrique entre les profils) ont été extraites et analysées afin de quantifier l'ensemble des changements faisant suite aux évènements subis par le Rhône à la Période 0 (Figure 3-17, p.128), à la Période 1 (Figure 3-21, p.132), à la Période 2 (Figure 3-23, p.138) et à la Période 3 (Figure 3-25, p.142). Puis, afin de lisser le signal de ces variations verticales, leur moyenne mobile d'ordre 10 a été tracée pour chaque période ainsi que leur tendance selon une loi polynomiale d'ordre 6 (Figure 3-18, p.129). Ainsi, lorsque les points sont situés au-dessus de 0, la tendance est à l'exhaussement, en-dessous de 0, la tendance est à l'incision. Le niveau 0 représente l'absence d'évolution verticale. La Figure 3-19 (p.130) montre ces mêmes variations mais rapportées à des vitesses puisque ces périodes n'ont pas la même durée. Cette figure permet ainsi de comparer les variations altimétriques des trois périodes entre elles et de rendre compte des tendances globales.

La lecture directe des différentiels altimétriques est adaptée à une analyse locale (multitude de variations par point successivement supérieur et inférieur à 0) mais reste complexe lorsqu'on veut observer les grandes tendances. Afin de faire apparaître les grandes ruptures, nous utilisons la méthode du cumul du différentiel qui permet une meilleure visualisation des tronçons homogènes. Les différentiels altimétriques calculés par période ont été cumulés pour chacune d'entre elles afin de faciliter la visualisation des variations longitudinales à l'incision (pente descendante), à l'exhaussement (pente ascendante) ou à la stabilité du lit (plateau). Ainsi, lorsque les points sont situés au-dessus de 0, la tendance est à l'exhaussement, en-dessous de 0, la tendance est à l'incision. Le niveau 0 représente l'absence d'évolution verticale.

Le profil en long de la période récente a aussi été tracé sur la Figure 3-20 (p.131) dans le but de mettre en évidence la différence entre les valeurs d'un profil cumulé et les altitudes d'un profil normal. Les valeurs du profil cumulé ne correspondent pas à des valeurs d'incision (ici de -1050 m au total) mais permettent de représenter les ruptures en distinguant les simples fluctuations des grandes variations. La Figure 3-22 regroupe le cumul des différentiels de (1) la période 1, plus ou moins après la construction des casiers Girardon, représentée en bleue, (2) la période 2, après la construction des barrages, représentée en rouge pour les valeurs non corrigées des extractions et en orange après rectification, (3) et la période 3, avant et après les crues de 2001 à 2003, en vert. Un agrandissement des périodes 2 et 3 est représenté sur la Figure 3-24 (p.139).

L'étude des variations altimétriques présentée ci-dessus est divisée par période.

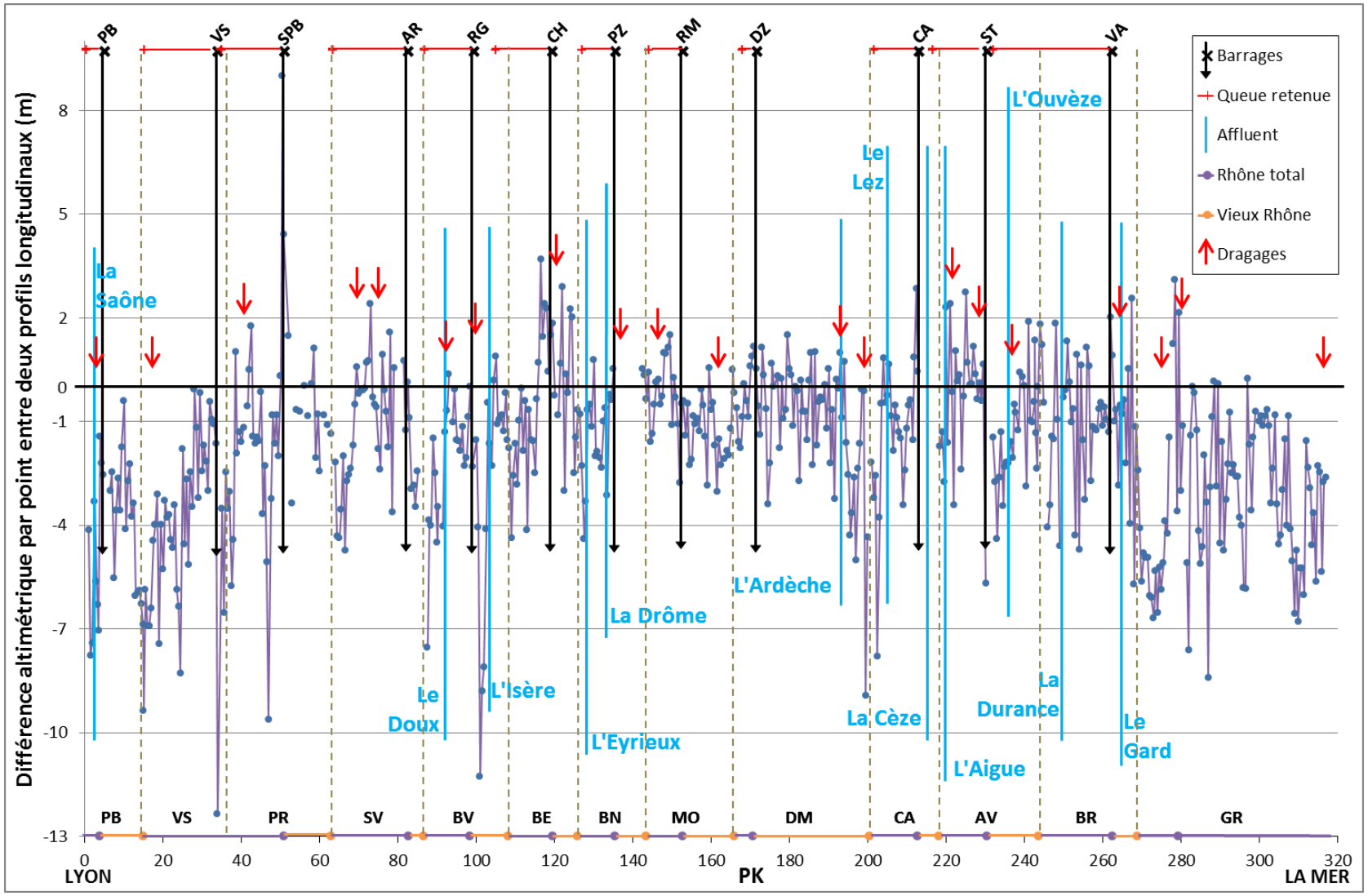


Figure 3-17 : Différentiel altimétrique entre tous les points de Lyon à la mer, entre le profil de 1897-1907/08 et le profil récent (Période 0)
[PB : Pierre-Bénite, VS : Vaugris, PR : Péage de Roussillon, SV : Saint Vallier, BV : Bourg-lès Valence, BE : Beauchastel, BN : Baix-le Logis Neuf, MO : Montélimar, DM : Donzère-Mondragon, CA : Caderousse, AV : Avignon, BR : Beaucaire, GR : Grand Rhône]

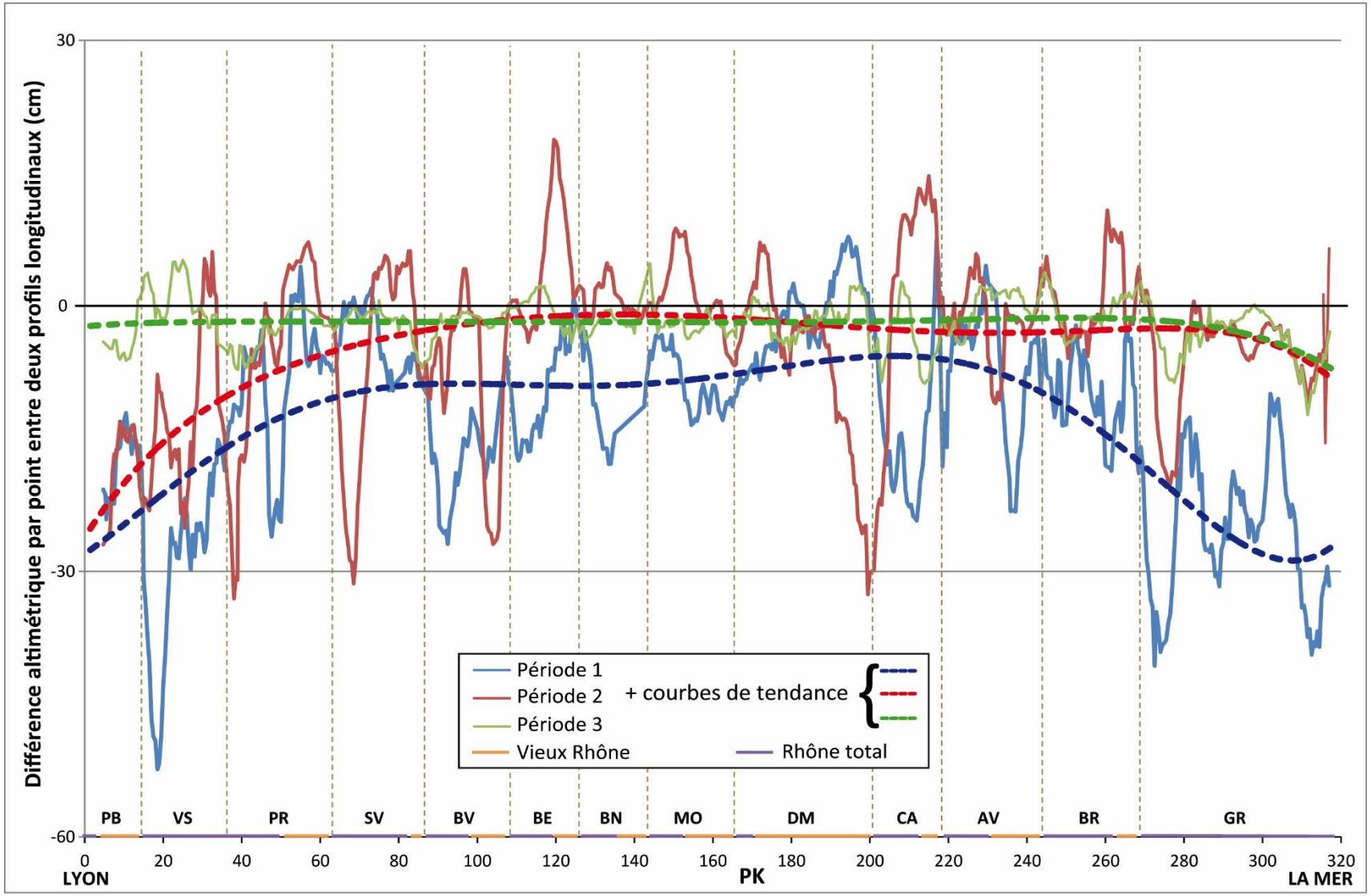


Figure 3-18 : Comparaison des moyennes mobiles (d'ordre 10 en traits pleins) et de leurs courbes de tendance (polynomiales d'ordre 6 en pointillés) des différentiels altimétriques de Lyon à la mer pour la période 1 (Figure 3-21), la période 2 (Figure 3-23) et la période 3 (Figure 3-25). Les valeurs de la période 2 incisées par les extractions ont été corrigées.

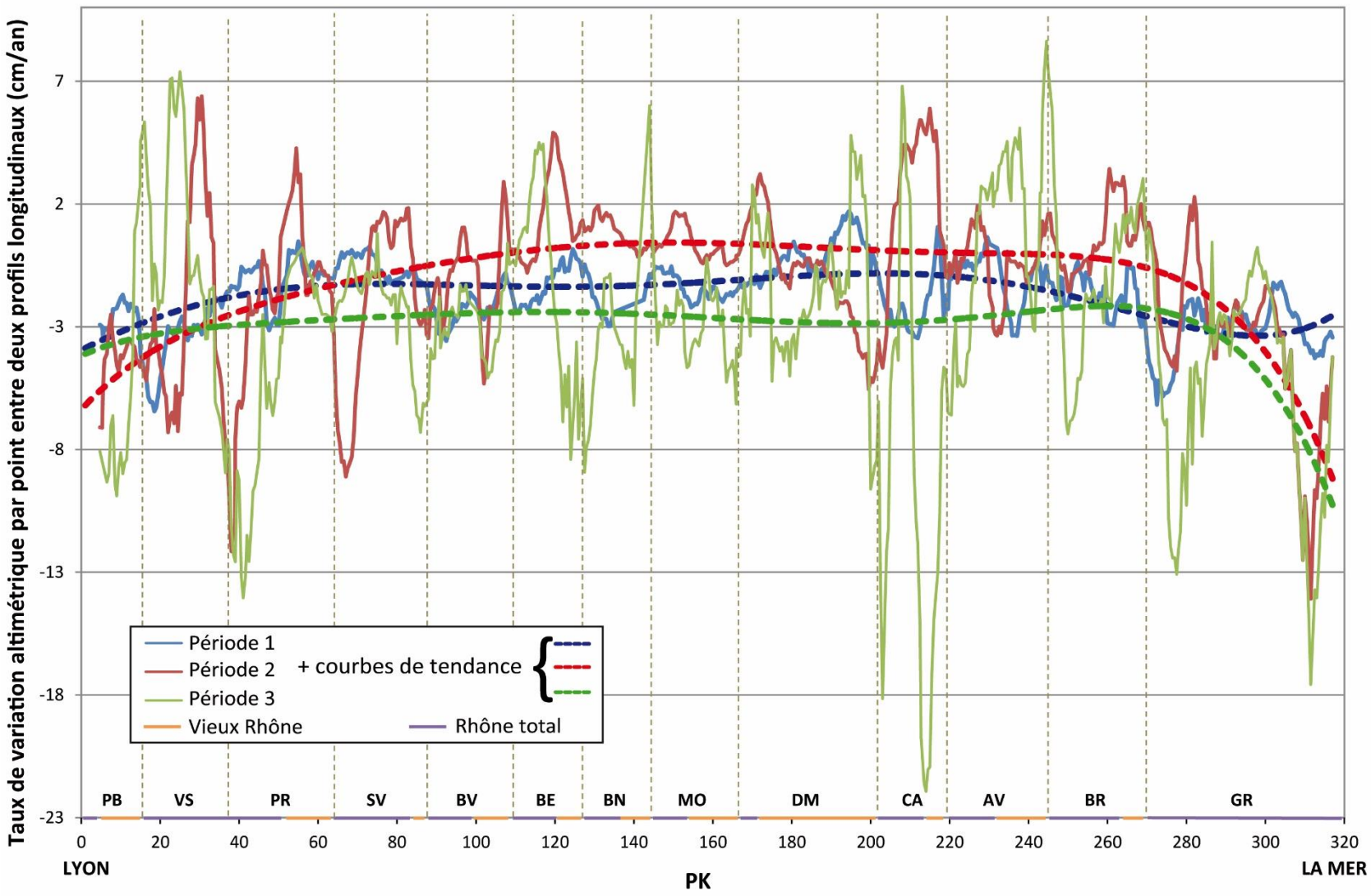


Figure 3-19 : Les moyennes mobiles (ordre 10 trait plein) et leurs courbes de tendance (polynomiales d'ordre 6 en pointillés) des vitesses de variations altimétriques des périodes 1 à 3. Les valeurs de la période 2 incisées par les extractions ont été corrigées.

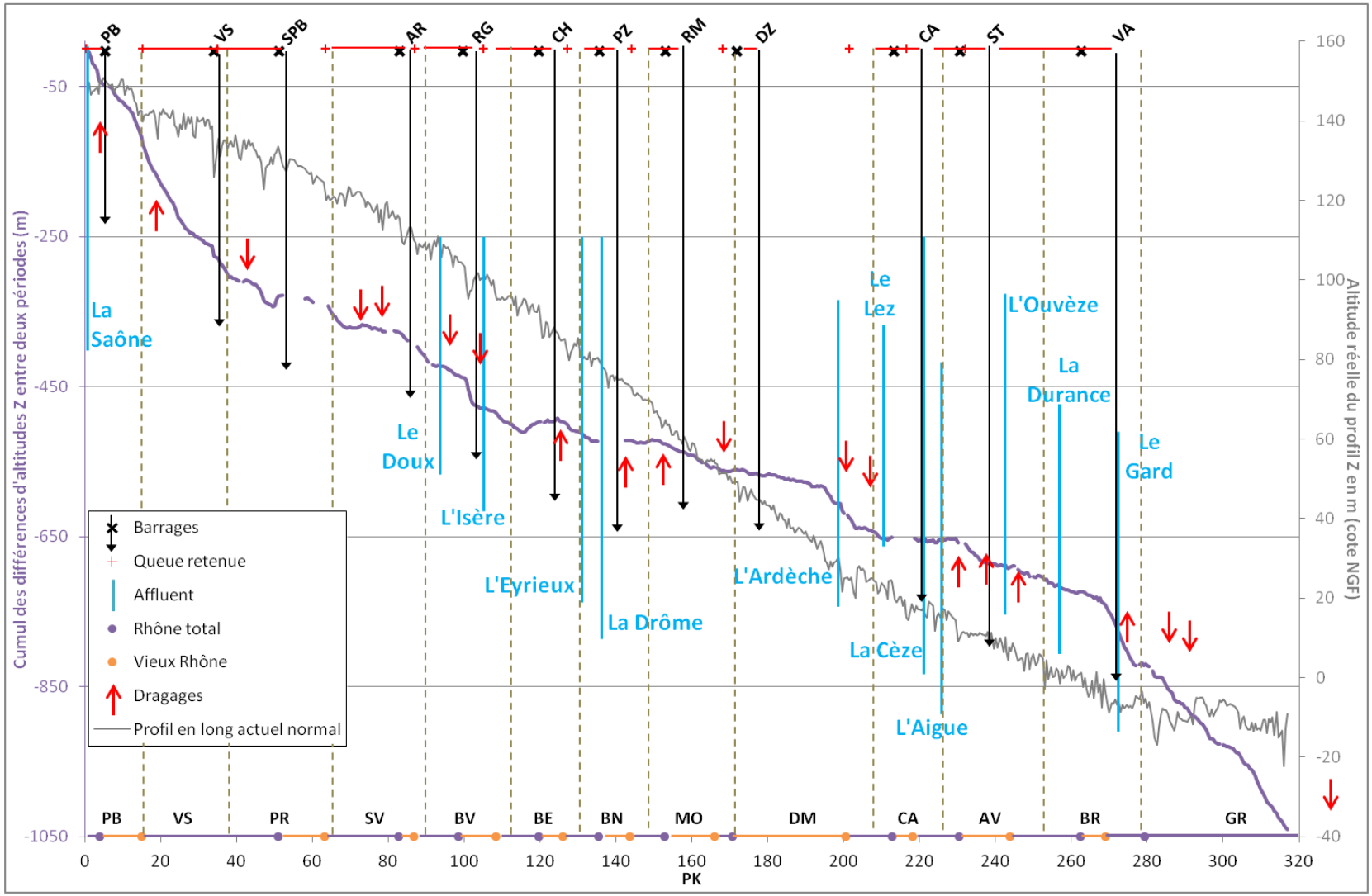


Figure 3-20 : Cumul des évolutions verticales totales du fond du lit observées tous les 500 m entre 1897/1907 et 2007/2010 sur le Rhône de Lyon à la mer. Le profil en long actuel a été tracé en parallèle afin de souligner la différence des valeurs altimétriques entre le profil cumulé et normal.

[PB : Pierre-Bénite, VS : Vaugris, PR : Péage de Roussillon, SV : Saint Vallier, BV : Bourg-lès Valence, BE : Beauchastel, BN : Baix-le Logis Neuf, MO : Montélimar, DM : Donzère-Mondragon, CA : Caderousse, AV : Avignon, BR : Beaucaire, GR : Grand Rhône]

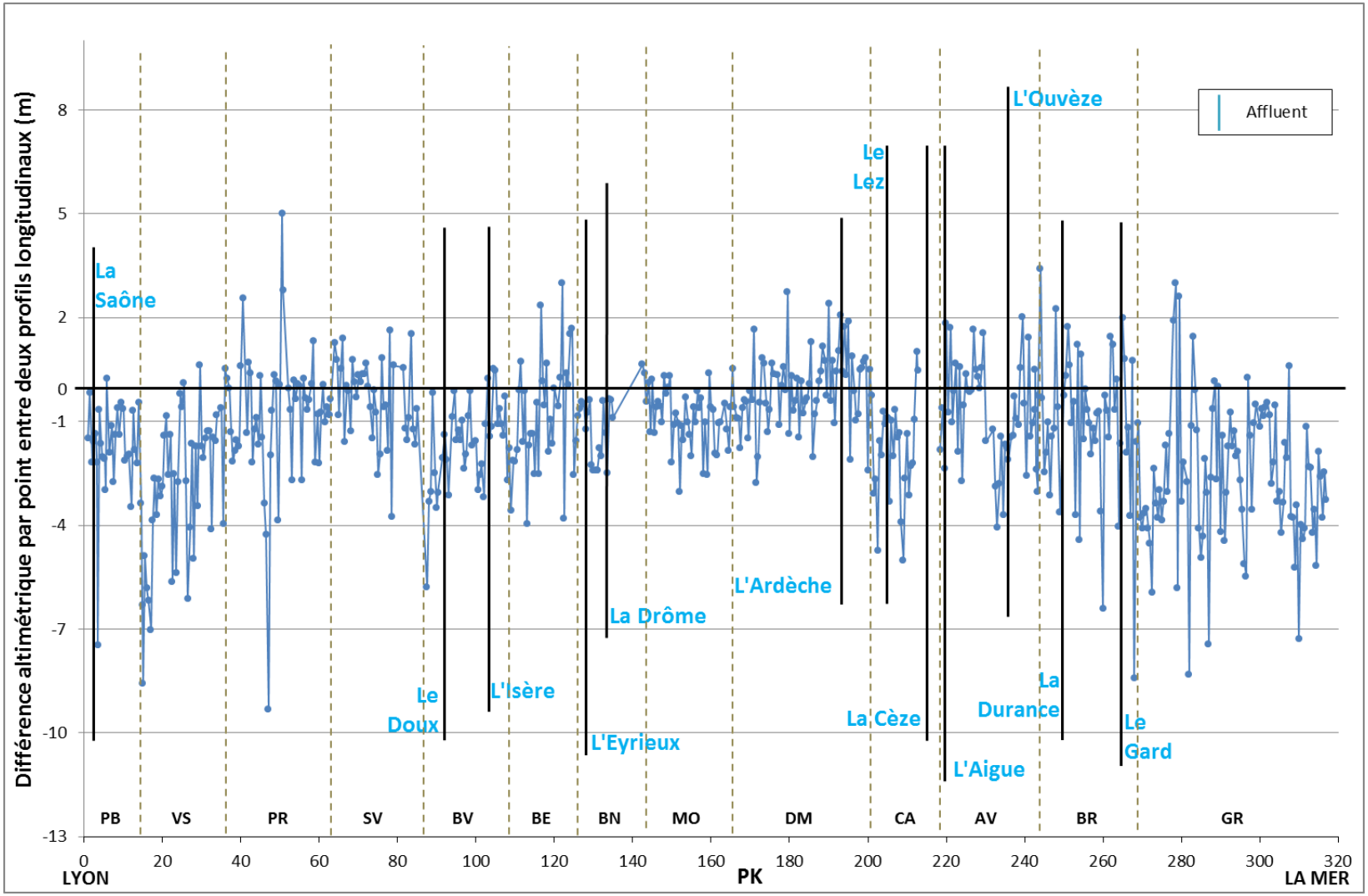


Figure 3-21 : Différentiel altimétrique entre tous les points de Lyon à la mer pour la période 1 (avant la construction des aménagements CNR)
[PB : Pierre-Bénite, VS : Vaugris, PR : Péage de Roussillon, SV : Saint Vallier, BV : Bourg-lès Valence, BE : Beauchastel, BN : Baix-le Logis Neuf, MO : Montélimar, DM : Donzère-Mondragon, CA : Caderousse, AV : Avignon, BR : Beaucaire, GR : Grand Rhône]

2.3.1. Analyse de la Période 0 : changements globaux

En visualisant de façon globale les courbes des profils en long (Annexe 5, Annexe 6 et Annexe 7), on constate que la tendance générale est à l'incision pour chaque grande période d'aménagement. Cette observation est confirmée par la représentation des variations verticales depuis la construction des casiers à aujourd'hui (Figure 3-17), qui montre une forte densité de points en-dessous de 0, ainsi que par le cumul du différentiel (Figure 3-20). L'incision moyenne de l'ensemble du linéaire de Lyon à la mer et sur toute la période est de -1,81 m, soit un taux d'incision moyen de 1,72 cm/an.

2.3.2. Analyse de la Période 1 : chenalisation

Tronçon observé	Variations verticales
De Pierre-Bénite au barrage de Vaugris [PK 0 à 30]	Incision de -2,6 m en moyenne. Une première incision à l'aval de la confluence de la Saône, puis une incision plus importante à l'aval du secteur de Pierre-Bénite.
Secteur de Péage de Roussillon [PK 30 à 62]	Incision de -2 m en moyenne dans la retenue de Péage de Roussillon [PK 45 à 50]. L'incision diminue à l'aval du secteur de Vaugris puis dans le secteur de Péage de Roussillon où on retrouve un léger exhaussement juste à l'amont d'une fosse de 10 m au niveau du PK 47. Cette fosse semblait exister au moment de la construction des casiers au PK 50, ce qui laisse penser à une migration vers l'amont.
De Saint-Vallier à Bourg-lès Valence [PK 62 à 108]	Incision de -1,7 m en moyenne entre le vieux Rhône de Saint-Vallier et le secteur de Bourg-lès Valence [PK 85 à 105]. L'incision la plus importante dans le Rhône médian est observée aux alentours de la confluence de l'Isère avec -2,3 m. Sinon peu de variations sont observées dans le secteur amont de Saint-Vallier, et c'est à partir du PK 80 qu'une autre grande phase d'incision se met en place jusqu'à l'amont du secteur de Beauchastel.
De Beauchastel à Baix-le Logis Neuf [PK 108 à 142]	La zone d'incision de l'amont est visible sur les quatre premiers kilomètres du Rhône total jusque vers le PK 110 avec une valeur moyenne de -1,7 m entre le PK 108 et 112. L'incision a été moins importante mais continue le long du vieux Rhône, de Beauchastel à la retenue de Baix-le Logis Neuf [PK 125 à 134], avec -1,4 m en moyenne. Deux paliers, séparés par un tronçon en incision, sont observés à l'amont de l'Eyrieux et à l'aval de la Drôme.
De Montélimar à Donzère-Mondragon [PK 142 à 200]	L'incision a été moins importante mais continue entre la retenue de Montélimar et le Rhône total de Donzère-Mondragon [PK 150 à 168] avec -1,1 m en moyenne. La fin du palier à l'aval de la Drôme est observée dans le secteur de Montélimar. S'en suit une incision jusque dans le secteur de Donzère-Mondragon, un plateau jusqu'à la confluence de l'Ardèche et un exhaussement à son aval, témoignant d'un apport sédimentaire important.
Caderousse [PK200 à 218]	On est de nouveau dans une situation d'incision entre le Rhône total de Caderousse à la confluence du Lez [PK200 à 210] avec -2 m en moyenne.
Secteur d'Avignon au Grand Rhône [PK 218 à 317]	Un palier dans la partie amont d'Avignon suivi d'une incision jusqu'à l'aval, rythmée par une pente moins marquée d'Avignon à Beaucaire et par une pente plus forte de Beaucaire à la mer. Incision moyenne de -1,95 m sur les sept premiers kilomètres du vieux Rhône d'Avignon (aval du barrage et autour de la confluence de l'Ouvèze) [PK 230 à 237]. Incision moyenne de -2,6 m à partir de la restitution de Beaucaire jusqu'à l'aval [PK 270 à 317], exceptée la diffluence avec le Petit Rhône (PK 277 à 280) qui montre un exhaussement de +0,4 m.

Tableau 3-5 : Synthèse des variations altimétriques du lit pour la Période 1 à partir des profils en long tracés dans les Annexe 5, Annexe 6, Annexe 7 et du cumul des différences altimétriques de la Figure 3-22

Entre 1897-1907 et la phase de construction des barrages, on observe globalement une incision du linéaire (enfoncement du profil bleu par rapport au rouge, Annexe 5 à Annexe 7). Les incisions sont assez marquées entre Lyon et Bourg-lès Valence (Annexe 5). Le profil montre une certaine stabilité en

comparaison au reste du linéaire entre Beauchastel et Donzère-Mondragon (Annexe 6). L'incision est localisée dans certains secteurs entre l'aval de Donzère et la mer, et le reste du profil ne semble pas avoir varié (Annexe 7). La courbe cumulative des variations altimétriques représentant la Période 1 (Figure 3-22) est principalement descendante, séquencée par une succession de plateaux et quelques courtes ascensions. Le détail des variations est synthétisé dans le Tableau 3-5.

La Période 1 est celle qui enregistre les changements les plus importants sur le linéaire entre Lyon et la mer. Elle souligne l'impact de la construction des casiers (Figure 3-21), avec une incision moyenne de -1,33 m sur la période (Figure 3-18), mais sur l'échelle de temps la plus longue, avec une vitesse d'incision moyenne de 1,77 cm/an (Figure 3-19). On observe quelques points en exhaussement à l'aval de l'Ardèche, de l'Ouvèze, de la Durance et du Gard, pouvant manifester un apport de charge solide (Figure 3-21). Quant à l'aval de la Saône, du Doux, de l'Eyrieux, de la Drôme et du Lez, les points montrent une incision. A l'aval de l'Isère et de l'Aigue, on observe autant de points en incision qu'en exhaussement.

2.3.3. Analyse de la Période 2 : aménagements CNR

Depuis la construction des barrages à aujourd'hui, on observe des incisions moins marquées que lors de la Période 1 et plus localisées, et quelques retenues enregistrent un exhaussement (comparaison du profil rouge et vert sur les Annexe 5 à Annexe 7). L'incision semble légèrement moins importante que la période précédente entre Lyon et Bourg-lès Valence (Annexe 5). Comme pour la Période 1, on ne constate que quelques variations altimétriques localisées entre Beauchastel et Donzère-Mondragon (Annexe 6), et c'est dans ce tronçon qu'on observe le plus de retenues en exhaussement. Les incisions sont moins marquées entre l'aval de Donzère et la mer (Annexe 7). La Période 2 enregistre une incision moins forte que la précédente avec une concentration de points en incision moins importante que la période précédente mais avec des maxima bien marqués (Figure 3-23). La courbe cumulative représentant la Période 2 (Figure 3-22 et Figure 3-24) présente une pente globale plus faible que la courbe précédente, mais des successions de pentes très marquées localement. L'ensemble des variations est représenté dans le Tableau 3-6.

La Période 2 montre une incision de -0,46 m en moyenne (Figure 3-18), et des variations locales plus importantes et rapportées à une durée plus courte (Figure 3-19), soit un taux moyen de 1,73 cm/an. Ce taux, finalement très proche de celui de la période 1, ne prend pas en compte les extractions et dragages depuis les années 70. En effet, 12.10^6 m^3 de sédiments (99,8% graviers – 0,2% fines) ont été extraits durant cette période dans le chenal du Rhône entre Lyon et la mer. Lorsqu'on globalise ces prélèvements sur cette portion du linéaire, on peut estimer la hauteur moyenne d'extraction en la rapportant à la longueur totale (320 km) et la largeur moyenne (275 m) du chenal. Ce qui nous donne une incision forcée par les extractions de -14 cm en moyenne sur tout le linéaire. Cette valeur de correction est à additionner à chaque point du différentiel réalisé pour la Période 2. On passe alors à une incision hors extractions moyenne de -32 cm (contre -46 cm avec les extractions) et une vitesse d'incision hors extractions moyenne de 1,2 cm/an (contre 1,73 cm/an), soit 1,5 fois moins importante que pour la période 1. Cette représentation reste très subjective, la correction proposée étant une correction locale plus ou moins bien replacée sur le linéaire (volume extrait localement rapporté à la largeur et la longueur approximatives du site), mais ne prend pas en compte les érosions possiblement induites par les dragages.

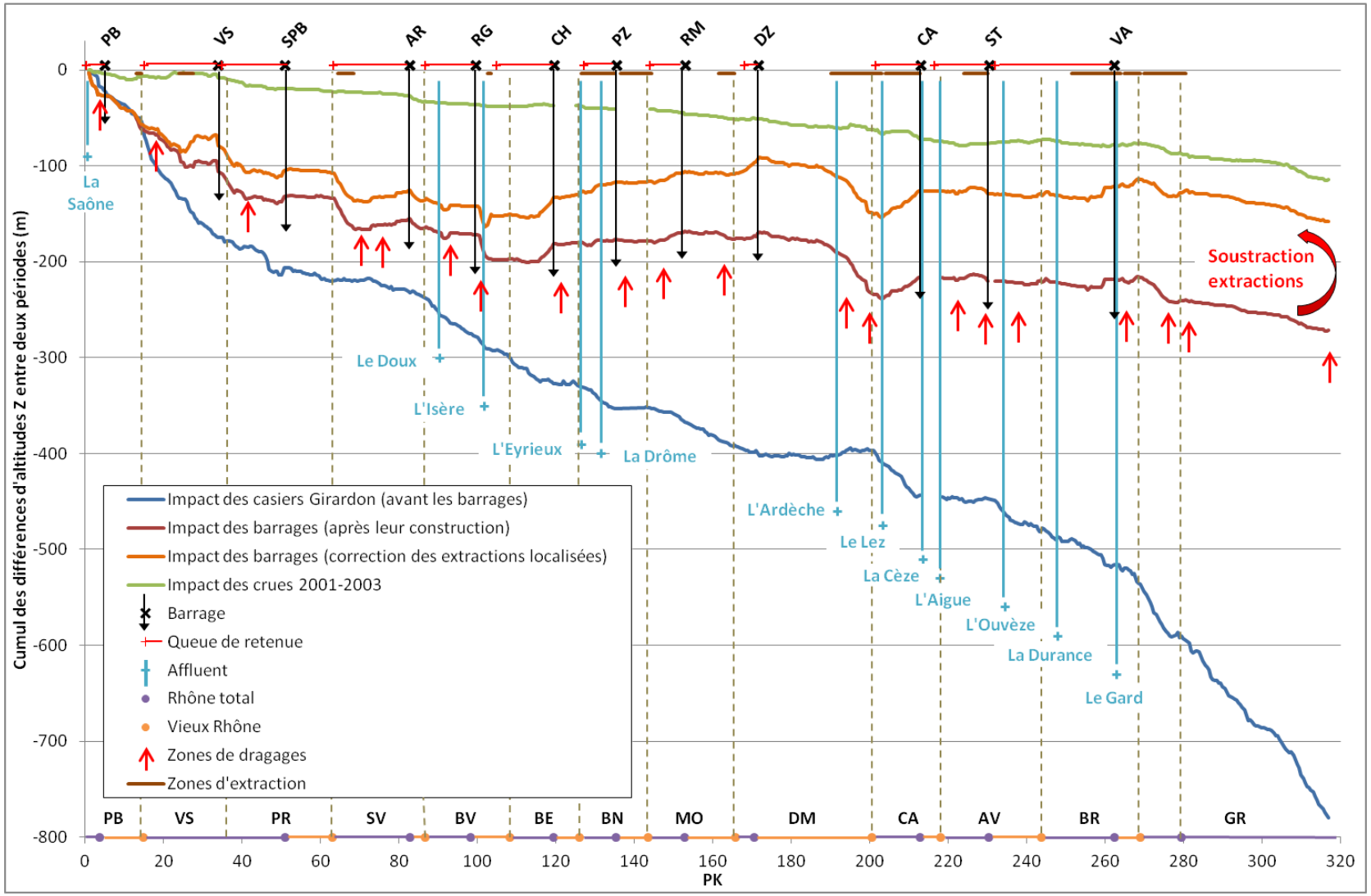


Figure 3-22 : Cumul des évolutions verticales du fond du lit observées tous les 500 m entre deux dates sur le Rhône de Lyon à la mer : en bleu la période correspondant aux aménagements Girardon, avant les barrages [1897/1907-08 - 1953/1981], en rouge la période après la construction des barrages [1953/1999 - 2007/2010], en orange le période après la construction des barrages rectifiée par rapport aux extractions, et en vert la période couvrant les effets des crues de 2001-2003 [1996/2000 - 2004/2007].

Tronçon observé	Variations verticales
De Pierre-Bénite au barrage de Vaugris [PK 0 à 30]	Incision de -2 m en moyenne entre Pierre-Bénite et le Rhône total de Vaugris [PK 0 à 26], ponctuée de fortes incisions à l'aval de Pierre-Bénite (PK13) et au PK 24 à 26. La plupart des zones incisées correspondent (≈) à des zones d'extraction ou de dragage. Une fosse d'environ 11 m coïncide avec la construction du barrage de Vaugris [PK 34 à 37,5] et une zone d'extraction. Un plateau est observé au niveau du barrage de Pierre-Bénite, un exhaussement de +1,47 m en moyenne à l'amont direct du barrage de Vaugris suivi d'un plateau, laissant penser à un stockage dans la retenue. Les cinq premiers kilomètres amont du Rhône total de Saint-Vallier [PK 63,5 à 68,5] se retrouvent particulièrement incisés avec -2,85 m en moyenne, le profil en long actuel formant une fosse correspondant à une extraction massive.
Secteur de Péage de Roussillon [PK 30 à 62]	Un léger exhaussement de +1,85 m, observé à l'amont direct du barrage de Péage de Roussillon, montre un stockage dans la retenue [PK 49,5 à 52].
De Saint-Vallier à Bourg-lès Valence [PK 62 à 108]	Deux grands paliers correspondant au vieux Rhône de Péage de Roussillon et à celui de Bourg-lès Valence-amont du Rhône total de Beauchastel sont séparés par une forte incision à l'amont de Saint-Vallier et à l'aval de l'Isère, forcées toutes deux par des extractions. Une incision de -0,93 m est mesurée depuis le vieux Rhône de Saint-Vallier jusqu'à la retenue de Bourg-lès Valence [PK 84 à 91]. L'incision au niveau de la confluence de l'Isère [PK 100 à 104] a été plus importante que celle de la période précédente, de -2,92 m. Le barrage de l'Isère a été construit à la même époque que le barrage et des extractions/dragages ont été notés dans ce secteur. L'Isère fournissait un matériel sédimentaire important au Rhône qui a largement diminué depuis les extractions de granulats sur l'affluent et les différentes constructions (endiguements, barrages) piégeant des volumes significatifs de sédiments (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5) et pouvant aussi être à l'origine de cette incision. On constate un exhaussement en amont du barrage de Saint-Vallier et un palier au niveau du barrage de Bourg-lès Valence.
De Beauchastel à Baix-le Logis Neuf [PK 108 à 142]	Incision de -0,97 m dans le Rhône total de Baix-le Logis Neuf à l'aval direct de la confluence de l'Eyrieux [PK 127 à 128]. Incision de -0,27 m dans le vieux Rhône de Baix-le Logis Neuf [PK 136,5 à 139,5]. Exhaussement de +1,9 m dans la retenue de Beauchastel [PK 115 à 120], de +1,3 m dans celle de Baix-le Logis Neuf [PK 129,5 à 131], comme si un apport sédimentaire de la Drôme se stockait dans la retenue de ce dernier.
De Montélimar à Donzère-Mondragon [PK 142 à 200]	Incision de -0,75 m à l'aval du vieux Rhône de Montélimar [PK 161,5 à 163,5], et de -0,46 m dans le vieux Rhône de Donzère-Mondragon [PK 172,5 à 190]. Exhaussement de +0,75 m dans la retenue de Montélimar [PK 145,5 à 153] et de +0,3 m dans la retenue de Donzère comme si un apport sédimentaire de la Drôme se stockait dans les retenues. Incisions plus locales et proches des zones de dragages-extractions dans le vieux Rhône de Donzère avec un maximum d'incision de -2 m à environ 4 km en aval de la confluence de l'Ardèche.
Caderousse [PK200 à 218]	Incisions locales et proches des zones de dragages-extractions dans le Rhône total de Caderousse avec un maximum d'incision de -2 m en amont de celle du Lez [PK 190 à 203], puis un exhaussement entre la confluence du Lez et l'amont du barrage de Caderousse.
Secteur d'Avignon au Grand Rhône [PK 218 à 317]	Les secteurs d'Avignon et Beaucaire sont relativement stables, sauf quelques kilomètres à l'amont des deux barrages qui sont en exhaussement, ainsi que l'aval du Gard qui pourrait correspondre à des apports de graviers relevés dans l'Etude Globale du Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5). Des incisions locales et proche des zones de dragages-extractions sont constatées au niveau du barrage d'Avignon [PK 230] (-4 m) et entre la confluence du vieux Rhône et du canal de Beaucaire et la diffluence du Petit Rhône – Grand Rhône [PK 270 à 317] (-0,6 m). En effet, le Grand Rhône est marqué par trois grandes zones d'incision séparées par le palier d'Arles et le seuil de Terrin. L'incision est plus forte à l'amont du palier puis à l'aval du seuil.

Tableau 3-6 : Synthèse des variations altimétriques du lit pour la Période 2 à partir des profils en long tracés dans les Annexe 5, Annexe 6, Annexe 7 et du cumul des différences altimétriques des Figure 3-22 et Figure 3-24

Il est possible que les extractions et les dragages ayant eu lieu à cette période aient pu favoriser les fortes variations locales observées. De plus, on n'observe pas systématiquement un exhaussement à

l'amont des barrages et une incision à leur aval. On constate que le lit s'incise à l'aval de la Saône, de l'Isère, de l'Ardèche et de la Durance, un phénomène à corréler avec des extractions-dragages, et s'exhausse à l'aval du Doux, de l'Eyrieux, de la Drôme, du Lez, de l'Aigue, de l'Ouvèze et du Gard. Le Grand Rhône s'incise sauf au niveau de la diffluence, où le profil en long s'exhausse.

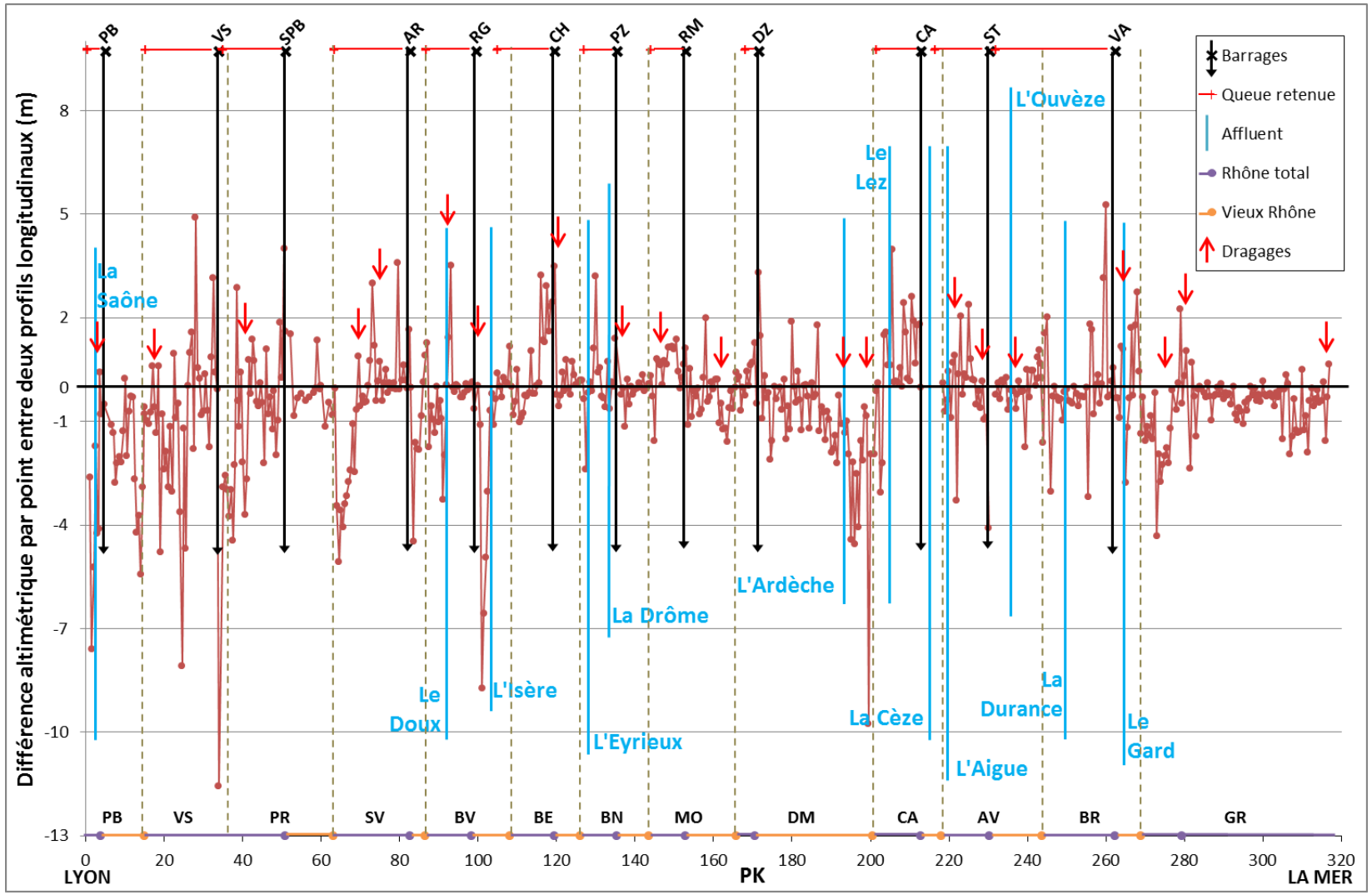


Figure 3-23 : Différentiel altimétrique entre tous les points de Lyon à la mer pour la période 2 (après la construction des aménagements CNR)
[PB : Pierre-Bénite, VS : Vaugris, PR : Péage de Roussillon, SV : Saint Vallier, BV : Bourg-lès Valence, BE : Beauchastel, BN : Baix-le Logis Neuf, MO : Montélimar, DM : Donzère-Mondragon, CA : Caderousse, AV : Avignon, BR : Beaucaire, GR : Grand Rhône]

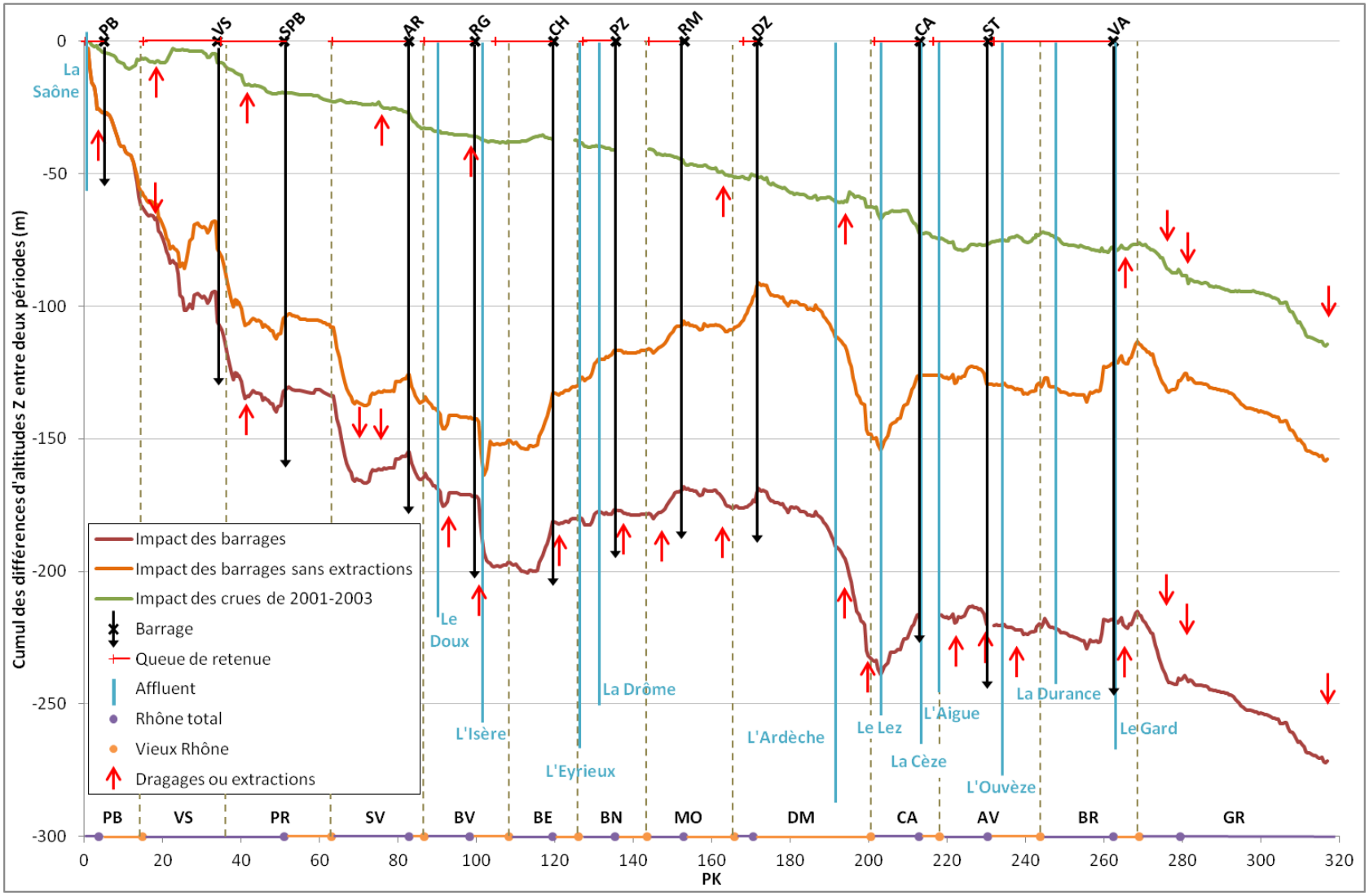


Figure 3-24 : Cumul des évolutions verticales du fond du lit observées tous les 500 m entre deux dates sur le Rhône de Lyon à la mer : en rouge la période après la construction des barrages [1953/1999 - 2007/2010], en orange le période après la construction des barrages rectifiée par rapport aux extractions, et en vert la période couvrant les effets des crues de 2001-2003 [1996/2000 - 2004/2007].

2.3.4. Analyse de la Période 3 : réponse aux crues morphogènes

Le profil avant et après les épisodes de crues de 2001 à 2003 (Période 3) montre une pente descendante moins forte, traduisant une incision plus constante, et des ruptures moins marquées et plus localisées que le profil des deux périodes précédentes (Figure 3-22, Figure 3-24 et Figure 3-26). Ces incisions et exhaussements locaux sont visibles dans certains Rhône totaux et vieux Rhône, et une incision plus significative est soulignée sur la partie aval du Rhône (Annexe 8 à Annexe 10). La Figure 3-26 semble montrer un phénomène de stockage-déstockage entre l'amont et l'aval des barrages. La retenue de Pierre-Bénite montre une incision depuis l'aval de la Saône et la retenue de Vaugris. Elle peut enregistrer localement des exhaussements tout comme à l'amont direct du barrage de Péage de Roussillon.

Secteur	Variations verticales
Pierre-Bénite	Incision moyenne de -0,5 m sur l'ensemble du secteur [PK 0 à 11.5] avec un exhaussement moyen de +0,6 m à l'aval du vieux Rhône [PK 12 à 14.9].
Vaugris	Des zones dans la retenue en exhaussement [PK 20.5 à 22.5] (+1 m en moyenne) et [PK 32.5] (+1,4 m en moyenne) et en incision [PK 30 à 32] (-0,5 m en moyenne), incision au niveau du barrage [PK 33.9] (-3 m) et dans le vieux Rhône [PK 36 à 38.5] (-0,55 m).
Péage de Roussillon	Incision dans la retenue [PK 40 à 41] (-1,3 m), [PK 42.5] (-0,8 m) et [PK 4.5 à 47] (-0,56 m) et dans le vieux Rhône [PK 54] (-0,4 m), [PK 60 à 62.9] (-0,44 m).
Saint-Vallier	Incision dans le Rhône total [PK 75.5] (-1,47 m) et [PK 80] (-0,5 m) et dans le vieux Rhône [PK 83.5 à 86] (-0,97 m).
Bourg-lès Valence	Incision dans le Rhône total à l'amont [PK 89] (-0,6 m), à l'aval de la confluence du Doux [PK 91] (-0,76 m) et dans le vieux Rhône autour de la confluence de l'Isère [PK 101 à 102] (-0,6 m).
Baix-le Logis Neuf	Incision dans le Rhône total à l'aval de la confluence de l'Eyrieux [PK 127.5] (-1,4 m) et à l'amont du barrage [PK 134.5] (-0,5 m).
Montélimar	Incision dans le Rhône total [PK 144.5 à 146] (-0,5 m) et dans le vieux Rhône à l'aval du barrage [PK 152.5 à 154] (-0,77 m) et plus en aval [PK 159 à 159.5] (-0,47 m) et [PK 161 à 165.5] (-0,36 m).
Donzère-Mondragon	Incision dans le Rhône total [PK 168.5 à 169.5] (-0,36 m) et exhaussement à l'amont direct du barrage [PK 170] (+2,2 m) – incisions ponctuelles dans le vieux Rhône jusqu'à la confluence de l'Ardèche [PK 174 à 191.5] (-0,26 m) et 8 km à l'aval [PK 199.5] (-3 m) et exhaussement ponctuel quatre kilomètres à l'aval de la confluence de l'Ardèche [PK 195] (+3,65 m).
Caderousse	Incision dans le Rhône total à l'amont de la confluence du Lez [PK 202.5 à 203] (-2,33 m) et à l'amont direct du barrage [PK 210 à 213] (-1,4 m), avec un exhaussement à l'aval du Lez [PK 204 à 205] (+0,6 m).
Avignon	Exhaussement dans le vieux Rhône à l'aval de la confluence de l'Ouvèze [PK 235 à 237] (+0,4 m).
Beaucaire	Incision dans la retenue [PK 260] (-1,3 m) suivie d'un exhaussement à l'amont direct du barrage [PK 261 à 262] (+1 m) – incision à l'aval direct du barrage et de la confluence du Gard [PK 263] (-0,85 m).
Grand Rhône	Incision dans le Rhône total [PK 271 à 277.5] (-0,75 m) en aval de la diffluence [PK 280] (-1,1 m) et sur le littoral [PK 287] (-1 m) et [PK 307 à 316] (-0,86 m).

Tableau 3-7 : Synthèse des variations altimétriques du lit pour la Période 3 à partir des profils en long tracés dans les Annexe 8, Annexe 9 et Annexe 10

On observe ce phénomène entre le barrage de Saint-Vallier et celui de Beauchastel (qui montre néanmoins une légère incision au niveau du barrage), plus faiblement entre Montélimar et Donzère-Mondragon, ainsi qu'une incision nette à l'amont du barrage de Caderousse avec exhaussement dans le vieux Rhône d'Avignon à l'amont de la restitution. Ces dépôts semblent être temporaires et se propager progressivement d'une retenue à l'autre au fil des événements critiques. A l'aval de

l'Ardèche et du Gard, on constate des exhaussements locaux qui semblent résulter d'apports sédimentaires grossiers des affluents. L'ensemble des observations est synthétisé dans le Tableau 3-7.

La Période 3 montre une densité plus importante de points enregistrant une incision, même si celle-ci est moins marquée que pour les autres périodes (Figure 3-25). Il y a aussi des points en exhaussement, soulignant une redynamisation du lit par les crues. Cette période enregistre une incision de -0,2 m en moyenne (Figure 3-18), ce qui correspond au taux moyen d'incision le plus fort parmi les trois périodes, soit 3 cm/an (Figure 3-19).

Ces phénomènes montrent que le lit répond visiblement au transfert des fines stockées dans les retenues, et qu'il n'est pas totalement figé puisqu'une succession de crues morphogènes peut encore remobiliser la charge de fond de secteurs graveleux.

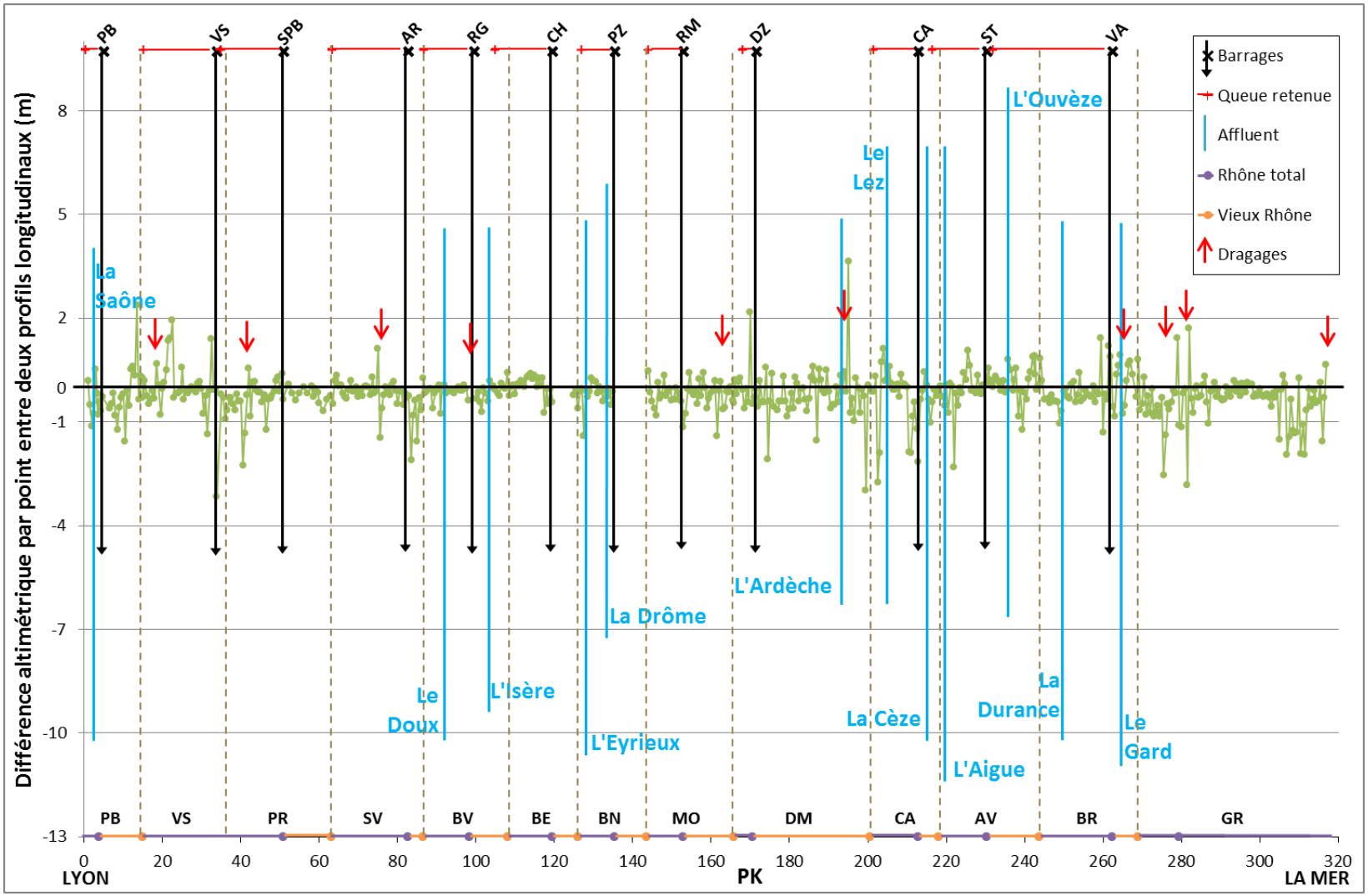


Figure 3-25 : Différentiel altimétrique entre tous les points de Lyon à la mer pour la période 3 (avant et après les crues de 2001 à 2003)
[PB : Pierre-Bénite, VS : Vaugris, PR : Péage de Roussillon, SV : Saint Vallier, BV : Bourg-lès Valence, BE : Beauchastel, BN : Baix-le Logis Neuf, MO : Montélimar, DM : Donzère-Mondragon, CA : Caderousse, AV : Avignon, BR : Beaucaire, GR : Grand Rhône]

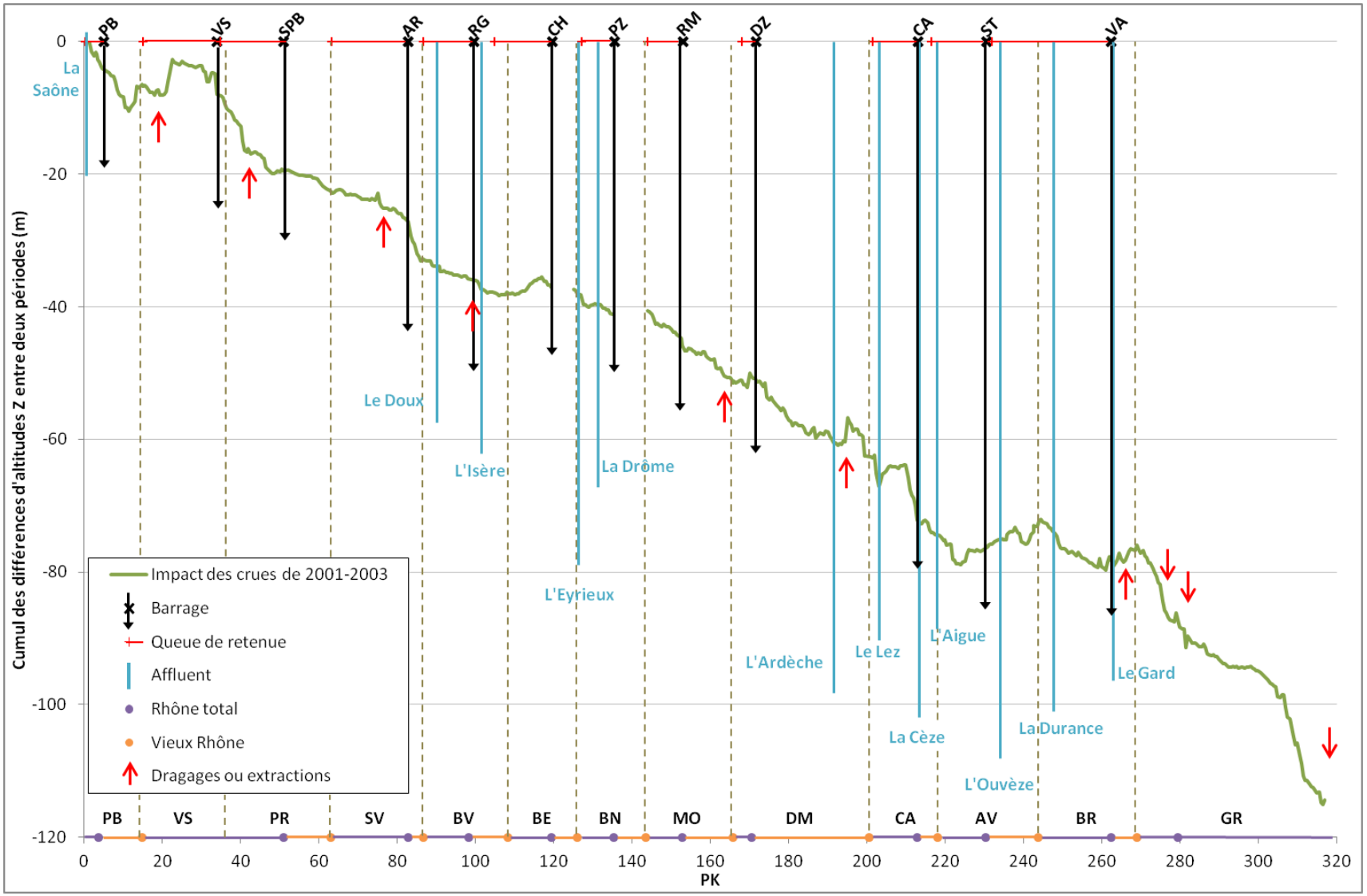


Figure 3-26 : Cumul des évolutions verticales du fond du lit observées tous les 500 m sur le Rhône de Lyon à la mer entre les deux dates [1996/2000 & 2004/2007] couvrant les effets des crues de 2001-2003.

2.3.5. Interprétation et limites rencontrées

Le système est globalement en incision sur les trois périodes (Figure 3-18). Toutefois, ces résultats attestent sur le linéaire d'un impact des casiers Girardon plus important que celui des aménagements CNR, qui a été plus localisé. En effet, la Période 1 est caractérisée par une incision généralisée inscrite dans le temps et résultant sans doute des modifications hydrauliques occasionnées par les ouvrages Girardon. La construction des barrages semble quant à elle avoir eu un effet plus modéré sur la modification verticale du lit, probablement du fait que les ouvrages ont été implantés après les ajustements morphologiques et le tarissement des apports des principaux affluents. Le flux sédimentaire potentiellement piégeable serait donc relativement faible. Aussi, les contraintes critiques seraient rarement atteintes car le lit se serait pavé lors des incisions précédentes, et les débits de pointe permettant la remobilisation sédimentaire auraient diminué dans les sections court-circuitées.

L'interprétation des changements est complexe car les pressions humaines sont multiples et nous ne pouvons pas toutes les considérer. Citons notamment les dragages et extractions dans le Rhône total, quelques vieux Rhône et sur les affluents ou à leur embouchure. Les extractions, lors de la Période 2, ont laissé de nombreuses séquelles dans le fond du chenal en l'incisant localement et durablement. Les dragages dits d'entretien permettent de remobiliser les sédiments stockés dans des zones en exhaussement, le plus souvent à l'amont des ouvrages, aux confluences ou dans le chenal navigable, en prélevant la charge solide et en la restituant à l'aval du prélèvement. Il existe aussi des dragages d'extraction qui consistent à augmenter la hauteur de chute des usines hydro-électriques afin de maintenir la production énergétique. Les extractions consistent en un prélèvement de sédiments (sables, graviers, galets) au fond du cours d'eau dans le but d'exploiter des matériaux pour la construction. Ces données ont été prises en compte dans nos analyses bien qu'elles ne soient ni complètes ni précises. En effet, nous avons utilisé les données d'extraction et de dragage recensées entre 1970 et 1999 dans l'Etude Globale du Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A6) ainsi qu'un jeu de données plus actuel (2000 à 2011) fourni par la CNR. Ces données ne permettent pas de relocaliser avec précision les différents prélèvements et l'incertitude est forte quant aux valeurs prélevées résultant des extractions de granulats qui ont cessé à partir de 1992. C'est à compter de cette date que la loi sur l'eau interdit ces prélèvements dans le chenal des cours d'eau afin de ne plus déstabiliser le transit sédimentaire.

Lorsqu'on considère la deuxième période d'aménagement, il est indispensable de prendre en compte les extractions et les dragages afin d'isoler l'impact réel des barrages sur le lit. Les dragages ont permis de remobiliser les sédiments majoritairement fins (97,8% fines – 2,2% graviers) qui ont été restitués au Rhône. Les extractions et dragages ont donc joué un rôle important dans les variations altimétriques, mais il n'est pas possible de déterminer avec certitude leur impact sur le linéaire et notamment de mesurer précisément l'incision des zones draguées et de localiser les zones de redéposition des sédiments. Ces actions peuvent en effet biaiser l'observation en occultant les zones de stockage sédimentaire potentiel ou en favorisant une incision progressive ou régressive suite au prélèvement. D'une part, ils n'ont pas toujours été recensés, notamment lorsqu'il s'agissait d'extractions de graviers dans le chenal, et les données ont, la plupart du temps, manqué de précision dans la localisation des dragages-extractions. D'autre part, dans le cas où la charge de fond était encore mobile, les fosses laissées par les extractions ont pu être responsables de l'interruption du transit sédimentaire en piégeant cette charge de fond. Enfin, si la fourniture sédimentaire n'était plus

assurée, ces fosses ont pu favoriser les érosions locales, susceptibles de se propager vers l'amont ou l'aval.

On observe aussi des exhaussements locaux dans les retenues des barrages mais pas de façon systématique. Cette absence de dépôt est-elle due à des dragages ou à des conditions hydrauliques plus actives ? Cela reste encore à déterminer.

Il est aussi important de noter que les affluents ont été fortement aménagés (endiguements, barrages) et ont également fait l'objet d'importants prélèvements dans le cadre de concessions d'extraction, entraînant la création de fosses piégeant les sédiments, qui ont considérablement réduit les apports sédimentaires au Rhône. Les analyses qui suivent tiennent compte des affluents encore potentiellement susceptibles d'alimenter le chenal du Rhône en sédiments fins ou grossiers (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5).

Le lit actuel ne semble donc pas totalement figé par les aménagements. Les évolutions morphologiques sont liées au transfert d'une charge principalement sableuse sur la géométrie pavée et stockée dans les retenues, ou à une charge de fond plus grossière résultant d'apports locaux.

2.4. Evolution verticale entre Jons et Lyon : cas de Miribel-Jonage

Les secteurs de l'Ain et de Lyon-Miribel (PK -58 à 1) font partie de la concession VNF, qui indique ne pas posséder de données historiques. Cependant, de nombreuses études ont été réalisées sur la dynamique fluviale dans ce secteur (entre les PK-26.4 et -8), sur plusieurs profils en long entre 1847 et 2011. Les résultats de ces études sont résumés ici.

Entre 1847 et 1857, suite à l'endiguement du bras Nord du Rhône qui portera le nom de canal de Miribel, la concentration des eaux dans le canal, se dissipant habituellement dans la bande de tressage que constituait le secteur, soit 500 m^3/s, a entraîné le basculement hydraulique du profil en long, constaté la première fois en 1882 (Winghart et Chabert, 1965 ; Poinsart et al., 1989 ; Poinsart, 1994). La Figure 3-28 met en évidence le basculement de ce profil entre 1847 et 1952 autour d'un point neutre de basculement situé au PK -16.5. A l'amont du basculement, elle met en évidence une érosion de 4 m par rapport au profil de 1847 et à l'aval un exhaussement de 5,5 m (Poinsart et al., 1989). La construction du canal de Jonage, entre 1891 et 1899, le bras Sud du Rhône sur lequel l'usine de Cusset a été construite, a permis de détourner une partie des eaux. Cette dérivation n'a pas suffi à limiter le surcreusement de Miribel. Lors de la mise en service du barrage de Jons en 1937, le débit réservé dans le canal de Miribel est passé à 30 m^3/s à l'étiage, limitant les apports solides et liquides. En 1950, le débit dans le canal de Jonage pour alimenter l'Usine de Cusset est passé à 650 m^3/s. Depuis cette période, les processus d'érosion progressive à l'aval du barrage de Jons ont été accentués par (1) la diminution de la fréquence des crues limitant les apports solides provenant de l'amont pour des débits inférieurs à 1500 m^3/s et (2) les longues périodes de débit réservé suivies d'une augmentation brutale du débit, favorisée par l'action du déversoir de crue et fragilisant les secteurs les plus instables du profil (Poinsart et al., 1989). Depuis les années 80, l'incision s'est généralisée sur tout le profil suite à l'intensification des extractions de graviers, autorisées à l'amont où l'érosion avait été observée (Figure 3-28). Les érosions régressives provoquées par l'exploitation ainsi que la création de fosses d'extractions entre les PK -23 et -21.5 marquent profondément le profil. Suite aux études menées par Poinsart et al. (1989) et Bravard et al. (1991), qui mettaient en évidence le déficit sédimentaire conséquent sur le secteur jusqu'à l'exhumation du matériel fluvio-glaciaire profond, ainsi que le surcreusement au voisinage de la ville de Miribel, les extractions ont été interdites.

Entre 1990 et 1996, les fosses laissées par les extractions se comblent et le profil subi une érosion généralisée (Figure 3-29-haut, Malavoi, 2000 et 2008). Puis, entre 1996 et 2004, le profil en long du canal de Miribel tendrait vers un exhaussement généralisé, sans pour autant rattraper le niveau du profil de 1990, avec des secteurs présentant des incisions de -50 à -70 cm (Malavoi, 2008). Entre 2004 et 2006 les fluctuations dans l'évolution des profils avec un apport sédimentaire moyen annuel d'environ 50 000 m^3 résultant de l'érosion de la basse vallée de l'Ain montrent que le Rhône n'est plus en incision mais présente une dynamique conforme aux processus hydromorphologiques naturels (Malavoi, 2008). La Figure 3-29 (au milieu) montre que le profil en long n'a que faiblement varié entre 1996 et 2006 et tendrait plus vers un exhaussement. Une étude menée par ARTELIA (2012) confirme que le canal de Miribel n'est plus en incision entre 2006 et 2011, mais en exhaussement (Figure 3-29-bas). L'analyse bathymétrique met en évidence que le secteur est bien dynamique et que le transit est maintenu au niveau du barrage. Le stockage sédimentaire dans la retenue de Jons, correspondant aux apports de l'Ain, permettrait d'alimenter le canal lors des crues, suggérant une certaine continuité sédimentaire sur le long terme. Le transit sédimentaire actuel se voit donc réduit pour des débits moyens et augmenté pour des débits forts (> 2000 m^3/s) par rapport au transit naturel, ce qui signale des évolutions très fluctuantes des fonds.

La Figure 3-27 montre une forte chute du profil actuel, d'environ 15 m, à l'aval de la confluence entre les deux canaux au niveau du PK -9 et à l'amont du seuil de Saint Clair situé au PK -7.7, qui pourrait être due à l'augmentation des débits liquides suite à la confluence des deux canaux et à un déficit sédimentaire. Lors des crues, les sédiments mobilisés en amont se déposeraient préférentiellement dans le canal de Miribel, favorisant l'incision à l'aval de la confluence du canal de Miribel et de Jonage. N'ayant pas d'état de référence, il n'est pas possible d'apprécier avec certitude notre hypothèse, ni l'évolution du profil.

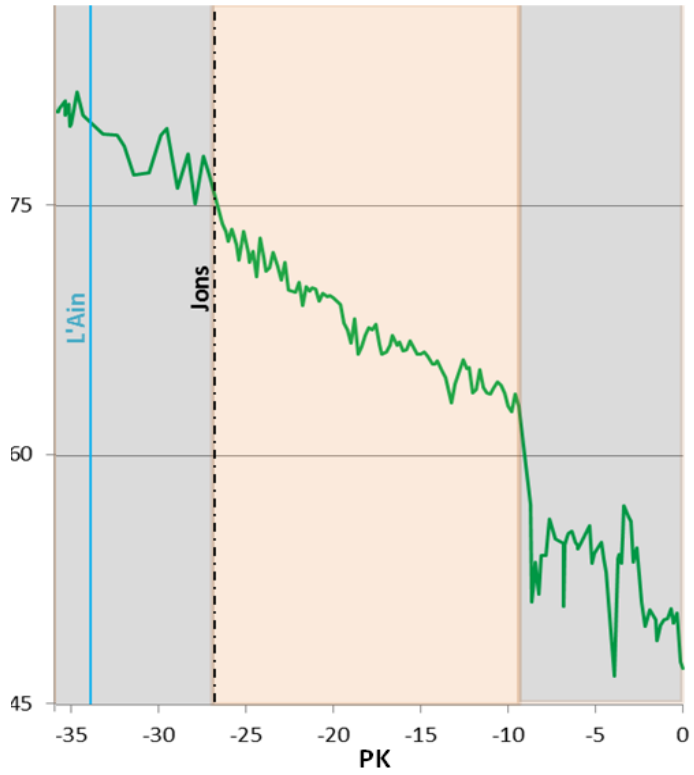


Figure 3-27 : Profil en long de la période récente entre la confluence de l'Ain et Lyon, extrait de l'Annexe 4

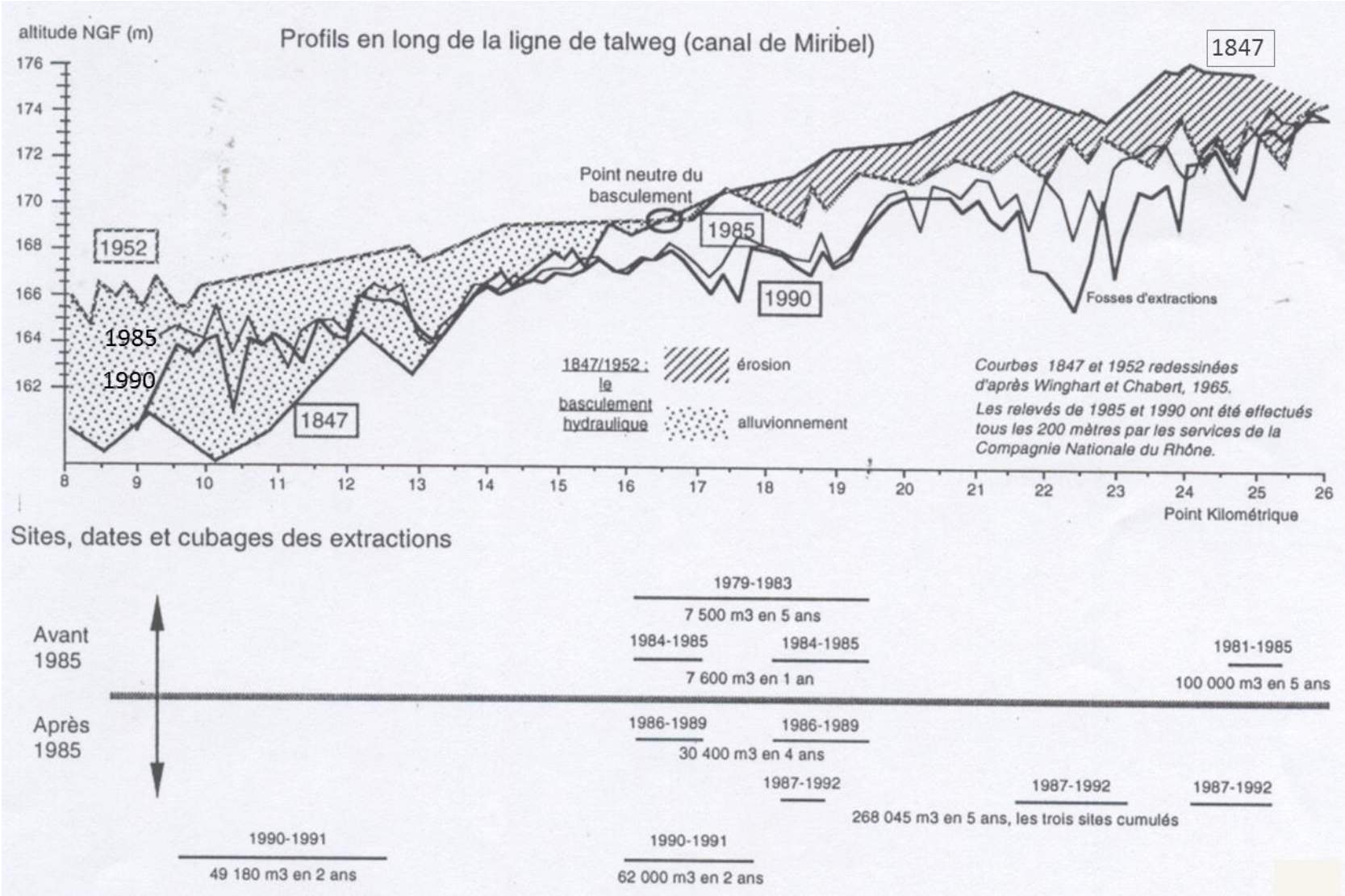


Figure 3-28 : Evolution du profil en long (talweg) du canal de Miribel (en haut) et bilan des extractions de graviers sur différents tronçons du secteur (en bas). Réalisé par Poinsart (1994) d'après l'étude effectuée par Winghart et Chabert (1965) et par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR)

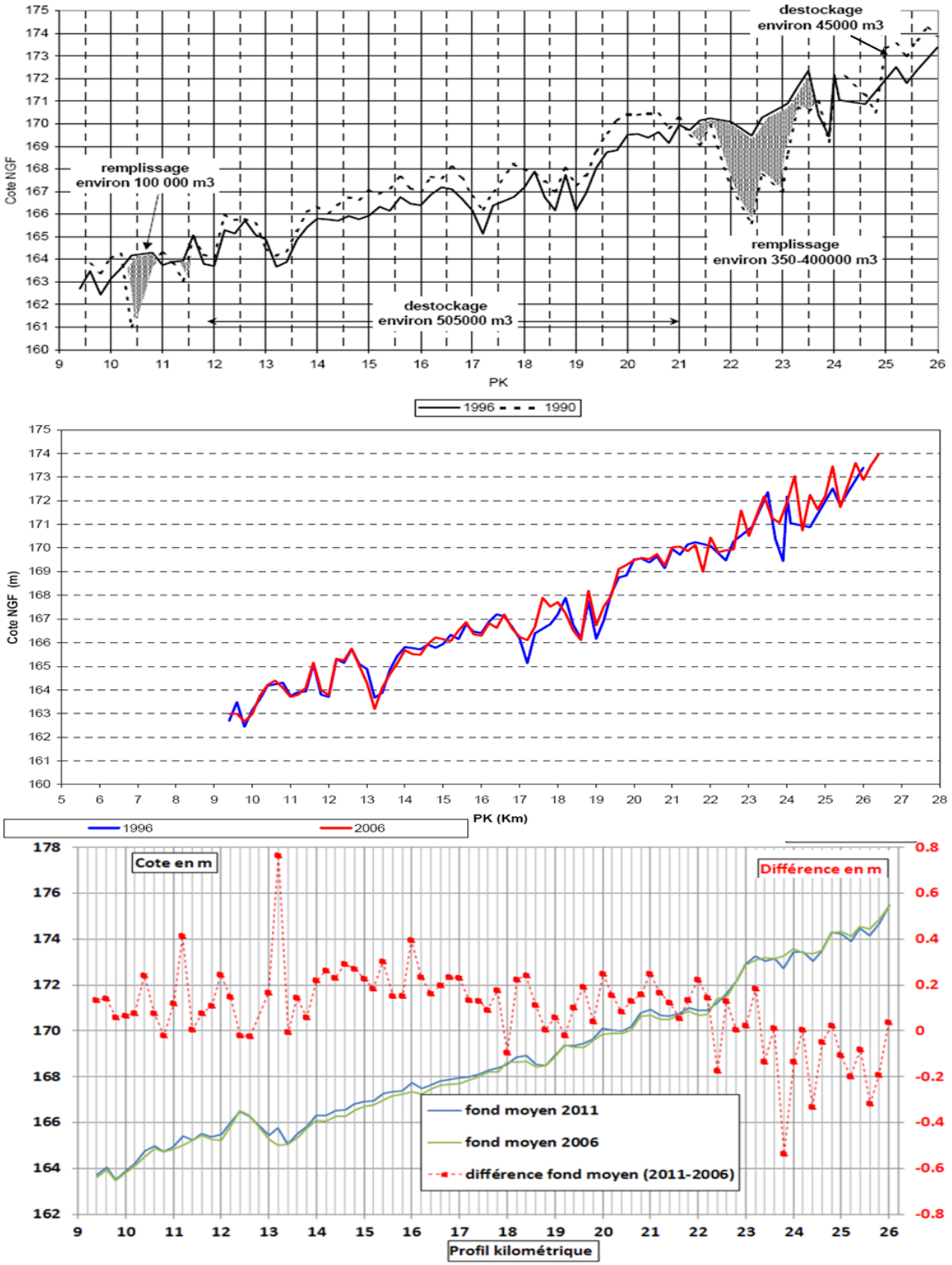


Figure 3-29 : Evolution du profil en long du canal de Miribel entre 1990 et 1996 en haut (Malavoi, 2000 & 2008) et entre 1996 et 2006 au milieu (Malavoi, 2008). Evolution du fond moyen du canal de Miribel entre 2006 et 2011 en bas (ARTELIA, 2012)

3. Etude des faciès intra-chenaux

Le profil en long a également été utilisé pour étudier les faciès du fond du lit, et notamment l'alternance des zones profondes et des zones en relief (mouilles-seuils) et leur évolution à la fois longitudinale et temporelle. Plusieurs méthodes ont été testées pour caractériser ces formes et déduire leurs paramètres physiques :

(1) à partir de la caractérisation des formes par la moyenne mobile et d'une analyse statistique par tronçons de pente homogène, et

(2) à partir d'une analyse par ondelettes.

3.1. Les paramètres physiques des faciès morphologiques

L'étude des paramètres physiques des formes fluviales apparaît comme une étape essentielle de la caractérisation des faciès. Parmi les principaux paramètres physiques figurent la longueur d'onde (λ), ou longueur de la forme, et l'amplitude (A), c'est-à-dire sa hauteur. La largeur du chenal (W) est une variable morphologique directement liée au débit (chapitre 1). Tout changement de la largeur peut entraîner la modification de la vitesse d'écoulement et modifier directement la contrainte de cisaillement (ou force tractrice) et, par conséquent, la capacité de transport. En l'absence d'apport sédimentaire, l'augmentation de la vitesse (provoquée par la contraction du chenal par exemple) peut provoquer un départ plus important de la charge de fond, résultant de la diminution du stock sédimentaire, ou l'incision du chenal (Montgomery and Buffington, 1998). La largeur du chenal, ayant une incidence sur les vitesses d'écoulement et donc sur les processus d'érosion-dépôt, peut donc avoir une influence sur l'amplitude et la longueur d'onde des faciès morphologiques.

Les cas les plus courants montrant le rapport entre la taille des faciès et la largeur du chenal sont le coefficient (ou la rugosité) de forme et la loi d'espacement des séquences seuil-mouille.

Le rapport de la largeur mouillée du faciès sur sa hauteur (W/A), nommé rugosité de forme (*aspect ratio*), est utilisé pour décrire la géométrie des différents faciès d'écoulement. Un rapport élevé caractérise les faciès plats et un rapport faible les faciès amples. Les paramètres W et A peuvent aussi être utilisés pour calculer le volume des mouilles et déduire ainsi l'espace correspondant à une zone de refuge ou à une capacité de rétention (Malavoi et Souchon, 2002).

Quant au rapport de la longueur d'onde des faciès sur la largeur mouillée (λ/W), il permet d'apprécier l'influence de la largeur sur l'espacement des séquences de faciès. Les géomorphologues ont réalisé de nombreux travaux sur les longueurs (λ) des séquences répétées de seuils et de mouilles, qu'ils évaluent en moyenne à 5 à 7 fois la largeur (W) du lit mouillé (distance de seuil à seuil) (Leopold et Wolman, 1957 ; Gregory et al., 1994) :

$$\lambda = [5;7] \times W$$

Malavoi et Souchon (2002) considèrent cet espacement comme un bon guide pour évaluer dans le temps les effets de certaines modifications sur la morphologie des cours d'eau (chenalisation, déboisement, reboisement, autres changements d'occupation des sols, aval de barrages) ou pour des questions de restauration morphologique (Newbury et Gaboury, 1993).

La largeur du chenal en eau ayant une influence sur l'amplitude et la longueur d'onde des formes fluviales, la suite de l'étude consistera à analyser statistiquement la répartition géographique des faciès morphologiques par une classification ascendante hiérarchique de ces paramètres physiques (A ; λ) normalisés par la largeur du chenal en eau.

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Détection et caractérisation des méso-formes du fond par la moyenne mobile

Pour déterminer les points hauts et les points bas de manière simple et systématique à partir de la topographie du fond du Rhône, nous avons tracé la moyenne mobile du profil en long avec un pas de 2 km (pour estimer la rugosité et détecter les formes) et localisé les extrema locaux par rapport à cette moyenne mobile. Cette méthode permet de détecter de manière simplifiée les points hauts et bas. Les paramètres physiques d'amplitude et de longueur d'onde de ces formes ont été extraits à partir de la localisation des extrema et la moyenne mobile (Figure 3-30).

Nous avons essayé d'identifier des formes caractéristiques par biefs présentant des valeurs de pente moyenne homogènes. Un pré-découpage a été établi en tenant compte des principales discontinuités structurales liées au réseau ou aux aménagements (Rhône complet ou total, Rhône court-circuité ou vieux Rhône, canal de dérivation), des confluences, des implantations des ouvrages, de la géologie…

Dans un premier temps il a été question de localiser géographiquement les discontinuités physiques d'origines naturelles et anthropiques. La localisation des discontinuités naturelles (affluents, failles…) et anthropiques (ouvrages, biefs…) a été réalisée à partir de données cartographiques :

- Base de Données Carthage (IGN) pour les affluents,
- BDT-Rhône (IGN) pour les ouvrages et biefs,
- Banque de données de la Carte géologique numérique de la France (BRGM) pour la géologie (infoterre-brgm.fr).

La sélection des affluents dits principaux est fonction de leur capacité à recharger le Rhône en apports sédimentaires (matériaux en suspension et charriage) et de leur débit (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5).

Dans un deuxième temps, nous essayons de détecter les ruptures de pente à partir des méthodes statistiques. Les tests de Pettitt et Hubert ont ainsi été réalisés sur la différence longitudinale des pentes en moyenne, permettant d'identifier des tronçons présentant des pentes moyennes significativement différentes des autres tronçons. Le test de Pettitt consiste en la localisation de la rupture de pente la plus importante de façon itérative (Pettitt 1979, Alber & Piégay 2010). Il s'agit d'une somme de toutes les différences deux à deux entre les éléments de part et d'autre de la rupture. Le test d'Hubert détermine les ruptures pour chaque élément de la série parcourue, c'est-à-dire chaque endroit de rupture possible, et ne retient que les segmentations significatives à chaque nouvelle itération (Hubert, 2000). L'ajout d'une nouvelle rupture à l'ancienne segmentation implique que les segments de la série de part et d'autre de celle-ci soient significativement différents en moyenne. Aussi, les anciennes ruptures ne sont conservées que si elles réapparaissent lors du nouveau test. En effet, lors de la progression du test sur la série, la nature des segments de part et d'autre d'une rupture

peut être modifiée par l'ajout de la nouvelle rupture. Si tous les segments successifs de la série entre les ruptures sont significativement différents deux à deux, alors la segmentation est retenue.

L'analyse du profil en long du Rhône a nécessité un lissage des données, les interpolant à un pas régulier de 500 m et une moyenne mobile d'ordre 10. Ces tests excluent la zone de Génissiat qui, du fait de la très forte pente au droit du barrage, introduit une forte singularité.

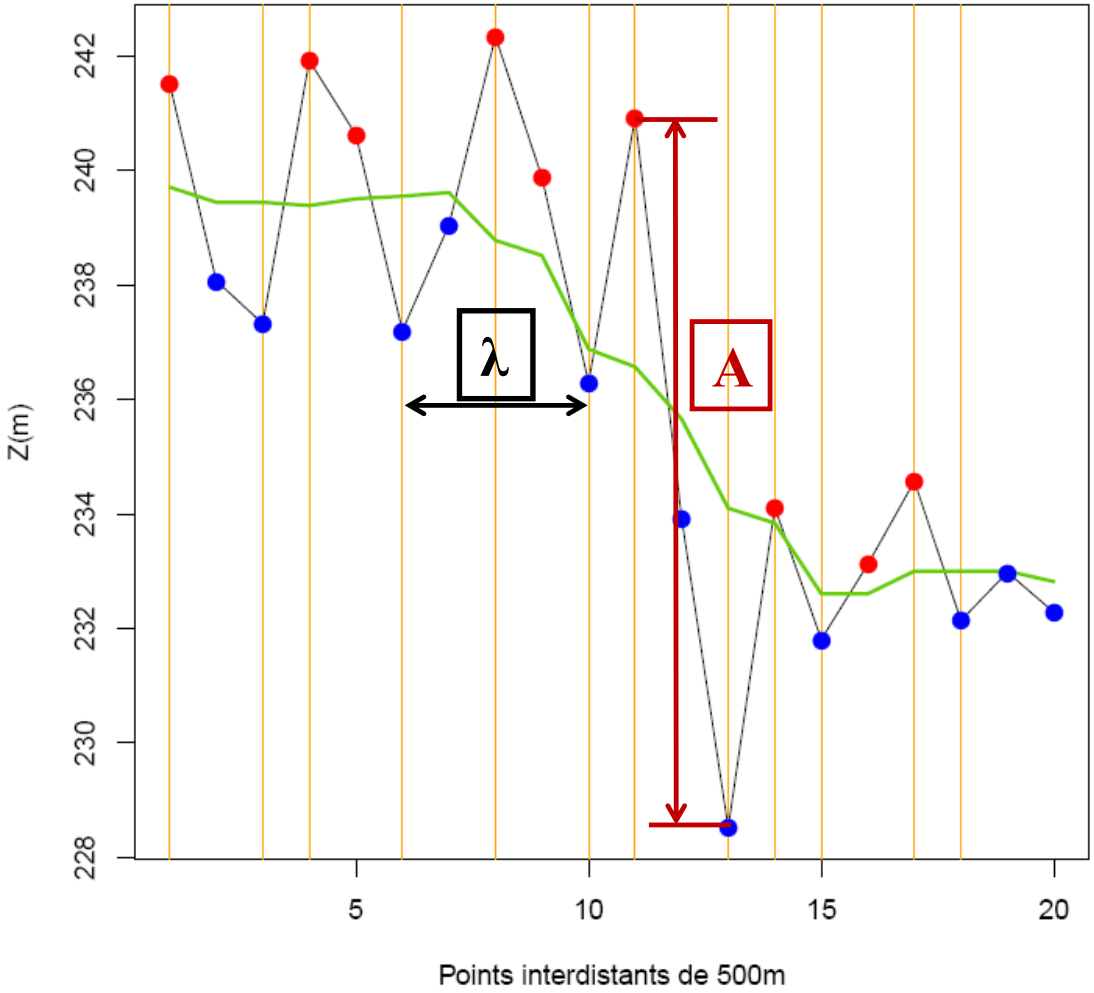


Figure 3-30 : Agrandissement sur une zone de l'extraction des paramètres d'amplitude (A) et de longueur d'onde (λ) des méso-formes, à partir de la moyenne mobile du profil (vert) et le profil en long du Rhône (noir).

3.2.1.1. Découpage en segments homogènes en termes de pente moyenne

Le premier constat qui a pu être fait suite au tracé du profil en long actuel du Rhône est qu'il ne présente pas la forme concave traditionnelle d'un cours d'eau alluvial (chapitre 2), ni même vraiment convexe, mais il se caractérise par des zones irrégulières, parfois bombées ou en surcreusement (Figure 3-34).

Un profil en long synthétique (Figure 3-34) permet de replacer les différents résultats des analyses statistiques, c'est-à-dire le découpage du linéaire en 55 tronçons homogènes à partir des tests de Pettitt et d'Hubert sur le signal de pente (Annexe 11). Ils ont permis de déterminer les principaux biefs en termes de pentes moyennes, en tenant compte également des affluents, des ouvrages et des biefs court-circuités. Par ailleurs, le profil en long (Figure 3-34) est habillé par différentes observations sur le

chenal que sont les contraintes naturelles, tels que l'emplacement des failles, des affleurements, les réductions du transit de fond, et les barrages.

3.2.1.2. Classification des tronçons en fonction des caractéristiques des formes du lit

L'étude statistique est réalisée afin de classer les tronçons homogènes en pente moyenne en fonction de la proximité géographique de leurs paramètres. En partant du principe que la largeur du chenal influence les paramètres de forme (paragraphe 3.1, p.149) et que la largeur moyenne des tronçons homogènes pouvait fortement varier (de 71-90 m pour les tronçons les plus étroits et les gorges à 470-512 m pour les plus larges et les tronçons aval, cf. Annexe 15), nous avons décidé de prétraiter les données avant de réaliser une analyse statistique (Figure 3-31) :

Calcul des paramètres de la hauteur des formes

Pour chaque tronçon, nous avons calculé la médiane des rapports de l'amplitude et de la longueur d'onde des formes avec la largeur du chenal : médiane de A/W et de λ/W. Ces rapports ont été centrés-réduits pour l'étude statistique. Ces paramètres nous informent sur la hauteur des formes et leur espacement.

Calcul des paramètres de la variabilité des formes

Afin de connaître la variabilité de ces formes, en termes d'amplitude et de longueur d'onde, nous avons calculé, pour chaque tronçon, l'intervalle interquartile des rapports A/W et λ/W. Ils ont été respectivement rapportés à la médiane de A/W et de λ/W.

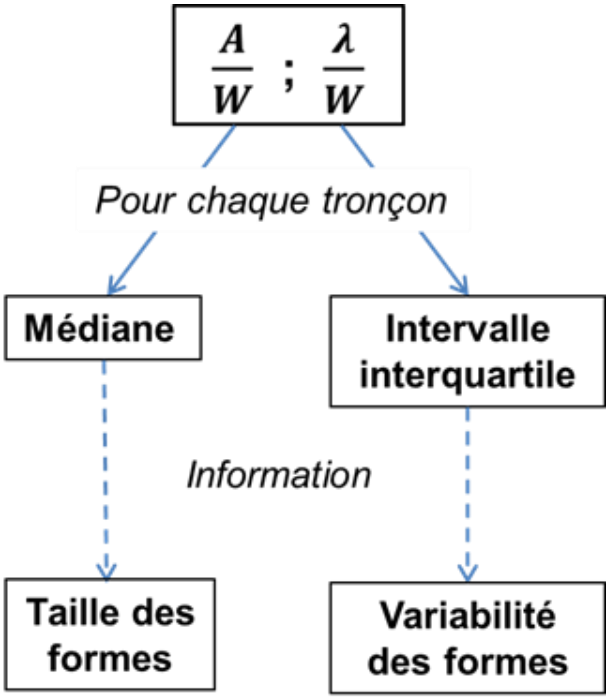


Figure 3-31 : Prétraitement des paramètres physiques pour l'analyse statistique.

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) et une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ont été réalisées sur les quatre paramètres calculés précédemment pour regrouper les tronçons

présentant les mêmes propriétés en matière de formes fluviales. Ces traitements ont été réalisés à partir de données anciennes (des derniers aménagements à nos jours) sur quelques secteurs représentatifs.

3.2.2. La méthode des ondelettes

Une étude de la décomposition du signal du profil en long a été réalisée selon la méthode de décomposition en ondelettes (Vaudor, 2013) afin d'observer l'organisation longitudinale et temporelle des alternances entre les différents faciès, notamment les seuils et les mouilles. Cette méthode consiste en une décomposition du signal de la pente du profil en long, de la forme la plus globale au bruit. Le but de cette étude est de faciliter l'analyse du signal et de déterminer les principales structures du lit du Rhône et leur évolution au cours du temps. L'étude des ondelettes permet d'obtenir une représentation en temps (ici la distance) et en fréquence, ce que ne permet pas la transformée de Fourier (résolution en fréquence et non en temps/distance). L'avantage est que cette décomposition peut s'appliquer à une base différente, pas forcément sinusoïdale.

Dans un premier temps, ce signal a subi deux phases de prétraitement consistant à interpoler le signal tous les 300 m, puis à soustraire la tendance linéaire. Les variations à l'échelle la plus fine (600 à 1200 m) ont ensuite été extraites sous forme de coefficients d'ondelettes. Un algorithme de segmentation appliqué aux séries de coefficients (Whitcher et al, 2010) isole des zones du signal présentant des variabilités (écart-type des coefficients d'ondelettes) significativement différentes. L'analyse distance-fréquence se fait à partir d'une fenêtre glissante prédéfinie (Annexe 12). Il existe une relation entre la largeur de l'enveloppe et la fréquence des oscillations (homothétie de l'ondelette).

En effet, les algorithmes d'ondelettes ont deux composants :

- la fonction d'échelle pour déterminer une version comprimée du signal,
- la fonction d'ondelette pour déterminer les détails supprimés par la fonction d'échelle.

A partir du signal de pente locale, il a été possible d'extraire huit signaux (Annexe 13). L'addition de ceux-ci permet d'approximer le signal de pente d'origine, modulant l'accumulation des erreurs lors de la décomposition (Annexe 14). Avec cette méthode, il est possible de retrouver les différentes structures mises en évidence par la décomposition : des grandes structures au niveau de décomposition le plus haut, aux petites structures au niveau le plus bas.

L'avantage de cette approche est qu'elle ne repose pas sur une mise en tronçons initiale fondée sur des paramètres externes. Dans le cas présent, nous avons en effet réalisé un premier découpage fondé sur les pentes moyennes locales, mais rien n'indique que la périodicité des formes est régie par la pente locale. La comparaison des deux approches peut permettre d'appréhender cette question.

3.3. Evolution longitudinale et temporelle des formes du lit à partir d'une analyse de la moyenne mobile

3.3.1. Extraction des méso-formes à partir du profil en long lissé

Cette étude simplifiée repose sur une caractérisation systématique de toutes les formes. Les paramètres physiques de ces formes en termes de demi-amplitude, d'amplitude et de longueur d'onde ont été

extraits des extrema ainsi détectés. La demi-amplitude rend compte de la taille des formes c'est-à-dire la hauteur des seuils (au-dessus de la moyenne mobile) et la profondeur en valeur absolue des mouilles (en-dessous de la moyenne mobile).

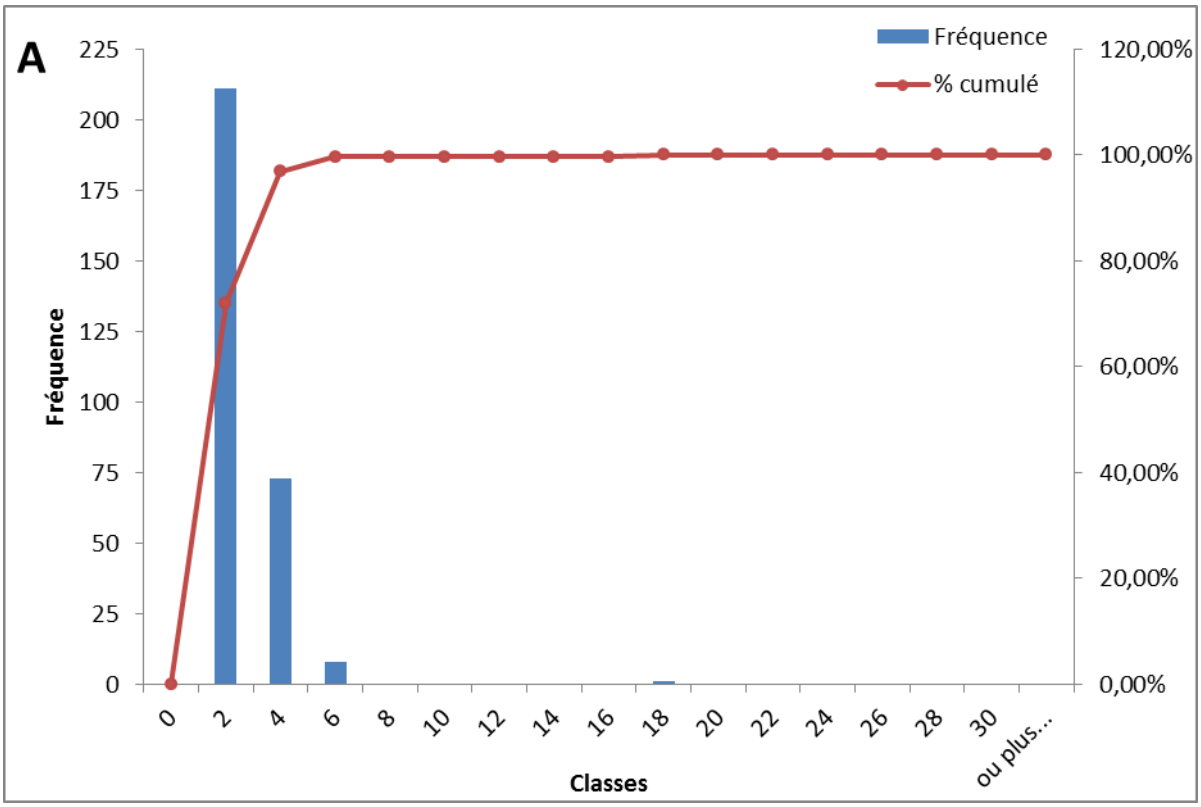
Le Tableau 3-8 met en évidence les valeurs maximales, minimales et moyennes de ces paramètres physiques sur l'ensemble du linéaire. L'amplitude moyenne des formes est de 3,7 m et la longueur d'onde moyenne (ou période dans le tableau) est de 1746 m. On constate, globalement, que la profondeur des mouilles est plus importante qu'en hauteur des seuils : 2,06 m contre 1,64 m.

Amplitude minimale	Amplitude moyenne	Amplitude maximale	Période minimale	Période moyenne	Période maximale
0,11	3,70	44,68	69,01	1745,95	5938,48
Hauteur seuil minimale	**Hauteur seuil moyenne**	**Hauteur seuil maximale**	**Hauteur mouille minimale**	**Hauteur mouille moyenne**	**Hauteur mouille maximale**
0,01	1,64	17,69	0,01	2,06	26,98

Tableau 3-8 : Valeurs minimales, maximales et moyennes des paramètres de formes (amplitude, longueur d'onde et hauteur des seuils et profondeur des mouilles) sur l'ensemble du linéaire. Données en mètre.

Pour mieux comprendre la distribution des gammes d'amplitude des formes, nous avons réalisé un histogramme en fréquence pour chaque type de forme (Figure 3-32). La Figure 3-32 (A) nous montre que 72% des seuils présentent une hauteur de 2 à 4 m, bien plus que pour les mouilles, 61% (B). En comparant les classes de hauteurs supérieures entre (A) et (B), on constate que les mouilles présentent une distribution en fréquence plus forte que les seuils. Les hauteurs moyennes des seuils et des mouilles par tronçon (Figure 3-33) ont mis en évidence qu'en moyenne, 76% des tronçons possédaient des mouilles dont l'amplitude était supérieure à celle des seuils.

La moyenne de chaque paramètre a été calculée par tronçon. Les résultats des calculs ont été regroupés dans l'Annexe 15 et servent aux analyses statistiques des paragraphes suivants. L'ensemble des données brutes a été répertorié dans l'Annexe 16.



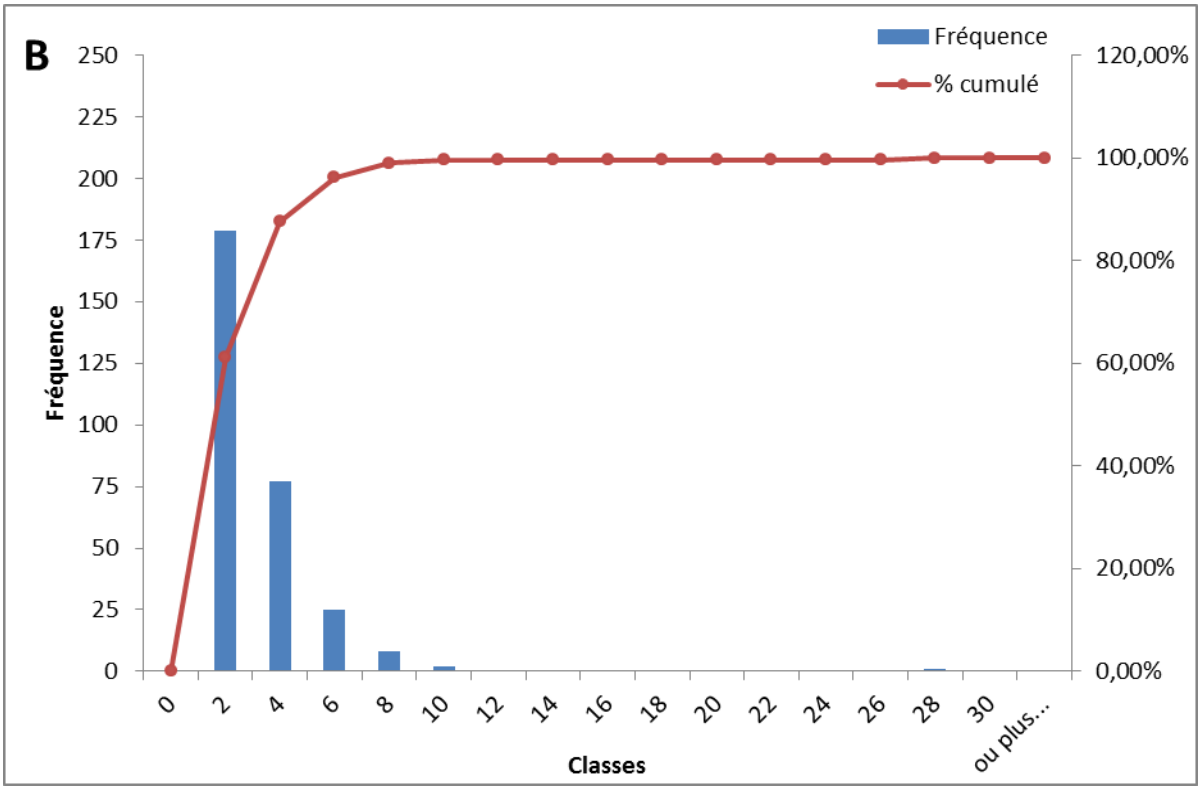


Figure 3-32 : Fréquences de répartition des classes de hauteur (en m) de seuil (A) et de profondeur de mouille (B) et la fréquence cumulée associée sur l'ensemble du Rhône.

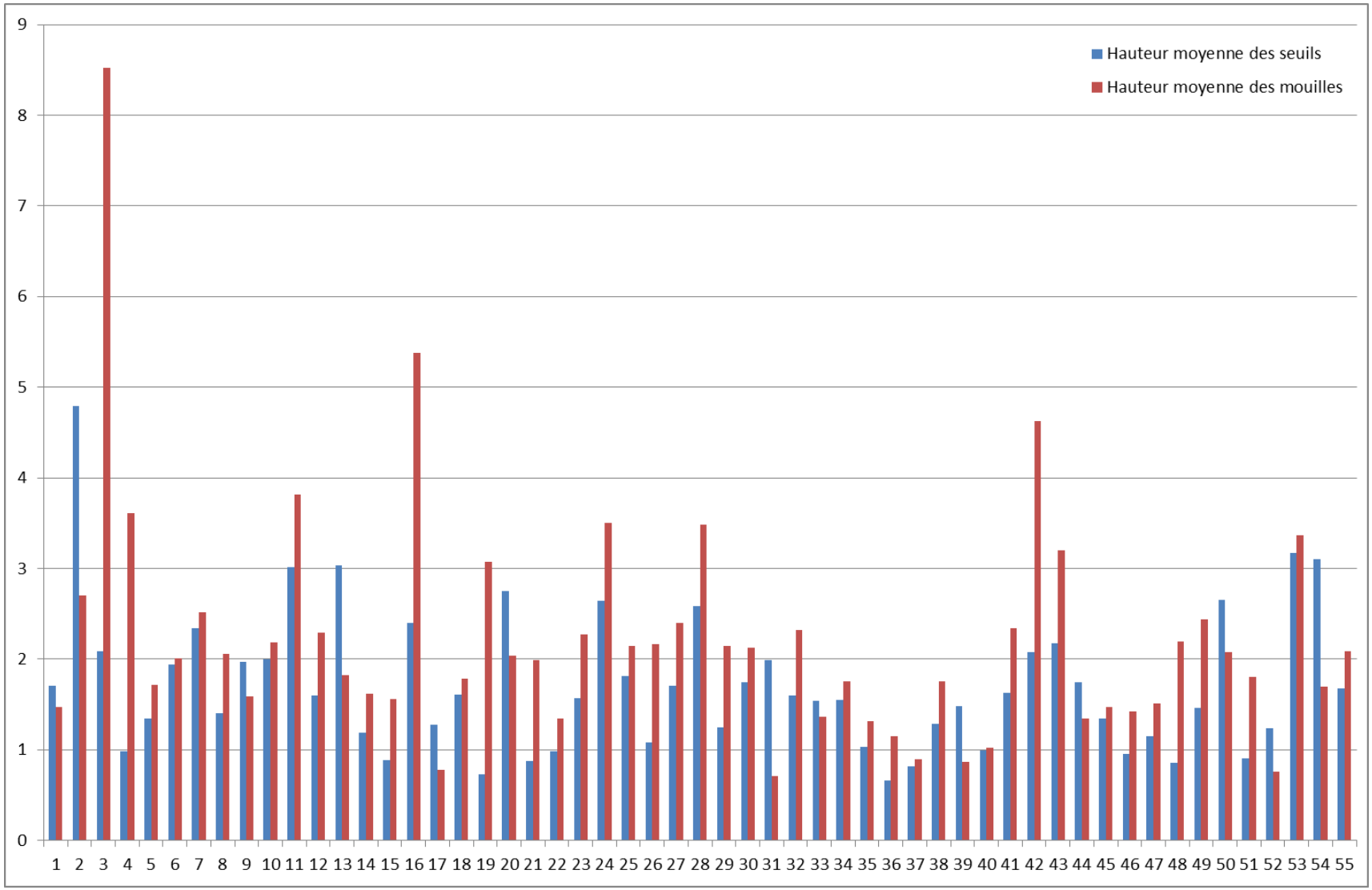


Figure 3-33 : Hauteurs moyennes des seuils et profondeurs des mouilles (en m) par tronçon homogène. Seuil (Hauteur moyenne totale = 1,64 m – Minimum = 0,014 m – Maximum = 17,7 m) – Mouille (Profondeur moyenne totale = 2,06 m – Minimum = 0,008 m – Maximum = 27 m). Pour 76% des tronçons : profondeur des mouilles > hauteur des seuils.

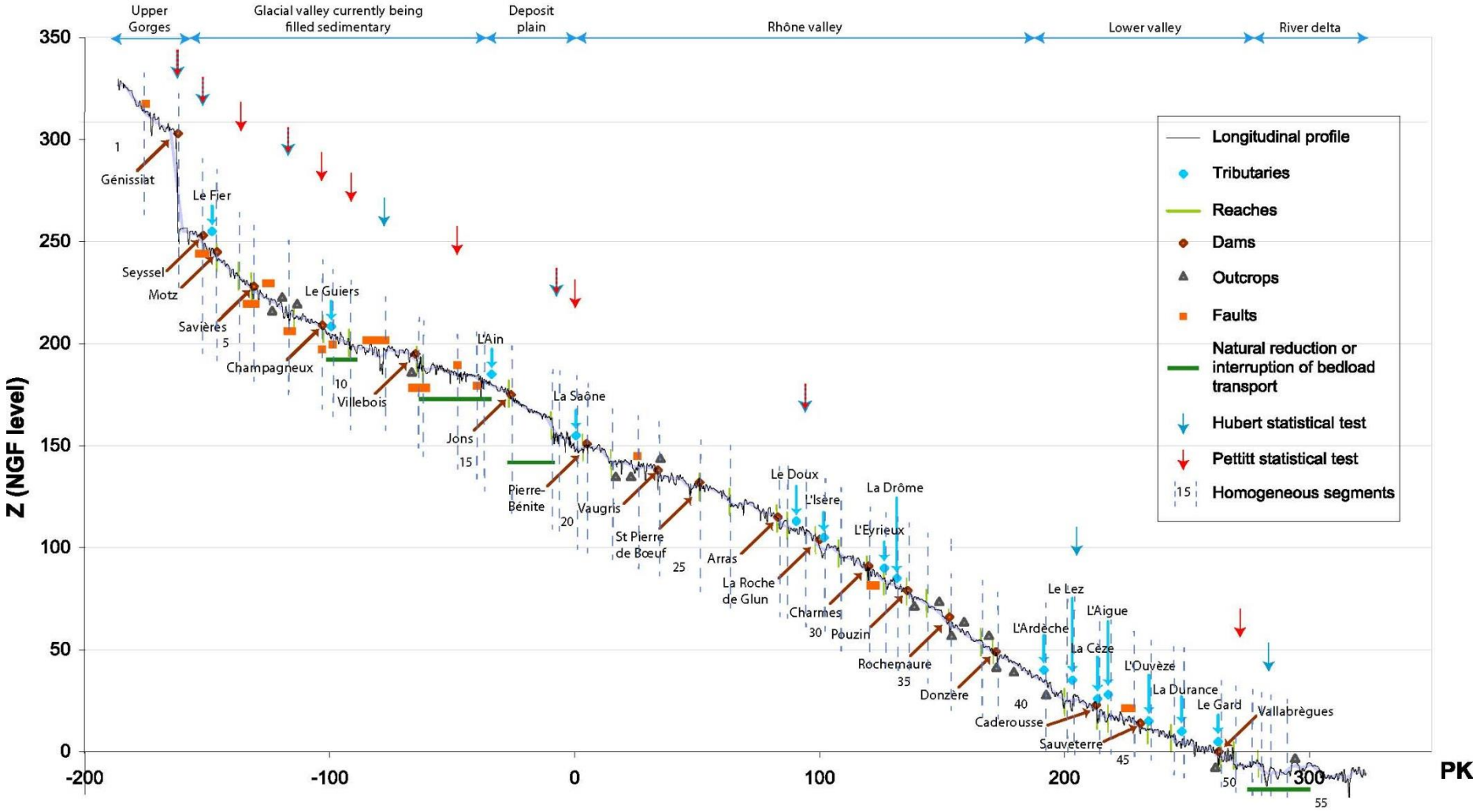


Figure 3-34 : Profil en long du Rhône segmenté en 55 tronçons homogènes en termes de pente moyenne et mise en évidence de sa structure et des différentes contraintes naturelles et anthropiques

3.3.2. Segmentation des tronçons homogènes en fonction des caractéristiques des faciès

L'analyse statistique réalisée sur le profil en long actuel du Rhône permet de proposer une première classification des formes fluviales en fonction des paramètres physiques d'amplitude et de longueur d'onde (Figure 3-35). La classification ascendante hiérarchique met ainsi en évidence trois groupes de tronçons homogènes (clusters).

En projetant ces groupes sur le linéaire du Rhône, on constate une organisation amont-aval des tronçons (Figure 3-36, a) :

- le groupe 3 correspond aux tronçons situés dans la partie amont du Rhône, jusqu'en amont du barrage de Sault-Brénaz, en vert ;
- le groupe 1 correspond aux tronçons situés entre le barrage de Sault-Brénaz et la confluence de la Saône, comprenant la confluence de l'Ain et notamment le secteur de Miribel-Jonage, en gris ;
- le groupe 2 correspond aux tronçons situés à l'aval de Lyon jusqu'à la mer, en rouge.

Il s'agit ici d'une segmentation des grandes tendances morphologiques en fonction de la densité géographique des groupes. Certains groupes peuvent se retrouver au milieu des autres, témoignant de variations locales. Ici, nous ne tenons compte que des variations longitudinales à large échelle.

Les tronçons ont été reclassés par groupe afin de mettre en évidence leurs caractéristiques et de les comparer (Figure 3-37) :

- le Cluster 3 (vert) est caractérisé globalement par des formes de grande taille tant en termes d'amplitude que de longueur d'onde, avec une hauteur médiane de 0,035 et une largeur médiane de 17, et qui présentent une bonne homogénéité inter-forme (faible intervalle interquartile),
- le Cluster 1 (gris) décrit des formes globalement petites, de hauteur médiane de 0,02 et de largeur médiane de 9 mais très variables,
- le Cluster 2 (rouge) montre également des formes globalement de petite taille, avec une hauteur médiane de 0,01 et une largeur médiane de 7,5, mais cette fois assez homogènes (faible intervalle interquartile).

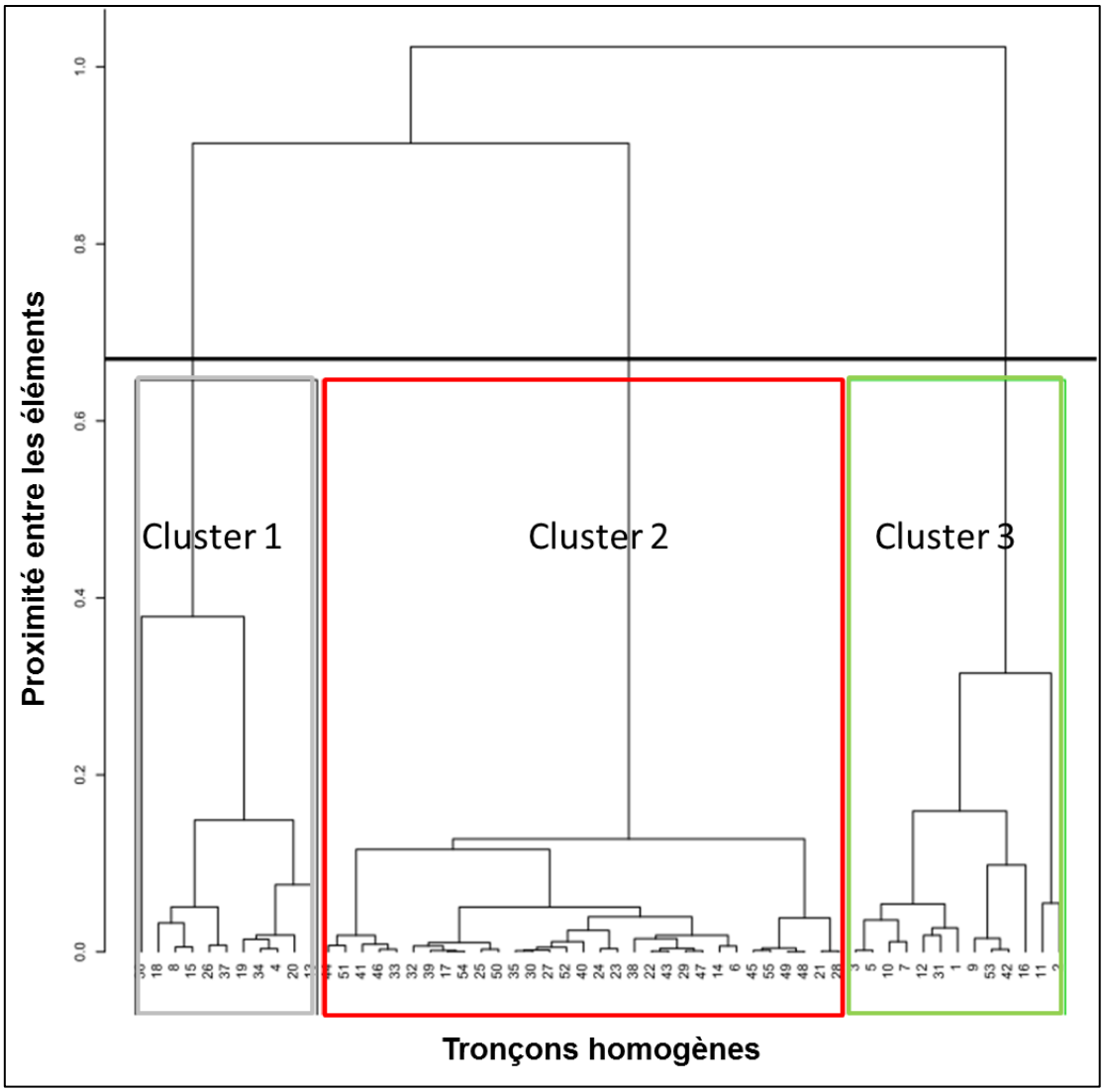


Figure 3-35 : Résultat d'une classification ascendante hiérarchique appliquée sur les composantes d'une ACP regroupant les tronçons homogènes en trois groupes. Les numéros de tronçon sont représentés sur la Figure 3-34

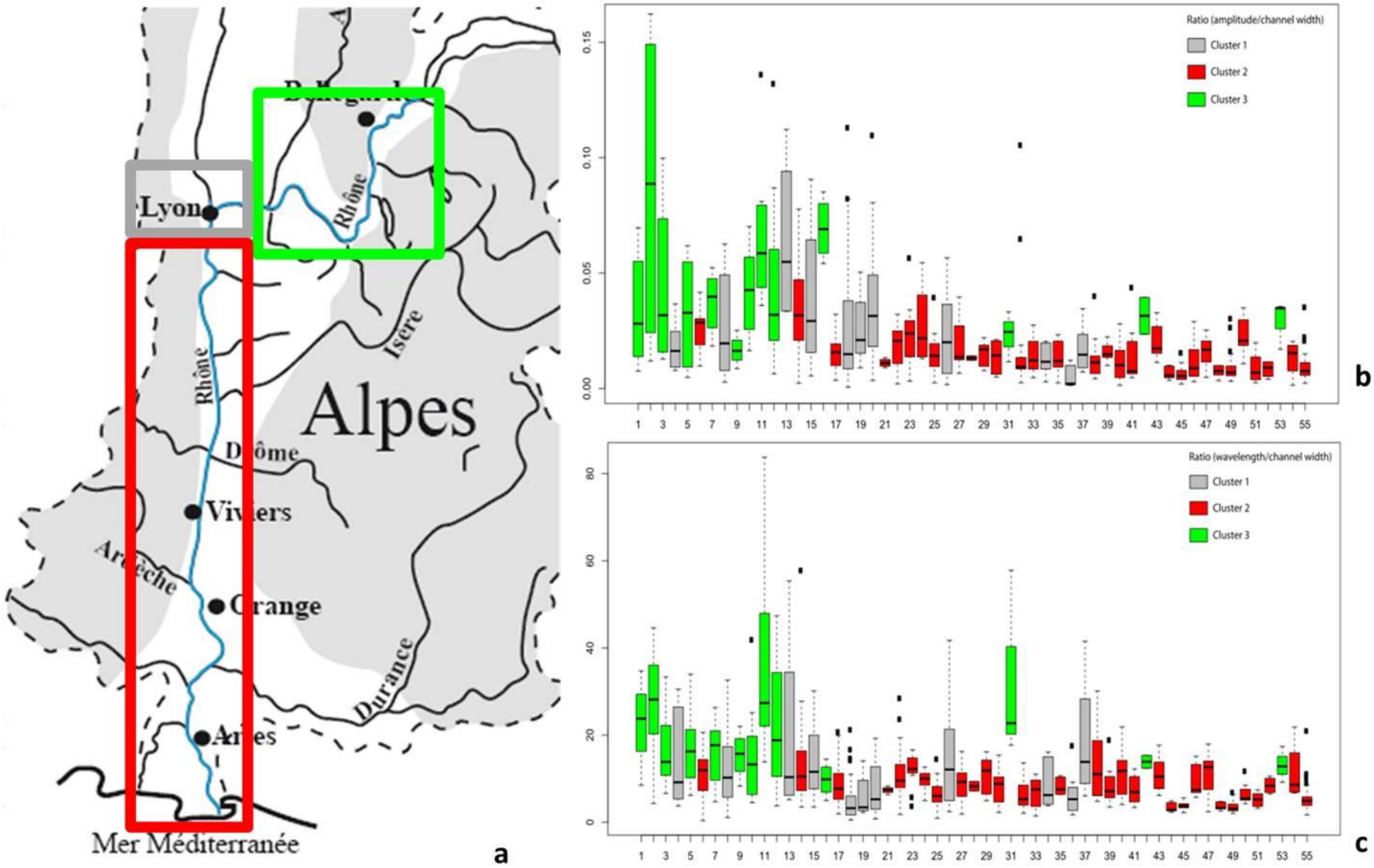


Figure 3-36 : Répartition longitudinale des classes par tronçon homogène : vue schématique sur le linéaire du Rhône en plan (a), par tronçon amont-aval en fonction de l'amplitude (b) et de la longueur d'onde (c) normalisées par la largeur (boîtes à moustaches)

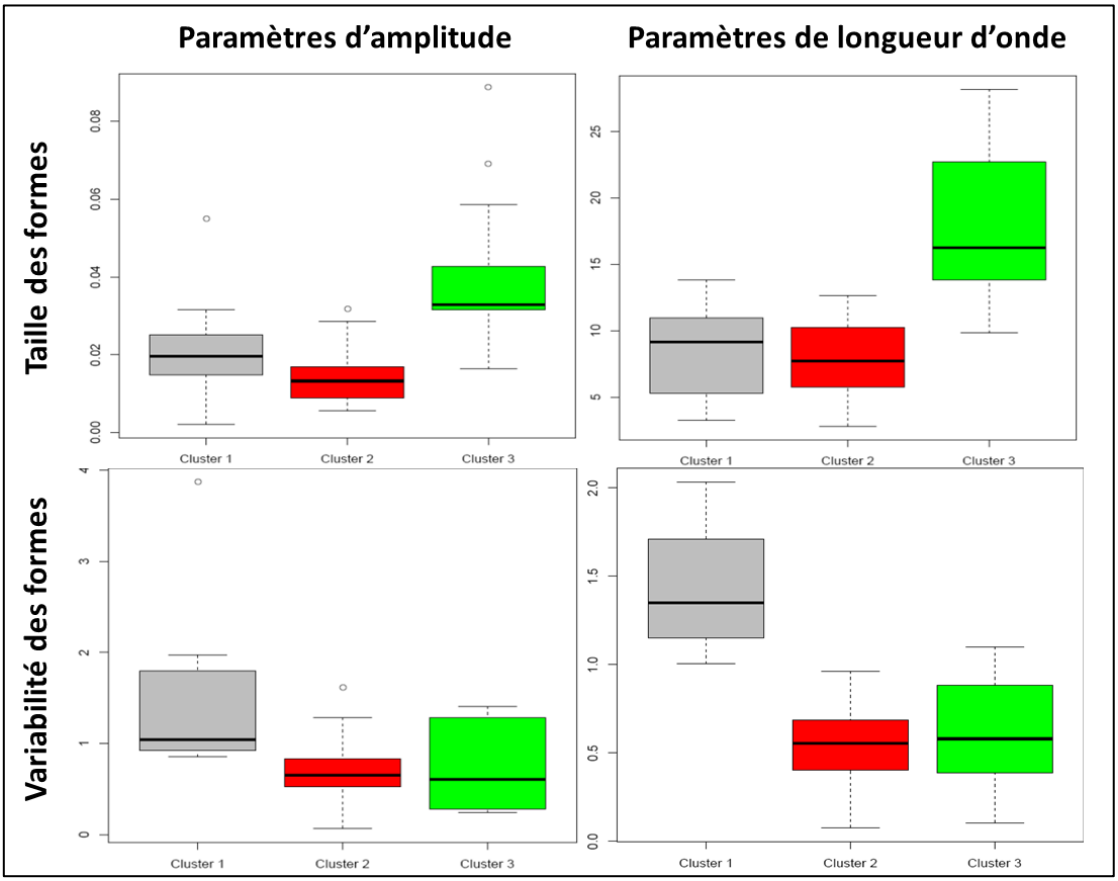


Figure 3-37 : Caractéristiques des clusters en fonction de la taille des formes fluviales et de leur variabilité.

3.3.3. Evolution temporelle des formes du fond sur trois secteurs

Trois secteurs ont été choisis pour une analyse diachronique, localisés respectivement sur le Haut Rhône, le Rhône Moyen et le Bas Rhône : Chautagne, Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon. L'intention est d'avoir trois sites particulièrement représentatifs de la segmentation. Le secteur de Chautagne fait partie du Cluster 3 et celui de Donzère-Mondragon du Cluster 2. Nous n'avons pas pu réaliser cette analyse sur le secteur de Miribel-Jonage, qui fait partie du Cluster 1, faute de données anciennes disponibles. Nous avons donc choisi de retenir le secteur de Pierre-Bénite, qui appartient au Cluster 2 mais reste le plus proche du secteur de Miribel en aval de l'Ain. Enfin, l'intérêt d'étudier ces secteurs tient au fait qu'ils font partie des sites en cours de restauration écologique.

Dans le secteur de Chautagne (PK -145 à -136, Figure 3-38), on constate une diminution de l'amplitude des formes entre 1978 et 2009. Dans le secteur de Pierre Bénite (PK 1 à 15, Figure 3-39), on n'observe pas de réelle évolution des profils en termes d'amplitude ou de longueur d'onde entre 1968 et 2006, de même que dans le secteur de Donzère-Mondragon entre 1953 et 2007 (PK 166 à 201, Figure 3-40).

Nous pouvons alors formuler les hypothèses suivantes :

(1) Les formes fluviales du Rhône amont, si elles se comportent comme sur le secteur de Chautagne, semblent avoir enregistré des changements récents suite aux aménagements comme le montre l'évolution de l'amplitude des formes qui se réduit entre 1978 et 2009 (Figure 3-38). Il n'y a pas

eu d'implantation d'épis Girardon dans ce secteur, mais nous ne disposons pas de données antérieures à 1978 pour analyser les évolutions.

(2) Les formes du Rhône moyen et aval n'ont pas subi sur la période récente d'évolution aussi importante qu'à l'amont, qu'il s'agisse de Donzère-Mondragon ou de Pierre Bénite. Les formes petites et présentant peu de variabilité en taille semblent ainsi figées et stables dans le temps. Il convient d'étudier plus finement les données du début du 20ème siècle afin de vérifier si des ajustements plus précoces (post-aménagements Girardon, et avant les aménagements CNR) peuvent être observés. L'analyse qui suit, réalisée selon la méthode des ondelettes, permet de mieux comprendre ces évolutions.

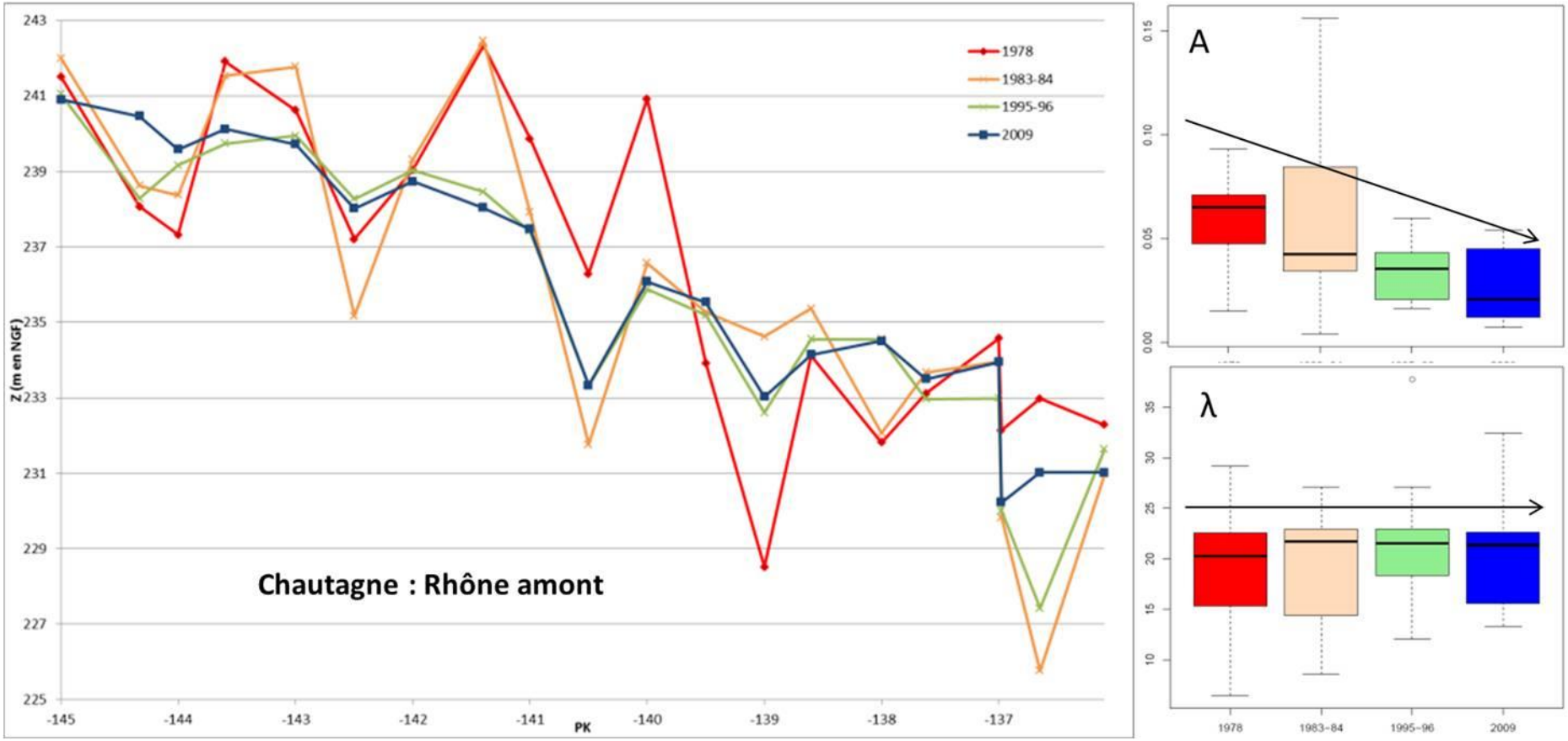


Figure 3-38 : Evolution diachronique des formes fluviales dans le secteur de Chautagne entre 1978 et 2009

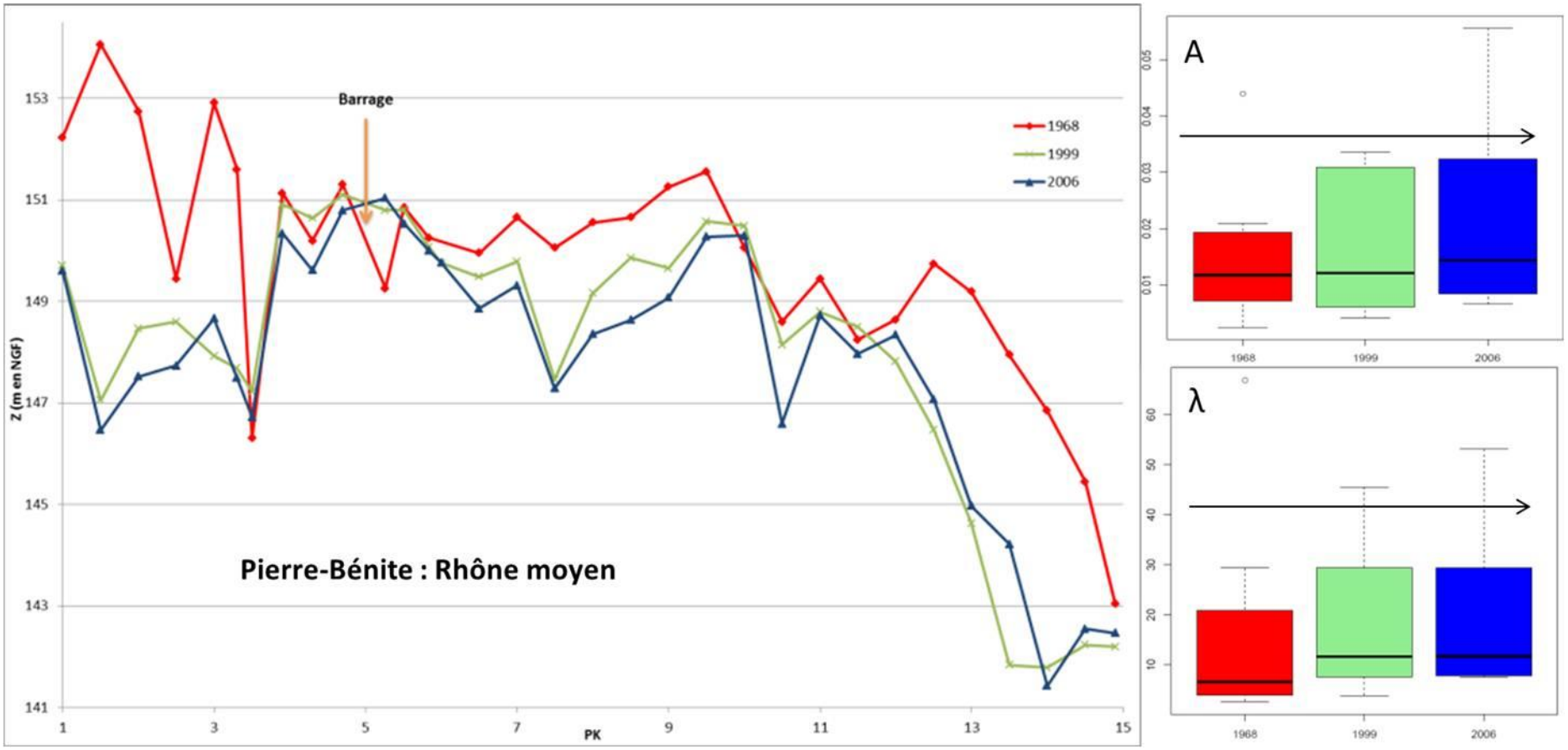


Figure 3-39 : Evolution diachronique des formes fluviales dans le secteur de Pierre-Bénite, entre 1968 et 2006

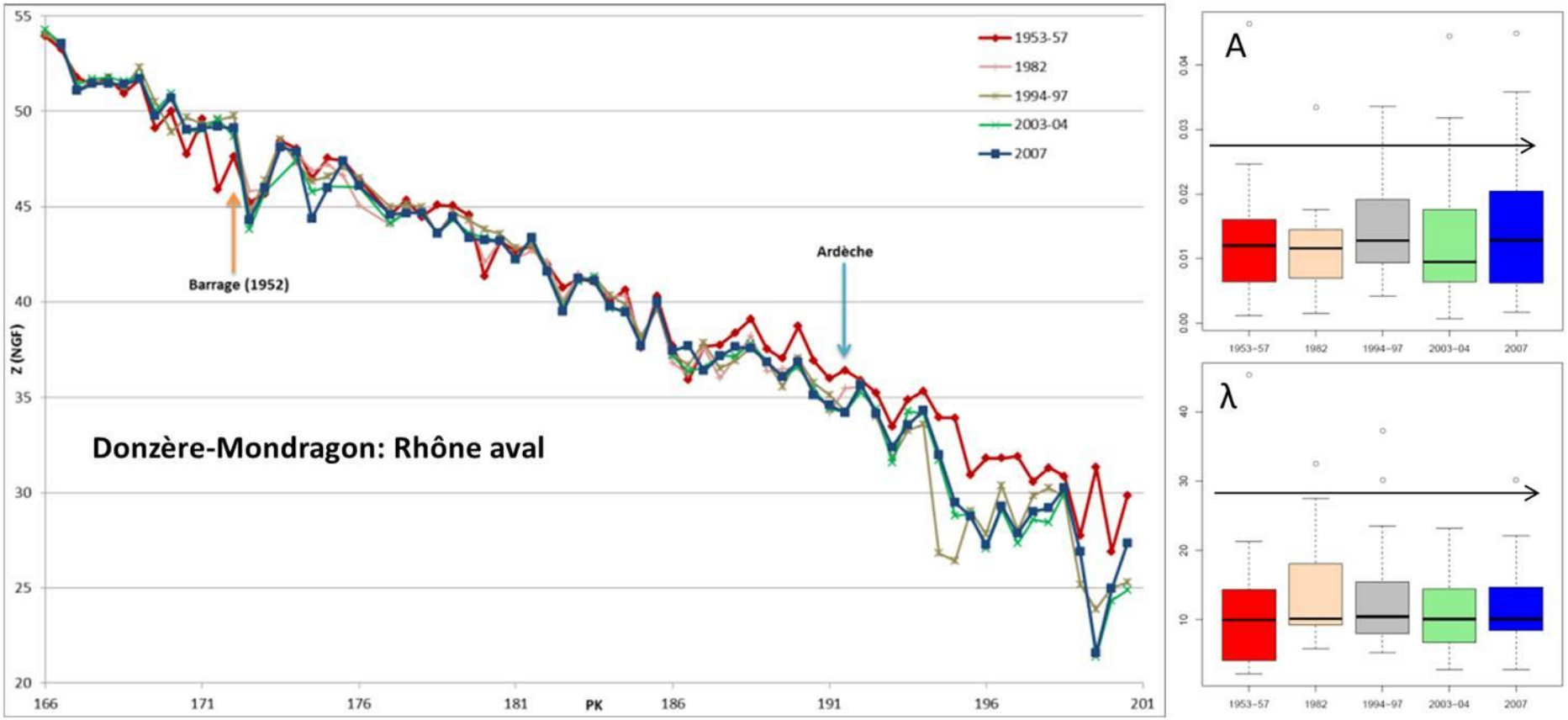


Figure 3-40 : Evolution diachronique des formes fluviales dans le secteur de Donzère-Mondragon, entre 1953-57 à 2007

3.4. Evolution générale des formes du lit entre 1897-1907 et 2011 par la méthode des ondelettes

La zonation du signal est représentée sur la Figure 3-41 pour (a) la période récente et pour (b) la période de construction des casiers Girardon. La valeur des coefficients est interprétée en comparant les tronçons par date uniquement.

Comme l'a montré la segmentation en 55 tronçons homogènes, le continuum rhodanien présente une structuration très segmentée des formes du fond du lit. Ce découpage est différent d'une année d'observation à l'autre, confirmant que les ajustements fluviaux observés au cours du siècle ont également eu des effets sur les formes du lit.

L'organisation des formes en 1897-1907 est relativement simple entre Lyon et la mer (Figure 3-41b). D'après l'analyse, le linéaire se structure longitudinalement en suivant un découpage selon trois grands secteurs : un secteur amont avec des formes de taille intermédiaire de 4 m, un secteur médian avec des formes de petite taille de 1 à 2 m et un secteur aval avec des formes de grande taille de 6 m. Le début du second tronçon semble coïncider avec la confluence de la Drôme.

Sur le profil actuel (Figure 3-41a), les secteurs présentant des formes de grande amplitude et fréquentes sont plus étendus qu'en 1897-1907. L'écart-type des différences altimétriques locales entre Lyon et la mer est ainsi de 4,69 m actuellement contre 1,69 m au début du 20ème siècle. Six secteurs sont caractérisés aujourd'hui par des formes fluviales fréquentes et de grande amplitude (secteurs 2, 4, 6, 12 et 14), trois secteurs ont au contraire des formes moins marquées (7, 9 et 11). On ne retrouve pas exactement la régionalisation obtenue précédemment à partir des 55 tronçons par classification car on considère l'ensemble du linéaire et non plus des segments homogènes. Les effets locaux se répercutent alors sur la caractérisation de l'organisation longitudinale. On remarque néanmoins que les secteurs à l'aval de Lyon, définis par des formes fluviales de grande amplitude et fréquentes, correspondent approximativement aux effets locaux soulignés dans la classification précédente, c'est-à-dire aux quelques tronçons présentant des formes fluviales de grande amplitude et fréquentes à l'aval de Lyon.

Les grandes formes fluviales rappellent une morphologie assez typique de grands fleuves de plaine alors que les secteurs aux formes de moindre amplitude font penser à des secteurs à fort transport solide présentant des bancs de galets en transit ou au contraire à des secteurs s'écoulant sur le substratum et où la construction des formes est contrainte. Ces formes ont aussi été exacerbées par les différents dragages. Le lit actuel semble ainsi avoir perdu les caractéristiques d'un cours d'eau alpin à transport solide marqué. Les apports de la Drôme n'influencent plus vraiment la morphologie du fleuve et de grands secteurs fluviaux présentant des formes de grande amplitude sont maintenant présents à l'amont (secteur de Sault-Brénaz-Jons) dans le secteur de Vienne-Péage de Roussillon ou encore à l'aval de l'Ardèche. Seul le secteur à l'aval de l'Ain présente encore des formes de petites tailles en lien avec un transport solide actif. La structuration longitudinale observée semble indépendante de la position des barrages, ce qui confirme que ces ajustements résultent d'autres facteurs et étaient sans doute déjà effectués lors de leur construction.

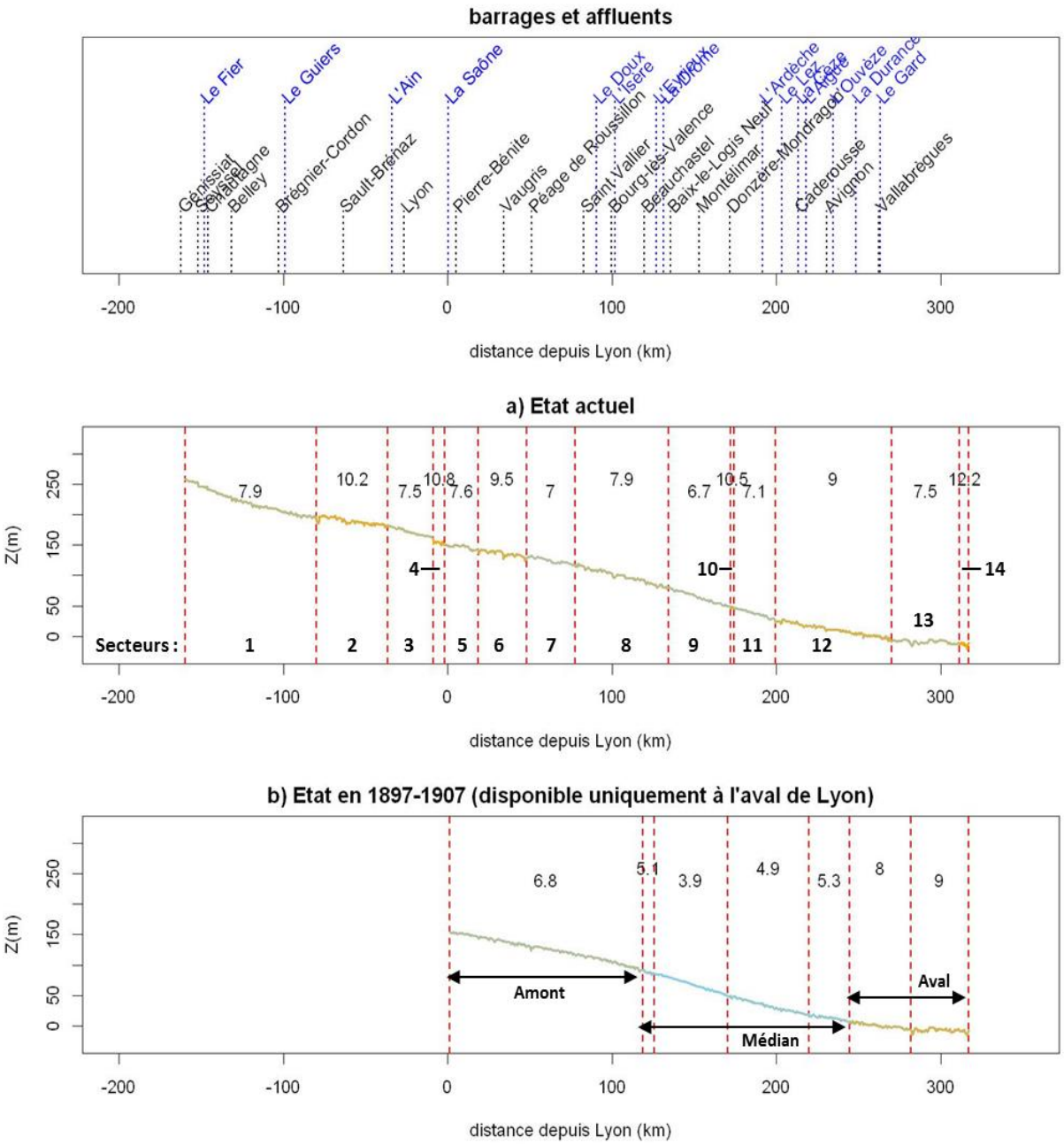


Figure 3-41 : Organisation longitudinale de la morphologie du fond du lit du Rhône observée à partir de l'analyse de la variabilité de l'altitude à l'échelle locale (tous les 500 m). L'axe des ordonnées représente l'altitude et l'axe des abscisses la distance amont – aval (le 0 étant à Lyon). Les valeurs indiquées correspondent aux écarts-types moyens des coefficients d'ondelettes sommés pour les échelles 600m et 1200m. a) Etat actuel, b) Etat en 1897-1907 (disponible uniquement à l'aval de Lyon). Réalisée par Vaudor, 2013.

4. Conclusions de l'analyse de l'évolution verticale du lit du Rhône

Ce chapitre a permis d'effectuer une analyse longitudinale de la bathymétrie du lit en termes de variations altimétriques et d'évolution des faciès dans le temps et dans l'espace. Les facteurs responsables des changements morphologiques du chenal du Rhône sont nombreux, complexes et se cumulent parfois au cours de la même période, parfois se superposent aux impacts antérieurs...

Ce qui est certain, c'est que les incisions ont, dans un premier temps, été engendrées par la construction des ouvrages Girardon, qui ont augmenté la capacité de transport du lit notamment à l'amont à la hauteur de Pierre-Bénite, alors qu'aucune charge supplémentaire n'était disponible. Cette partie est ainsi plus incisée et a sans doute alimenté le secteur aval en sédiments, permettant alors de minimiser le déficit sédimentaire apparu avec la nouvelle capacité de transport. Ce qui explique que malgré de gros aménagements, l'incision reste limitée. Une plus forte incision à l'amont d'une section chenalisée a aussi été observée sur le Rhin dans la plaine d'Alsace (Arnaud, 2012). Ces incisions ont ensuite été exacerbées par des extractions locales, des dragages ou encore par des fosses de dissipation à l'aval immédiat de barrages.

Ces évolutions altimétriques se sont accompagnées d'une transformation de la géométrie des formes du lit. Des formes de plus en plus marquées sont maintenant observées sur un plus long linéaire. Cette modification semble indiquer que la charge de fond en transit, qui se caractérise par des formes fluviales de plus faibles amplitudes, est moins abondante. Cette identité alpine s'atténue au profit d'un fleuve de plaine, aux formes plus profondes et présentant de moindres vitesses. Cette évolution a sans doute été favorisée par les ouvrages Girardon et les extractions. L'organisation longitudinale de ces formes ne se calque donc pas sur la position des barrages.

Il est essentiel de prendre en compte les facteurs hydrauliques, notamment les forces tractrices critiques et leur fréquence, afin de compléter les interprétations sur l'organisation longitudinale du fond du chenal du Rhône. C'est ce que nous chercherons à faire dans le chapitre 5. La caractérisation granulométrique sera réalisée dans le chapitre 4 et permettra de calculer dans le chapitre 5 le seuil de mise en mouvement par bief, à l'aide du modèle hydraulique unidimensionnel MAGE construit par l'IRSTEA de Lyon.

4e Chapitre : *Caractérisation actuelle de la granulométrie du lit entre le Léman et la Méditerranée*

1. Intérêt de l'étude de la granulométrie des fonds

Le chapitre 1 a permis de décrire le fonctionnement général d'un cours d'eau et le chapitre 2 de définir le système fluvial du Rhône. Le Rhône est un système alluvial ; il dessine son lit dans les sédiments dans lesquels il s'écoule, reflétant ainsi l'équilibre entre le matériel fourni par le bassin versant et la capacité de transport du fleuve. Cette partie se focalise plus spécifiquement sur l'influence et le comportement de la charge sédimentaire dans le fonctionnement du cours d'eau.

1.1. Définition de la granulométrie

Un cours d'eau alluvial transporte des sédiments, c'est-à-dire des matériaux granulaires, pouvant provenir du bassin versant, des berges du lit mineur ou du fond du lit. Le bassin versant est soumis sur toute sa surface à une érosion dite aréolaire (sous l'effet du vent, de la pluie, de la fonte des neiges et des cycles de gel et dégel) et produit des sédiments fins (sables, limons, argiles) dont la majorité sera stockée dans le bassin et seule une partie parviendra au réseau hydrographique. Le bassin versant montagnard présente des formes d'érosion ou de transport plus localisées (avalanches, glissements de terrain, laves torrentielles) pouvant produire brutalement des matériaux très grossiers. L'érosion des berges et du fond du lit est dite linéaire du fait qu'elle persiste dans le temps et dans l'espace, mettant en jeu des forces plus importantes que l'érosion aréolaire. Le substrat peut être considéré comme une variable indépendante (Schumm, 1977), car liée aux caractéristiques du bassin et à la distance depuis la source, mais aussi comme une variable de réponse puisque l'organisation granulométrique des sédiments peut être conditionnée par les variables de contrôle (détaillées dans les paragraphes suivants).

Le fond du lit d'un cours d'eau est composé de sédiments caractérisés par deux paramètres principaux, qui sont la densité et la taille. La densité du matériau varie peu au sein d'une rivière, entre 2,5 et 2,8 (sans unité, rapport de la masse volumique de la roche en kg/m^3 sur la masse volumique de l'eau en kg/m^3). Les matériaux les plus courants sont les granites et les calcaires, d'une densité de 2,65 environ. La plupart des fines sont des matériaux cohésifs qui s'agrègent sous la forme de flocs de densité faible, entre 1 et 1,2 environ. La taille d'une particule se caractérise dans toutes les dimensions. Corey (1949) définit un coefficient de forme en supposant la particule ellipsoïdale, tel que :

$$csf = \sqrt{\frac{c}{ab}}$$

Les paramètres a, b et c sont respectivement les axes majeur, médian et mineur de la particule (Figure 4-1). La taille des sédiments est déterminée par la mesure de l'axe b et classée par gammes granulométriques définies à partir de l'échelle de classification de Wentworth (1922) (Annexe 17).

Les caractéristiques granulométriques dépendent en premier lieu de la géologie du bassin versant et de l'évolution climatique récente, c'est-à-dire durant l'Holocène (entre 12 000 BP et aujourd'hui). Ces apports sédimentaires dépendent du taux d'altération du substrat géologique et du type d'utilisation des sols (agriculture, urbanisation, exploitations…) (Wasson et al., 1998).

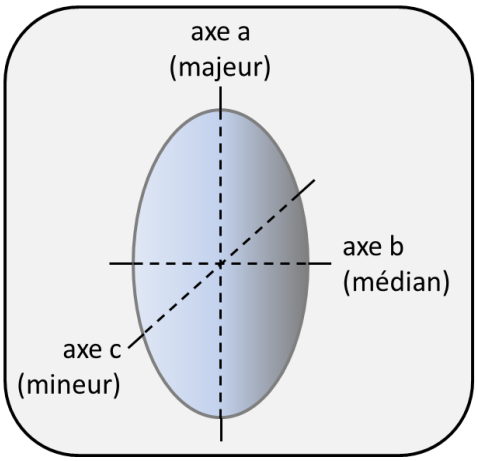


Figure 4-1 : Caractérisation des axes principaux d'une particule (E. Parrot).

1.2. Granulométrie et transport solide

On parle de transport sédimentaire lorsque la force exercée sur les particules est suffisante pour les déplacer, ce qui le qualifie de phénomène à seuil. On distingue la suspension intrinsèque (*wash load*), considérant les particules qui ne sont jamais en contact avec le lit, du transport solide de fond (*bed material load*). Celui-ci peut se décliner en trois modes de mise en mouvement :

- La charge de fond (*bed load*) correspond au déplacement des sédiments restant étroitement en contact avec le fond du lit.
- La suspension (*suspended load*), par laquelle les particules sont essentiellement entrainées par le courant turbulent dans toute la section de l'écoulement, mais peuvent aussi échanger avec le lit.
- Le charriage intense (*sheet flow*) a lieu lorsque l'écoulement est important, entrainant le transport sur une couche d'épaisseur égale à plusieurs diamètres de grain.

Le transport solide peut se subdiviser en deux grandes catégories, la suspension et le charriage, et en une catégorie intermédiaire du charriage, la saltation (Figure 4-2-a).

La suspension correspond au déplacement des sédiments au sein de l'écoulement et à leur maintien dans la colonne d'eau grâce à la turbulence. Une particule, dans le cas d'un transport en eau calme, chute sous l'action de son poids, à une vitesse qui est fonction de son diamètre et de la viscosité cinématique de l'eau. Dans le cas où le sédiment est entrainé par le courant et que l'écoulement est turbulent, si la turbulence verticale (dirigée vers le haut) est supérieure à la vitesse de chute du sédiment, alors celui-ci est maintenu en suspension durant un certain temps. La suspension est observée seulement dans des écoulements turbulents. Il est possible de maintenir une charge en suspension sur de grandes distances à condition que les grains soient suffisamment petits (de l'argile aux sables), leur vitesse de chute étant compensée par les variations verticales des vitesses d'écoulement. Les particules se déplacent alors à une vitesse proche de celle du courant.

Le charriage correspond à la translation des particules en contact étroit avec le fond. Lorsque le fond du cours d'eau comporte des sédiments mobilisables sous l'action d'une force, le courant provoque alors leur arrachement et leur entraînement en masse si le matériau n'est pas cohésif (dans le cas contraire, la force d'entraînement sera plus faible que l'arrachement). La vitesse moyenne d'un sédiment charrié est bien plus faible que la vitesse moyenne du courant. L'effet des forces

hydrodynamiques exercées par l'écoulement se traduit sur les particules par un mouvement de saltation, de roulement ou de glissement (Bagnold, 1973). Sous l'action de la force de trainée du fluide, les particules se déplacent à la surface du lit tout en restant en contact permanent avec celui-ci (Graf et Altinakar, 1996). Le charriage est ainsi caractérisé par le cisaillement effectif à la surface du lit. La saltation fait partie du charriage même si elle s'en distingue par le type et la hauteur de déplacement effectué par le sédiment dans la colonne d'eau (Figure 4-2-a). La saltation caractérise le mouvement circulaire exécuté lors de la chute des particules en suspension plus grossières vers le fond, notamment des sables. Là où la saltation rejoint le charriage c'est que, contrairement au transport aérien, les sédiments qui rentrent en contact avec le fond n'ont pas emmagasiné, lors de leur saut, l'énergie nécessaire pour rebondir et remettre en mouvement par collision d'autres particules logées sur le lit. Lors du transport liquide, la quasi-totalité de l'énergie est dissipée à travers le fluide, maintenant les sédiments en contact avec le fond.

Le transport par charriage et celui s'exerçant par suspension ont des influences très différentes sur la géométrie du lit. Les matériaux en suspension n'ont pas (ou très peu) d'interaction avec les matériaux du fond (à l'exception des sables) ; ils ont par conséquent un rôle morphogène peu important dans le lit mineur. En revanche, leur rôle est important en lit majeur. Les matériaux transportés par charriage sont en interaction permanente avec le lit, influençant alors la morphologie du chenal.

La dichotomie charriage-suspension est principalement liée à la taille et à la densité des particules transportées par rapport à la vitesse du courant à laquelle elles sont soumises. Dans le cas de particules fines, la vitesse de chute reste inférieure à la vitesse de frottement, contrairement aux sédiments plus grossiers où la vitesse de chute devient plus importante. La distinction entre charriage et suspension pour un même écoulement dépend de la taille des particules. Dans les rivières à charge graveleuse, dont le diamètre médian des sédiments (D_{50}) est supérieur à 2 mm (Bunte et Abt, 2001), les formes fluviales sont façonnées par la charge de fond. Cette charge correspond à l'ensemble des particules sédimentaires transportées par le cours d'eau en restant au contact du fond (Bravard et Petit, 1997 ; Knighton, 1998), et donc transportées par charriage, roulement ou saltation. En général, la charge de fond correspond aux particules de diamètre supérieur à 0,062 mm (Knighton, 1998), à partir des sables (d'après la classification des sables de Wentworth, 1922). En deçà de ce diamètre, les particules sont transportées par suspension. En fonction des systèmes étudiés, la limite de diamètre permettant de définir les matériaux grossiers varie de 2 mm (Lefort, 1991) à 8 mm (Bunte et Abt, 2001). La courbe de Hjulström (1935, Figure 4-2b) présente une limite nette au niveau du couple diamètre 0,5 mm/vitesse 20 cm/s, que certains interprètent comme une limite charriage/suspension. Un sable de 0,5 mm de diamètre peut néanmoins être transporté en suspension pour des vitesses plus importantes.

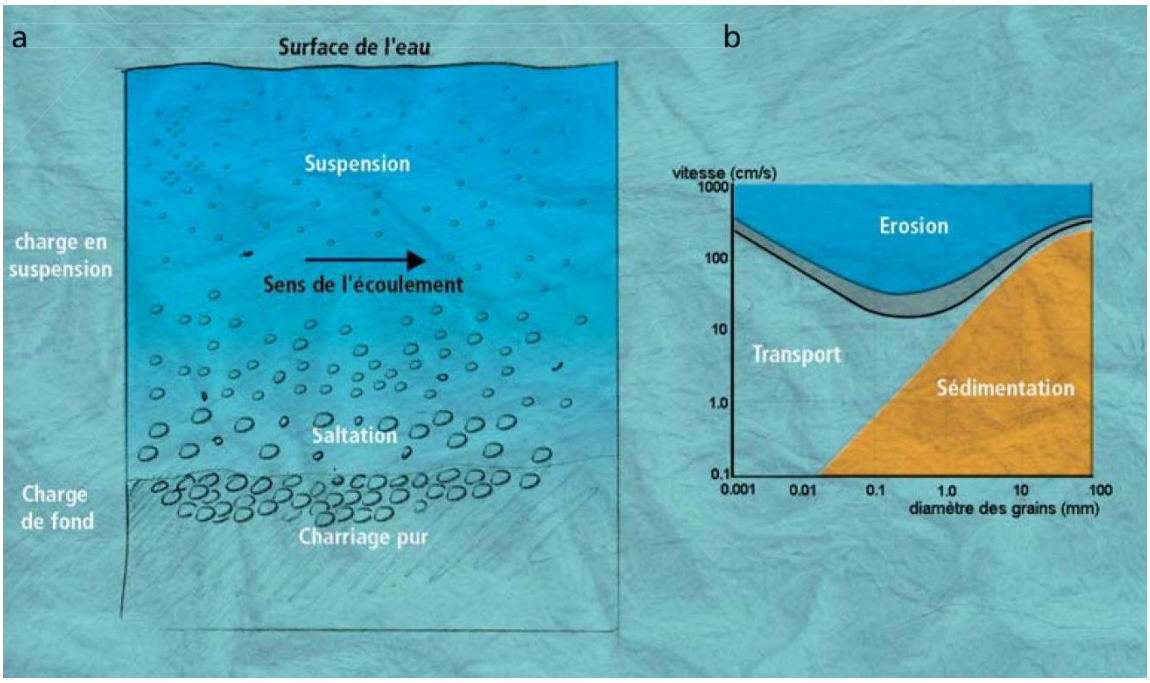


Figure 4-2 : a) Dichotomie charriage-suspension. b) Courbe de Hjulström (1935). D'après Malavoi et Bravard (2010)

1.3. Le patron granulométrique

1.3.1. Spatialité : de l'échelle locale au patron longitudinal

L'organisation longitudinale de la granulométrie permet de connaître les conditions de transport (en rapport avec l'hydraulique) et, par la suite, les problèmes de gestion des stocks sédimentaires, induits par l'anthropisation du cours d'eau, qui sont associés. De plus, la granulométrie du substrat, ainsi que d'autres paramètres structurels et fonctionnels (vitesse, hauteur d'eau, pente…) permettent une caractérisation plus précise des unités morphologiques. La nature du substrat fait partie des facteurs influençant les biocénoses fluviales. Le développement de certaines espèces dépend en partie de la granulométrie (parfois de manière spécifique). La composition du fond du lit, à un endroit donné, dépend de plusieurs facteurs dont les effets peuvent être combinés. La granulométrie peut être le résultat de l'expression d'un héritage, des apports sédimentaires fournis par le bassin versant, par les affluents ou par érosion latérale, de la capacité du transport actuel.

1.3.1.1. Patron local à l'échelle des faciès morphologiques

L'érosion du fond et des berges, le transport et le dépôt de la charge alluviale constituent l'ensemble des processus hydromorphologiques responsables de la formation des faciès morphologiques (ou formes fluviales), définis alors comme des faciès d'écoulement. Nous nous intéressons à trois types de faciès, dans le cadre de notre étude : les bancs, les seuils (ou radiers) et les mouilles. Ceux-ci sont considérés comme des méso-habitats pour les biocénoses aquatiques.

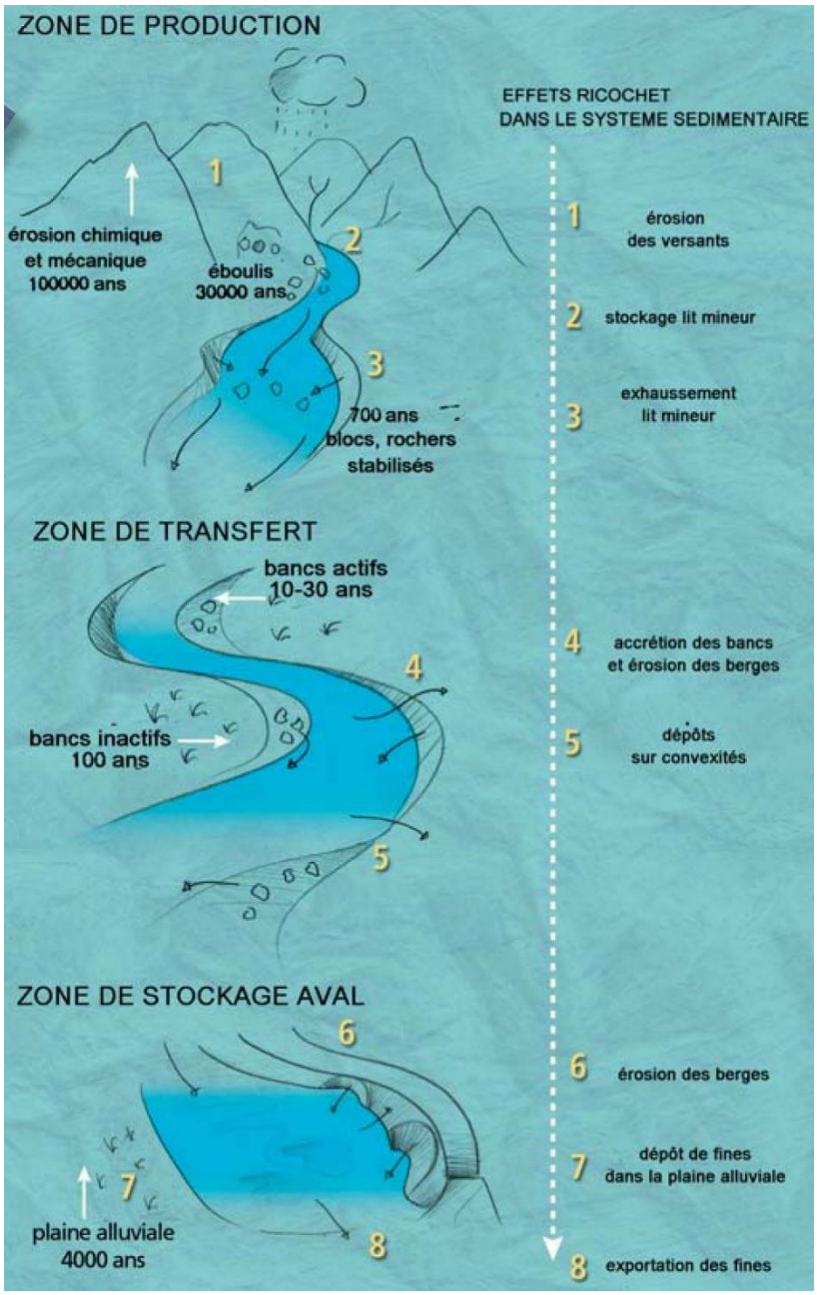


Figure 4-3 : Production, transfert et stockage de la charge de fond, d'après Sear et Newson (1993) et modifié par Malavoi et Bravard (2010). Les durées de stockage indiquées sont des ordres de grandeur.

Les bancs représentent un milieu de stockage naturel des matériaux en transit (Malavoi et Bravard, 2010), situés par exemple sur les convexités dans le cas de cours d'eau à méandres (Figure 4-3 & Figure 4-4). Le stockage peut être temporaire (de l'ordre du mois à l'année) sur la partie dite active des bancs (externe), car les matériaux sont remaniés et sont transportés en aval. Sur la partie inactive des bancs (interne), le stockage est plus long (de quelques années à plusieurs dizaines d'années), le transport solide étant limité par le développement de la végétation et la progression latérale du banc, qui réduit progressivement la fréquence des contraintes critiques dans la zone interne de la convexité. Le temps de stockage de la charge de fond en transit peut ainsi varier lors de son parcours vers l'aval (Figure 4-3). Si la quantité de sédiments est importante, les bancs ainsi créés peuvent être jointifs (propagation des formes vers l'aval, se rapprochant du style en tresses). Tandis que si la quantité de sédiments est faible, les formes de dépôt sont disjointes (migration des formes de façon isolée).

En général, les seuils et les mouilles sont des formes caractéristiques, résultantes d'une auto-organisation des cours d'eau à graviers qui possèdent un débit suffisant pour permettre le transport des sédiments (Milne 1982). Ces séquences se comportent comme des ondulations dans le talweg (profil longitudinal, Figure 4-5, en haut), où les mouilles, composées de matériaux fins, correspondent aux points bas du profil, et les seuils, constitués de matériaux grossiers, correspondent aux points hauts. Le dépôt sédimentaire dans les mouilles s'effectue généralement en période d'étiage (*low water surface/flow*, Figure 4-4 & Figure 4-5), quand les vitesses d'écoulement sont suffisamment faibles pour permettre la sédimentation des fines. Les seuils forment les zones du cours d'eau où se dépose la fraction la plus grossière de la charge de fond, quand les vitesses du courant sont relativement fortes pour permettre le charriage et le départ des particules plus petites (*high water surface/flow*, Figure 4-4 & Figure 4-5). Le tracé en plan du chenal (Figure 4-5, en bas), permet de définir les faciès d'écoulement comme des unités morphologiques en trois dimensions, formant le trio « mouille-seuil-banc » (Church et Jones, 1982).

La modification des facteurs de contrôle, c'est-à-dire les débits liquides et/ou débits solides, peut directement affecter les faciès morphologiques par la variation des vitesses d'écoulement, de la granulométrie, de la largeur ou des profondeurs. Ces perturbations provoquent inévitablement l'altération des habitats et des biocénoses associées. Le cas de la fixation des formes fluviales, provoquée par la diminution du transport solide, est à l'origine de perturbations écologiques affectant le dynamisme des écosystèmes aquatiques et terrestres (groupements forestiers statiques appartenant aux stades âgés des successions végétales alluviales, fond du lit très grossier défavorable à la faune piscicole) (Peiry, 2003).

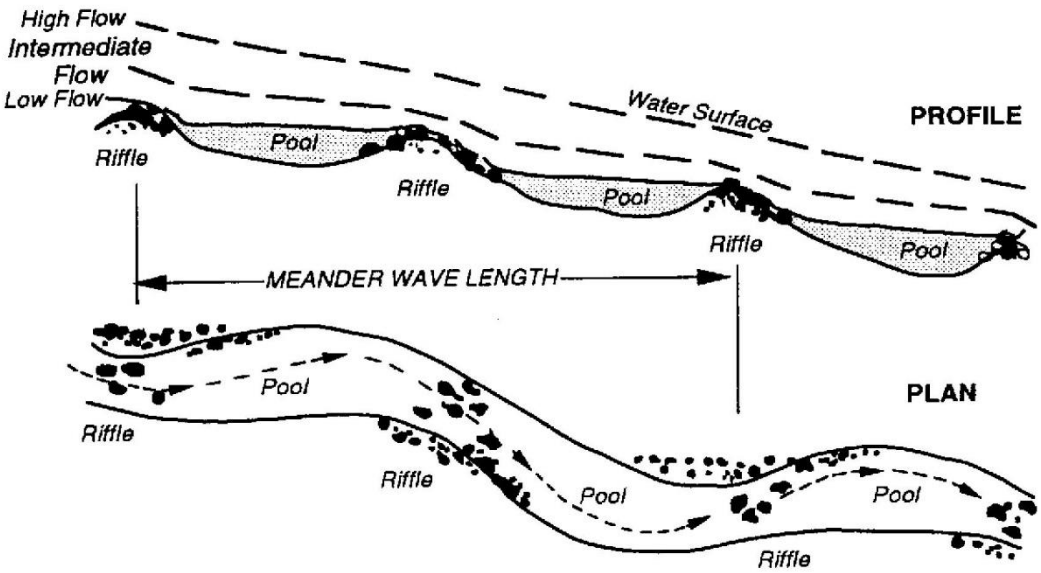


Figure 4-4 : Vue longitudinale (en haut) et planimétrique (en bas) d'une séquence seuil-mouille. Le seuil est localisé au droit du banc. D'après Newbury et Gaboury (1993).

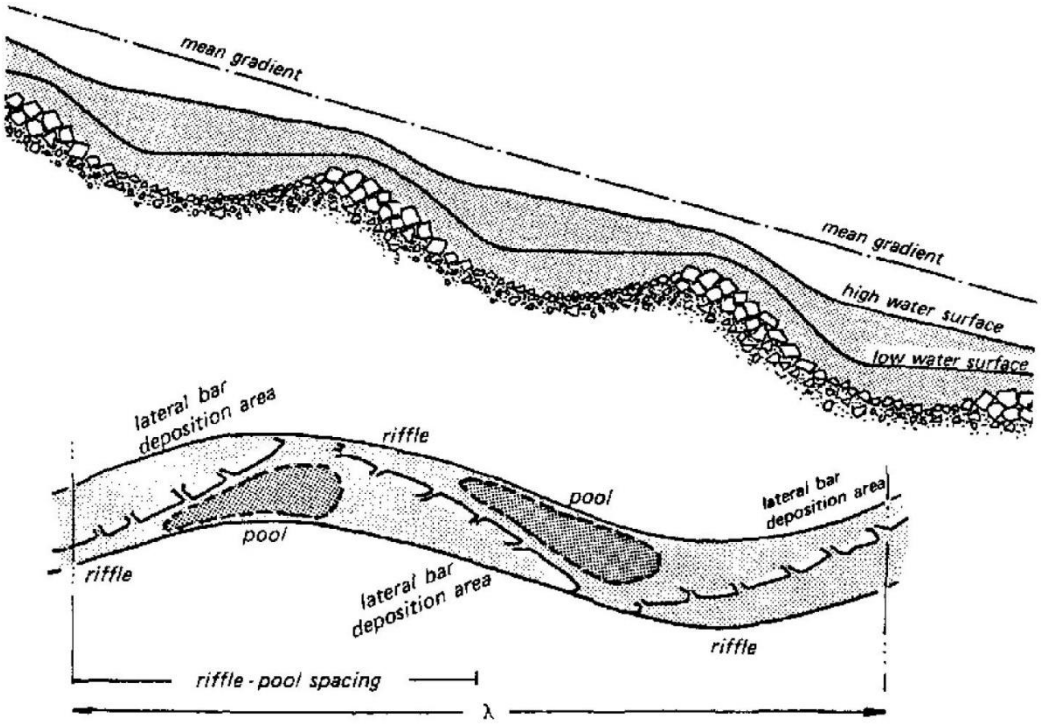


Figure 4-5 : Vue longitudinale (en haut) et en plan (en bas) d'une séquence seuil-mouille (=riffle-pool). Ici, le lobe frontal diagonal du banc (=bar) correspond à la partie immergée du seuil. Church et Jones (1982), modifiée par Bunte et Abt (2001).

1.3.1.2. Patron longitudinal : l'affinement granulométrique

A l'échelle du réseau hydrographique, la taille des sédiments constituant le fond du lit décroît généralement d'amont en aval c'est-à-dire que plus on s'éloigne des zones de montagne ou des têtes de bassin (source sédimentaire), plus le diamètre des sédiments diminue et plus leur classement granulométrique augmente. Cela correspond à un affinement granulométrique (*downstream fining*), majoritairement conditionné par le type d'écoulement (turbulent ou laminaire) et les vitesses, ces deux paramètres étant liés à la pente. L'abrasion mécanique et le tri hydraulique sont les deux processus considérés comme responsables de ce phénomène.

L'abrasion mécanique correspond à l'usure des sédiments résultant du broyage et des frottements en fonction de leur lithologie (Werrity, 1992 ; Farrow et Sklar, 2004), pouvant aller jusqu'à transformer des sédiments grossiers transportés par charriage en sédiments fins transportés par suspension (Benda et Dunne, 1997 ; Chapuis, 2012 ; Arnaud, 2012). Ce phénomène a souvent été écarté par des études en canal expérimental démontrant que même si l'abrasion intervenait au cours du transport, elle n'était pas suffisante pour expliquer des taux d'affinement importants (Parker, 1991; Ferguson et al., 1996 ; Rice, 1999 ; Gomez et al., 2001 ; Polito et Sklar, 2006 ; Rollet, 2007 ; Arnaud, 2012).

Le tri hydraulique est fonction de la durée, de l'intensité et de la diversité de mise en mouvement, de transport et de dépôt des sédiments en fonction de leur taille et de leur forme (Russel, 1939, Gomez et al., 2001 ; Paola et al., 1992 ; Seal et al.,1997 ; Rice, 1999 ; Surian, 2002 ; Rollet, 2007 ; Arnaud, 2012). Ce phénomène est majoritairement observé par rapport au processus d'abrasion. Le taux d'affinement est dépendant de la pente qui, lorsqu'elle diminue, réduit la capacité de transport du cours d'eau (Seal et al., 1997 ; Rice, 1999 ; Gomez et al., 2001, Rollet, 2007).

Leonard de Vinci a été le premier à observer qualitativement le phénomène d'affinement granulométrique dans son « Codex Hammer » (1504-1506) (Gomez et al., 2001). Cet affinement peut se produire dans des lits graveleux et sableux (Frings, 2008). Sternberg (1875) a par ailleurs établi une loi de décroissance exponentielle reposant sur le postulat que la perte de la masse d'un grain est proportionnelle à sa masse initiale et à la distance parcourue, prenant principalement en compte le processus d'abrasion, c'est-à-dire que la valeur médiane de la distribution granulométrique (D_{50}) diminue presque exponentiellement avec la distance à la source (Larras, 1977) :

$$D = D_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

Où D est le diamètre caractéristique du sédiment (en mm) à la distance parcourue x (en km), D_0 le diamètre à x = 0 km et le coefficient empirique de la diminution de la taille du sédiment (en km^{-1}).

Même si cette loi a été confirmée dans de nombreuses études (Church et Kellerhals, 1978 ; Knighton, 1999 ; Surian, 2002 ; Moussavi-Harami et al., 2004 ; Rengers et Wohl, 2007), l'affinement granulométrique observé sur le terrain n'est pas toujours continu ou systématique, les structures résultantes étant bien souvent plus complexes qu'un modèle de décroissance exponentielle (Pizzuto, 1995 ; Gasparini et al., 1999 ; Surian, 2002). Des discontinuités longitudinales, dont l'origine est un déséquilibre naturel ou anthropique entre la fourniture sédimentaire et la capacité de transport des cours d'eau, peuvent apparaître selon l'importance de certains facteurs :

- **les apports latéraux ou la contribution d'affluents** qui perturbent les distributions granulométriques (Rice et Church 1998; Deroanne et Petit, 1999 ; Rice, 1999 ; Surian, 2002). L'influence des apports sédimentaires dépend de la quantité et de la texture du matériau (Rice, 1998) par rapport à la capacité de transport du cours d'eau principal.
- **les ruptures de pente** (Ferguson et Ashworth, 1991) plus ou moins fortes qui modifient la capacité de transport.
- **les interventions anthropiques** tels que l'extraction ou l'introduction de matériaux, ou encore la construction de barrages qui modifient, à l'aval, les régimes d'écoulement et les dynamiques sédimentaires (Surian, 1999). Suite à plusieurs décennies de rejets miniers dans le chenal, Knighton (1999) a constaté une modification de la granulométrie de la Ringarooma River (Tasmanie). Le lit est passé d'une granulométrie graveleuse à sableuse. Williams et Wolman (1984) ont mesuré sur le Missouri et le Colorado (Etats-Unis) une augmentation du diamètre médian des particules après la construction de barrages. Surian (2002) a aussi mis en évidence l'augmentation de la taille des sédiments à l'aval de barrages sur la Piave (Italie), perturbant ainsi le modèle d'affinement. Il en est de même pour Rollet (2007) qui a démontré le développement d'un front de pavage à l'aval du barrage d'Allement sur l'Ain.

Le profil en long, décrivant une forme traditionnellement concave, est considéré comme étant le facteur de contrôle prédominant de l'affinement granulométrique, du fait que la compétence du cours d'eau à mettre les sédiments en mouvement décroît lorsque sa pente diminue (Rice, 1999 ; Gomez et al., 2001). En parallèle, cette compétence augmente du fait d'un débit devenant de plus en plus fort vers l'aval et d'une granulométrie devenant de plus en plus faible du fait de l'abrasion. La formation de la concavité du profil en long est à la fois la cause mais aussi la conséquence de l'affinement granulométrique. Le tri s'effectuant lors de la phase d'entraînement est faible par rapport à celui qui s'exerce durant la phase de dépôt. D'après Carling (1992), les sédiments grossiers sont en général triés en fonction de leur taille, la forme étant relayée au second plan, mais l'efficacité de la sélection en fonction de la forme peut néanmoins varier selon leur taille (Bluck, 1982).

L'interaction entre grains (tri granulométrique) est un phénomène complexe qui peut se produire verticalement ou longitudinalement, et un mélange sédimentaire donné peut entrainer la formation de lits différents selon l'hydrologie du cours d'eau : de la formation d'un pavage figeant les fonds à l'érosion continue d'un lit sableux.

1.3.2. Les ajustements du cours d'eau

La réponse morphologique du cours d'eau à une modification des variables de contrôle (débit liquide et/ou débit solide) se manifeste de plusieurs façons (Poinsart et al., 1989) :

- Ajustement horizontal : accentuation ou diminution de la sinuosité du lit à l'origine de son élongation et de la diminution de sa pente locale, modification du style fluvial, élargissement, rétrécissement, changement de la mobilité en plan.
- Ajustement vertical : incision ou aggradation dans l'axe du talweg (variation de la pente).
- Modification de la granulométrie de son lit.

Incision et exhaussement

L'étude de l'ajustement d'un cours d'eau consiste à caractériser le transport en fonction de son impact sur la morphologie du chenal. La taille des particules composant le lit joue un rôle important dans la nature des ajustements (Simon, 1992 ; Gaeuman et al., 2005). En effet, les cours d'eau à fonds sableux, plus facilement transportables car plus légers, tendent à répondre aux perturbations par un changement rapide de l'élévation du fond du chenal, suivi de l'ajustement de la largeur (Gaeuman et al., 2005). Dans le cas des cours d'eau à charge grossière (graviers à galets), le lit ne s'exhausse que lors d'apports sédimentaires importants et localisés, résultant par exemple de l'érosion des berges dont la granulométrie est similaire à la charge de fond (Rollet, 2007). Les fonds caillouteux sont plus résistants à l'incision que les fonds sableux, ce n'est qu'en période de forte crue que l'incision a lieu, et les débits nécessaires à la mise en mouvement du sédiment y sont moins fréquents.

Tri granulométrique et pavage

Lorsque le courant est faible ou que le cours d'eau n'est pas en hautes eaux, les sédiments sont soumis au tri en fonction des contraintes de cisaillement, mettant en mouvement les matériaux fins à moyens et laissant sur place la charge plus grossière (la capacité de transport est insuffisante pour déplacer cette gamme de sédiments) (Malavoi et Bravard, 2010). Lorsque les particules sont soumises à des contraintes supérieures à celles nécessaires pour leur mise en mouvement, les sédiments fins à moyens sont mobilisés et les éléments grossiers s'accumulent sur la surface du lit du chenal. Si ce phénomène se manifeste durablement, la couche de surface du lit se stabilise et protège les couches plus profondes dites de subsurface (Malavoi et Bravard, 2010), (Figure 4-6). Ce phénomène, appelé armure ou pavage, est à l'origine de surfaces ségréguées, caractérisées par une couche de graviers dont l'épaisseur équivaut au diamètre des particules. Cette surface est composée de matériaux plus grossiers et mieux triés que la couche sous-jacente qu'elle protège de l'érosion (Bravard et Petit, 1997 ; Kondolf et al., 2003) (Figure 4-7). Les lits pavés ou armurés se caractérisent par un ensemble d'éléments grossiers imbriqués les uns contre les autres de façon relativement plane et régulière, contrairement à un agencement « en tuiles », plutôt rencontré sur les lits non pavés (Malavoi et al., 2011).

La notion de pavage (*pavement* ou *paved bed*) a été abordée pour la première fois par Harrison (1950), et celle de l'armure ou armurage (*armour layer* ou *armoured bed*) par Livesey (1965), qui indique que ces deux termes sont synonymes (Gomez 1984). Bray et Church (1980) différencient l'armure,

facilement mobilisable, du pavage, plus stable dans le temps. Selon Gomez (1984), il n'existe pas de processus de ségrégation particulier associé à chacun de ces termes, la distinction entre les surfaces armurées ou pavées (c'est-à-dire à ségrégation) est liée à la capacité à mobiliser ou non l'ensemble des grains, indépendamment de leur taille pour le débit le plus courant (*stable armour-pavement* versus *unstable armour-pavement*). L'armure est donc une protection temporaire contre l'érosion des couches sous-jacentes, souvent remaniée lors d'épisodes de crues fréquentes (annuelles ou biennales), alors que le pavage, résultant du même processus ségrégatif mais poussé à l'extrême, constitue une protection plus stable, semi-permanente à permanente, pouvant éventuellement être mobilisée lors de crues exceptionnelles (Bray et Church, 1980 ; Parker et Klingeman, 1982 ; Richards et Clifford, 1991 ; Bravard et Petit, 1997). Le pavage (ou armurage) affecte plus particulièrement les rivières à pente forte ou moyenne. Ces phénomènes ne se produisent pas exclusivement dans les rivières à galets mais dans les cours d'eau possédant une granulométrie plutôt étendue (charge fine et grossière) et affectent peu les rivières à sable. Il existe plusieurs configurations associant parfois le transit de sédiments fins au-dessus d'une couche pavée composée de graviers. La plupart des cours d'eau à fond graveleux présentent ce type de surface (Whiting et King, 2003).

Pour la suite de cette étude, l'emploi du terme générique de pavage, dont l'estimation du taux permettra d'évaluer la stabilité de la couche de surface, sera systématique.

Le « vannage vers l'aval » (*downstream winnowing)*, est le processus le plus couramment cité pour expliquer la formation d'une surface pavée (Gomez, 1984 ; Richards et Clifford, 1991 ; Kondolf et al., 2003). Le pavage résulte de la remobilisation sélective des particules. Le vannage vers l'aval se produit lorsque le cours d'eau est en déficit sédimentaire, c'est-à-dire lorsque les entrées sont inférieures à la capacité de transport (Bunte et Abt, 2001). La diminution des débits, notamment des débits de crues, devenus incapables de mobiliser la charge grossière, peut aussi entrainer une diminution effective de son transport solide et de sa capacité à remettre en mouvement la couche de surface résultant d'événements de crue qui ne sont plus observés. Ce phénomène conduit à la formation d'une surface à ségrégation, en empêchant la mobilisation de la fraction grossière (Malavoi et al., 2011). Seuls les sédiments fins de surface sont alors transportés vers l'aval (Dietrich et al., 1989 ; Lisle et al., 1993 ; Buffington et Montgomery, 1999).

Lorsqu'un pavage est bien établi à la suite d'une longue période de vannage des particules de surface, la charge de fond n'est quasiment plus mobilisable. Les particules ne sont remises en mouvement que lors d'évènements hydrologiques conséquents. Suite à la construction d'aménagements générant un déficit sédimentaire, tels que les barrages qui réduisent à la fois la fourniture sédimentaire et l'amplitude des crues, un front de pavage et donc une incision du lit est susceptible de se développer vers l'aval (Galay, 1983 ; Williams et Wolman, 1984 ; Brookes, 1988 ; Kondolf, 1997 ; Surian, 2000). Leur impact peut se faire ressentir plusieurs décennies après leur installation, et sur plusieurs dizaines de kilomètres en aval de l'ouvrage. C'est ainsi qu'un an après la construction du barrage Hoover (Colorado), la taille des particules a augmenté sur un tronçon inférieur à 10 km en aval de l'ouvrage, puis le front de pavage s'est alors étendu sur 20 km en aval après 3 ans, 70 km après 6 ans, et enfin 135 km après 13 ans (Williams et Wolman, 1984). Dans le cas du Rhône, les barrages sont susceptibles de favoriser l'apparition de zones de pavage puisqu'ils contribuent à une diminution des apports sédimentaires en bloquant le transit, et à la réduction des débits de crue, et donc de la fréquence de mise en mouvement des particules, en détournant une partie du débit dans le canal d'amenée (chapitre 2).

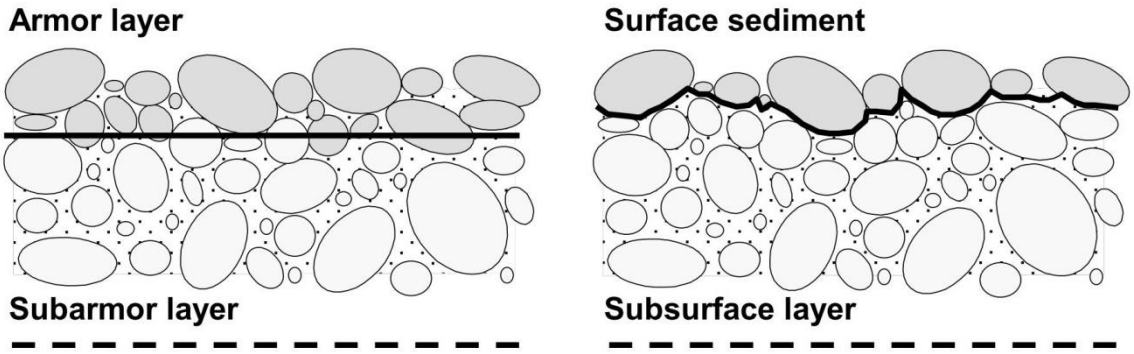


Figure 4-6 : Les strates couramment rencontrées au sein des cours d'eau à graviers : un armurage, c'est-à-dire une armure superposée à une couche de subsurface (à gauche), qui se distingue du dépôt sédimentaire meuble de surface recouvrant une couche sédimentaire de subsurface (à droite). D'après Bunte et Abt (2001).

Figure 4-7 : Résultat du processus ségrégatif où une couche de surface grossière recouvre une couche de subsurface (clichés E. Parrot, 2012)

L'indice de pavage *I*, qui permet de rendre compte de l'importance de ce phénomène, correspond à un rapport entre la taille médiane de l'ensemble des particules de surface (D_{50} *surface*) et la taille médiane des particules de subsurface (D_{50} *subsurface*) :

$$I = \frac{D_{50}\ surface}{D_{50}\ subsurface}$$

Plus ce rapport est élevé, et plus le pavage sera important. Bunte et Abt (2001) ont classé cet indice en fonction de l'interprétation morphologique qui pouvait en être faite, c'est-à-dire que lorsque l'indice *I* :

- **équivaut à 1** : les cours d'eau ont des apports de charge de fond importants,
- **avoisine 2** : la capacité de transport est supérieure au volume des apports,
- **est égal ou supérieur à 3** : il signale soit une forte capacité de transport (cas des cours d'eau de montagne à haute énergie), soit des apports nuls et des sédiments de surface devenant grossiers et immobiles.

Le processus de pavage participe ainsi au ralentissement des processus d'ajustement morphologique du chenal, les débits de crues devenant progressivement incompétents pour la mise en mouvement des sédiments de surface (Sear, 1995).

La propagation de la charge de fond dépend donc de la taille des grains, du degré de pavage, des conditions hydrauliques locales (changements de pente, élargissement du lit, ouvrages modifiant les conditions d'écoulement…) et des débits capables de la mobiliser (Malavoi et Bravard, 2010).

Accumulation sédimentaire

La charge de fond est principalement bloquée par les barrages présentant des retenues étendues. D'autres zones de stockage, de plus ou moins longue durée, peuvent être observées sur les cours d'eau :

- à l'amont d'ouvrages de moindre hauteur, tels que les seuils,
- à l'amont d'ouvrages de franchissement, tels que les ponts,
- dans d'anciennes fosses d'extraction dans le lit mineur.

Ces modes de stockage temporaires dépassent la durée naturelle de stockage, dans les conditions naturelles d'écoulement (Malavoi et Bravard, 2010). Lorsqu'une partie de la charge de fond est prélevée et qu'elle n'est pas compensée par un apport de l'amont, il y a alors incision du lit. Les mesures de la granulométrie de surface rapportées à celles de subsurface permettent ainsi de mettre en relief les zones dynamiques et les zones figées.

En résumé, les liens entre les sédiments et le fonctionnement écologique des écosystèmes sont nombreux. L'étude de la granulométrie apporte donc des informations à la fois morphodynamiques (rugosité du lit, transport solide) et biologiques (notion d'habitat, de refuge et d'abri hydraulique) (Malavoi et Souchon, 2002), et peut aussi renseigner sur les mesures de qualité de l'eau et la recherche de contaminants associés (Figure 4-8).

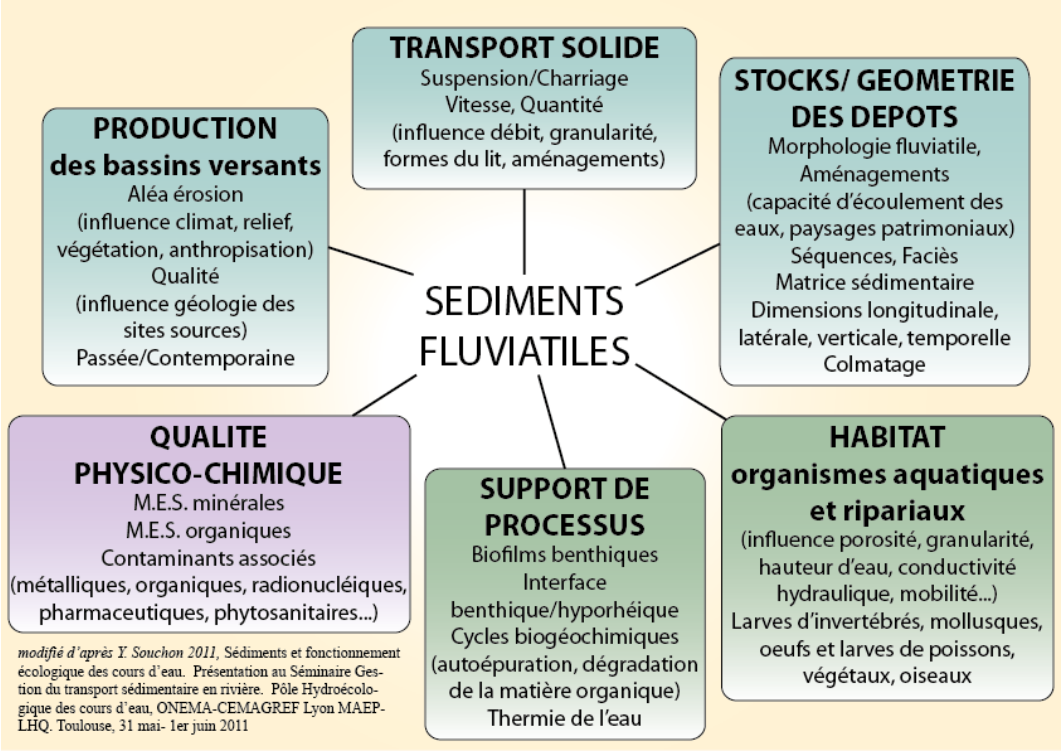


Figure 4-8 : Sédiments et fonctionnement écologique des cours d'eau, modifié par Valverde (2012) d'après Souchon (2011)

2. Comment mesurer la granulométrie ?

Afin d'obtenir une distribution de la taille des grains du lit d'un cours d'eau, il est nécessaire de mesurer les sédiments sur le terrain. Deux méthodes parmi de nombreuses autres ont été retenues : le comptage de chaque particule selon la méthode de Wolman (1954) et la distribution par masse de chaque fraction obtenue par tamisage.

2.1. L'échantillonnage par comptage : la méthode de Wolman (1954)

2.1.1. Echantillonnage de la surface

Le comptage selon la méthode du *« pebble count »* mise en place par Wolman (1954) consiste à déterminer, en nombre, la taille médiane (D_{50}) d'un échantillon. Cette méthode consiste en un échantillonnage aléatoire et à l'aveugle des particules sur une surface définie : chaque particule a été prélevée du bout de l'index et les yeux fermés (pour éviter de sélectionner spontanément les plus grosses particules) en parcourant à pas réguliers la surface définie. La mesure de l'axe b est effectuée par le passage de la particule à travers une maille donnée (Krumbein, 1941). Un gabarit, une plaque comportant plusieurs trous dont le diamètre varie de 8 à 128 mm représentant ainsi les différentes classes de Wentworth (Annexe 17), est utilisé pour déterminer cette granulométrie (Figure 4-9-a). Il est aussi d'usage d'utiliser un pied à coulisse (Figure 4-9-b). Ces outils, notamment le gabarit, permettent de mesurer rapidement la taille des particules sur le terrain, principalement lorsque les échantillons présentent une faible quantité de particules : pour obtenir un diamètre médian (D_{50}) représentatif, il est nécessaire de prélever un minimum de 100 particules pour chaque zone étudiée (Wolman, 1954 ; Hey et Thorne, 1983 ; Mosley et Tindale, 1985 ; Rice et Church, 1998).

(a) (b)

Figure 4-9 : (a) Gabarit à mailles carrées et (b) pied à coulisse (clichés E. Parrot, 2011)

2.1.2. Echantillonnage de la subsurface et détermination de l'indice de pavage

Afin de calculer l'indice de pavage du chenal, on considère que la subsurface du banc est identique à celle du chenal. En effet, on part du postulat qu'il s'agit de la même couche puisque les conditions de dépôt et de transport sont identiques.

Selon Church et al. (1987), la couche de subsurface est tridimensionnelle et ne peut donc être caractérisée que par une analyse volumétrique. Néanmoins, les travaux de Buffington (1996) ont permis d'identifier quatre approches méthodologiques pour déterminer l'indice de pavage. Nous avons retenu celle reposant sur le rapport des tailles médianes de la couche de surface et de la couche de subsurface, selon la méthode de Wolman. Cette méthode est en effet la plus rapide à mettre en œuvre (à l'inverse de l'échantillonnage volumétrique) et peut permettre de couvrir une surface plus importante. Pour échantillonner par comptage la couche de subsurface, Buffington (1996) a développé une méthode basée sur l'équivalence des distributions granulométriques déterminées par échantillonnage volumétrique et par comptage des particules (Kellerhals et Bray, 1971).

Pour atteindre la subsurface, il est donc nécessaire de retirer la couche de surface. Pour ce faire, on retire de la zone étudiée à l'aide d'une pelle, la couche de surface sur une aire d'environ 2 m² et une épaisseur équivalente ou supérieure à la taille des éléments les plus grossiers présents dans cette couche de surface (Figure 4-10-a). Puis, le comptage est réalisé de la même façon que pour la couche de surface à une exception près : dans son étude sur l'Ain, Rollet (2007) a mis en évidence que l'indice de pavage calculé à partir de prélèvements en surface et en subsurface selon la technique de Wolman est beaucoup plus élevé que celui obtenu en utilisant les résultats de l'échantillonnage par volumétrie. Cette différence proviendrait d'une sous-estimation des particules grossières par l'échantillonnage Wolman, réalisé sur les couches de subsurface comportant des particules moins grossières que la surface et une matrice de fines plus importante. En effet, cette matrice occupe un espace non négligeable par rapport aux particules grossières, mais en termes de masse, celle de la matrice est plus faible par rapport à celle des particules grossières. Ainsi, pour éviter cette surestimation des fines, nous avons choisi de ne comptabiliser la matrice qu'à partir du moment où son épaisseur était supérieure à 2,5 cm, soit l'équivalent d'une phalange (Figure 4-10-b). Si entre temps nous rencontrons une particule, nous l'évaluons sans prendre en compte la matrice.

(a) (b)

Figure 4-10 : (a) Découverte de la couche de subsurface (cliché E. Parrot, 2012). (b) Comptage aléatoire réalisé dans la couche de subsurface en présence de fines (cliché E. Parrot, 2012)

2.2. L'échantillonnage massique

L'échantillonnage massique consiste en la détermination de la masse de chaque fraction granulométrique. Les mesures sont effectuées au gabarit et par tamisage d'un échantillon à l'aide de tamis, c'est-à-dire passage au travers d'un maillage unique pour un diamètre donné permettant d'estimer l'axe b selon la classification de Wentworth. Il existe des tamis de terrain (Figure 4-11) avec lesquels il est possible de trier une quantité de sédiments importante ce qui permet ainsi de réduire les échantillons prélevés sur le terrain. L'analyse granulométrique des particules plus petites (inférieures ou égales aux graviers moyens 8 ou 11 mm) se fait généralement en laboratoire à l'aide d'une colonne de tamis (Figure 4-12) respectant la classification de Wentworth (Annexe 17). Chaque fraction granulométrique est ensuite pesée (Figure 4-12).

Un cours d'eau possède généralement une étendue granulométrique des sédiments très large. Ainsi, pour qu'un échantillon soit représentatif, il faut que le volume total prélevé soit suffisamment conséquent pour que la description de la distribution granulométrique soit la plus proche possible de la composition du lit. Plus les sédiments sont grossiers et plus la quantité de particules à prélever pour avoir un échantillon significatif sera importante. Le volume à prélever est déterminé à partir du diamètre maximal (D_{max}) de l'échantillon considéré, c'est-à-dire le D_{95}. Church et al. (1987) déterminent que la masse empirique de la plus grosse particule, inférieure à 32 mm, de l'échantillon ne devrait pas excéder 0,1 % de la masse totale de l'échantillon, ce qui veut dire que la masse totale à prélever (ms) devrait être égale à mille fois la masse du D_{max}, soit : $ms = 1\,388\,000.D_{max}^3$ (Bunte et Abt, 2001). Pour un D_{max} compris entre 32 et 128 mm, la masse du D_{max} serait équivalente à 1 % de la masse total du prélèvement, soit : $ms = 138\,000.\ D_{max}^3$ (Church et al., 1987, Bunte et Abt, 2001). Si la taille des particules excède 128 mm, le D95 devra composer 5 % de la masse total de l'échantillon, soit : $ms = 27\,751.D_{max}^3$ (Church et al., 1987, Bunte et Abt, 2001). En d'autres termes, pour un D_{max} de 22 mm, il faudrait prélever 15 kg de sédiments, 36 kg pour un D_{max} de 64 mm, 100 kg pour un D_{max} de 90 mm et 290 kg pour un D_{max} de 128 mm.

Figure 4-11 : Tamis de terrain à mailles carrées (cliché M. Tal, 2011)

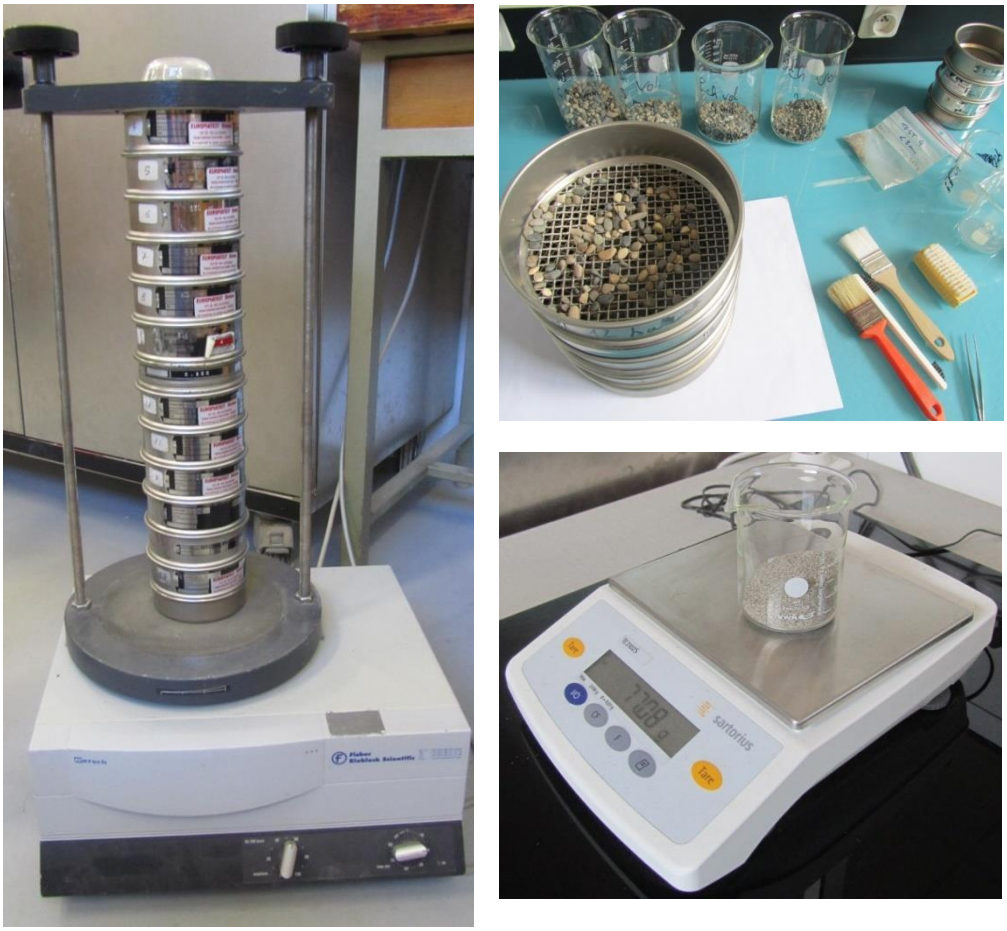


Figure 4-12 : Analyse granulométrique en laboratoire nécessitant un tamisage à l'aide d'une colonne de tamis sur une secoueuse (gauche), la séparation de chaque classe (haut) et leur pesée (bas) (clichés E. Parrot, 2013)

3. Mesure de la granulométrie du lit du Rhône

3.1. Choix des sites d'échantillonnage

Lorsqu'on étudie la granulométrie d'un tronçon, on doit faire face à une décision importante : celle de la localisation des prélèvements. En effet, la stratégie d'échantillonnage doit être établie en tenant compte de ce que les sédiments transportés par l'écoulement se distribuent de façon très hétérogène, et ce en fonction de la trajectoire du courant et des différents axes d'écoulement, de la présence de végétation ou d'autres éléments pouvant perturber le transport (embâcles, épis…) ou encore des variations locales de la pente (Mosley et Tindale, 1985).

Que l'échantillonnage se fasse dans le chenal en eau ou sur les bancs émergés, il est donc plus rigoureux de considérer des faciès identiques sur un linéaire et associés à un environnement sédimentaire particulier, afin (1) d'éviter la confusion entre les variations locales et le patron longitudinal et (2) pour étudier les variations longitudinales de la taille des sédiments sur de longs continuums fluviaux (Rice et Church, 1998). Ces éléments ont été pris en compte pour sélectionner nos sites et les méthodes d'échantillonnage.

D'après Richards (1976), le talweg est très sensible au déplacement des formes fluviales (surcreusements dans les courbes, alternances seuil-mouille…) et enregistre les conditions

hydrauliques du cours d'eau. Les prélèvements ont été effectués dans le talweg afin d'être le plus représentatif de la dynamique sédimentaire soumise aux conditions d'écoulement du cours d'eau sur tout le linéaire.

Des travaux portant sur l'affinement granulométrique ont été menés à partir de l'échantillonnage des particules les plus grossières du matériel actif (sans végétation) (Church et Kellerhals, 1978 ; Rice et Church, 1996 ; Rice et Church, 1998). L'avantage de ces faciès à granulométrie grossière, tels que les seuils, est qu'ils sont facilement identifiables et directement reliés aux mécanismes hydrauliques les plus actifs (Surian, 2002), ce qui permet de s'affranchir des effets locaux lorsqu'il s'agit de comparer des sites entre eux sur un continuum. Le choix de ces faciès permet ainsi d'éviter les sites à faible énergie dont la granulométrie rend compte d'un contexte hydraulique local difficile à comparer avec d'autres sites (Surian, 2002). Ces auteurs ont observé, in situ, que ces faciès se trouvaient le plus souvent en tête de banc, à proximité du chenal. D'après Surian (2002), les faciès comportant des particules grossières sont directement reliés aux mécanismes de contrôle hydraulique, c'est pourquoi nous nous sommes focalisés sur les seuils qui constituent des sites à haute énergie.

3.1.1. Mesures granulométriques sur les bancs

Un échantillonnage de surface, effectué selon la méthode Wolman (1954), a été réalisé sur les bancs et dans le chenal en eau, au droit du banc, afin de rendre compte de la variabilité (1) à l'échelle du banc, (2) à l'échelle du secteur, (3) à l'échelle du corridor rhodanien dans son ensemble. Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en 2011 et 2012 afin d'obtenir des informations sur les différentes classes de tailles qu'il est possible de rencontrer dans le corridor du Rhône. Nous nous sommes focalisés sur la partie active, c'est-à-dire la partie en tête du banc et la plus proche du chenal, afin de mesurer les matériaux les plus représentatifs de ceux que l'on peut trouver dans le lit mouillé.

3.1.2. Mesures de l'indice de pavage sur les bancs et dans le chenal

Lors de la campagne de mesure granulométrique par comptage de 2012, nous avons cherché à déterminer la granulométrie dans le chenal en eau des vieux Rhône difficilement accessibles en bateau, ainsi que les indices de pavage sur les bancs et dans le chenal pour distinguer les secteurs figés de ceux en mouvement. Lorsque les conditions hydrologiques et d'accessibilité sur le terrain le permettaient, une granulométrie de surface a été réalisée sur les bancs (amont, apex, aval) et dans le chenal, au droit des points de prélèvement des bancs. Les mesures sur les bancs ont été répétées sur la couche de subsurface, tout en tenant compte de la difficulté que cela impliquait.

3.2. Contraintes de mesure

Nous avons cherché à établir un patron granulométrique de l'ensemble du Rhône, dans le chenal principal comprenant le Rhône total et les vieux Rhône (Petit Rhône et canaux sont exclus) et sur les mêmes formes. Il a donc fallu prélever dans le chenal en eau, soit en y accédant à pied, soit en bateau. La difficulté est de ne pas pouvoir mettre en œuvre un mode de prélèvement unique sur tout le linéaire. En effet, les conditions de navigation sont différentes entre les biefs :

- dans les vieux Rhône, le tirant d'eau est trop faible pour pouvoir naviguer avec un bateau de taille importante, mais les prélèvements sont, en partie, possibles à pieds,

- dans le Rhône total, le tirant d'eau est suffisant pour intervenir en bateau, mais le courant et la hauteur d'eau sont trop importants pour échantillonner à pied.

Il faut ensuite prélever avec les mêmes outils, afin d'analyser les résultats de la même façon, ce qui peut aussi poser des problèmes en termes de déploiement du matériel.

Une synthèse bibliographique a été réalisée par Guillaume Raccasi en 2011, puis modifiée et actualisée par Lucile Hammou en 2012. Celle-ci s'est appuyée sur des données plus récentes, incluant celles des campagnes de 2011, afin de rendre compte de la répartition granulométrique sur l'ensemble du corridor (Annexe 18). Les résultats, souvent représentés par les D_{50} (diamètre médian), révèlent une large gamme de tailles de particules, les médianes pouvant ainsi varier sur les bancs échantillonnés de 96 mm dans le secteur de Donzère-Mondragon à 0,05 mm dans le secteur à l'aval du Palier d'Arles. Le D_{50} moyen de l'ensemble du linéaire est de 34,5 mm. Le choix du matériel à déployer afin de réaliser les prélèvements doit tenir compte de cet éventail granulométrique, notamment de la difficulté à prélever les matériaux les plus grossiers, et à ne pas perdre les matériaux les plus fins.

3.3. Choix du matériel et tests réalisés

3.3.1. Déploiement des Cooper Scooper

Afin de réaliser des prélèvements sur l'ensemble du linéaire, vieux Rhône et Rhône total, il avait été décidé d'utiliser une benne de prélèvement, la Cooper Scooper (volume : 20 L – dimensions : 36 × 23 × 28 cm – masse vide : 29 kg - Figure 4-13 & Figure 4-14), développée et testée par Singer (2008). Ce préleveur avait fait ses preuves sur la Sacramento, une rivière à galets du nord de la Californie présentant un style fluvial assez proche de celui de l'Ain. Ce préleveur permet de remonter 16 kg de sédiments. Une grille postée sur le fond de la benne, d'une maille de 0,063 mm, permet de vidanger l'eau tout en limitant les pertes de fines. Lors de ses expérimentations, Singer (2008) a démontré que le prélèvement ne pouvait pas se faire en présence de particules supérieures à 128 mm et que si elles étaient comprises entre 64 et 128 mm, il fallait effectuer au moins trois prélèvements pour obtenir un échantillon représentatif. De la même façon, un prélèvement n'est pas possible en cas de pavage du fond du lit. La gamme granulométrique étant très large sur le linéaire du Rhône, et le pavage fréquent, il a fallu limiter la collecte multiple dans les zones à granulométrie grossière et trouver une solution pour pénétrer au travers de la couche de pavage. Une nouvelle benne, plus importante cette fois, a été confectionnée pour permettre les prélèvements dans les matériaux plus grossiers (volume : 60 L – dimensions : 54 x 42 x 34.5 cm – masse vide : 55 kg avant lestage, 80 kg après – Figure 4-14). Cette Cooper Scooper permettrait de remonter ainsi 60 kg d'échantillon. Nous avons testé ces deux préleveurs sur le Rhône :

- à Donzère-Mondragon, un secteur présentant des particules particulièrement grossières et réputé pavé, dans le vieux Rhône et dans une partie de la retenue de Caderousse, entre Pont Saint Esprit et Saint Etienne des Sorts,
- et à Pierre-Bénite, comportant des graviers moyens à grossiers, dans le vieux Rhône, à l'amont du barrage.

L'idée était de définir un protocole d'échantillonnage fondé sur l'utilisation de la grande ou de la petite benne en fonction de la granulométrie (Figure 4-14).

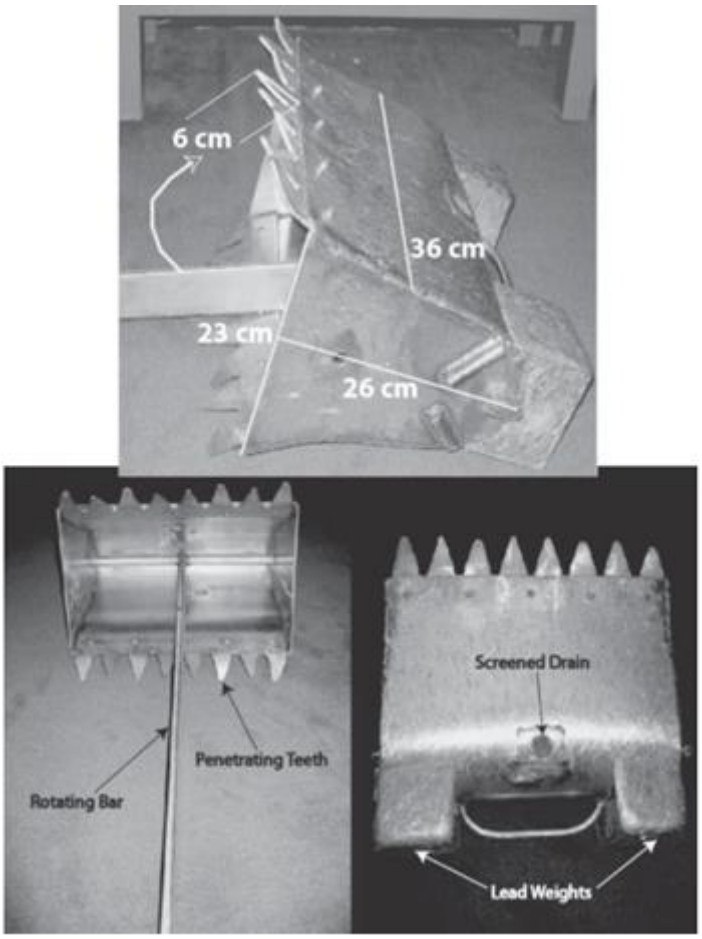


Figure 4-13 : Cooper Scooper déployée à partir d'un bateau et tractée à l'aide d'un treuil (Singer, 2008)

Figure 4-14 : A gauche : préleveurs Cooper Scooper (grand à gauche et petit à droite), calibrés par M. Singer (au milieu). En haut : bateau de l'Irstea utilisé lors des essais et la grosse Cooper Scooper (clichés E. Parrot, 2011)

3.3.2. Résultats des tests

Les résultats de ces prélèvements effectués avec la petite Cooper Scooper ont révélé une très forte disparité de la granulométrie. Les diamètres médians des échantillons (D_{50}) ont été représentés sur la Figure 4-15. Sur un même profil en travers, nous avons prélevé en trois points : dans le centre du chenal, en rive gauche et en rive droite. L'absence de points de prélèvement correspond à une remontée sans sédiments. En effet, le matériel de fond semble souvent trop volumineux pour pouvoir être contenu dans la petite Cooper Scooper, qui réussit à prélever des particules moins grossières sur les rives. Par ailleurs, le centre du chenal paraît pavé à l'aval de la confluence de l'Ardèche et à l'aval de la restitution, empêchant la petite Cooper Scooper de pénétrer dans le fond du lit.

Afin de palier au problème de contenance de la petite CS, la grande CS a été déployée. Ceci avait aussi pour but de ramener les éléments plus grossiers pouvant constituer le fond du chenal. Néanmoins, le faible lestage de la benne couplé à la faible puissance du bateau n'a pas permis de l'ancrer dans le substrat. La grande CS n'est donc plus utilisée, seule la petite CS est déployée.

Pour mieux caractériser la nature des échantillons prélevés avec la petite CS, ces résultats ont été comparés avec un prélèvement volumétrique effectué sur un banc près du chenal, ainsi qu'avec des échantillons par comptage (les données ont été listées en Annexe 19). Une très grande variabilité granulométrique est ainsi observée entre les différents échantillons prélevés avec la petite CS sur le secteur test de Donzère, notamment sur les zones de rive droite ou du centre du chenal (Figure 4-15).

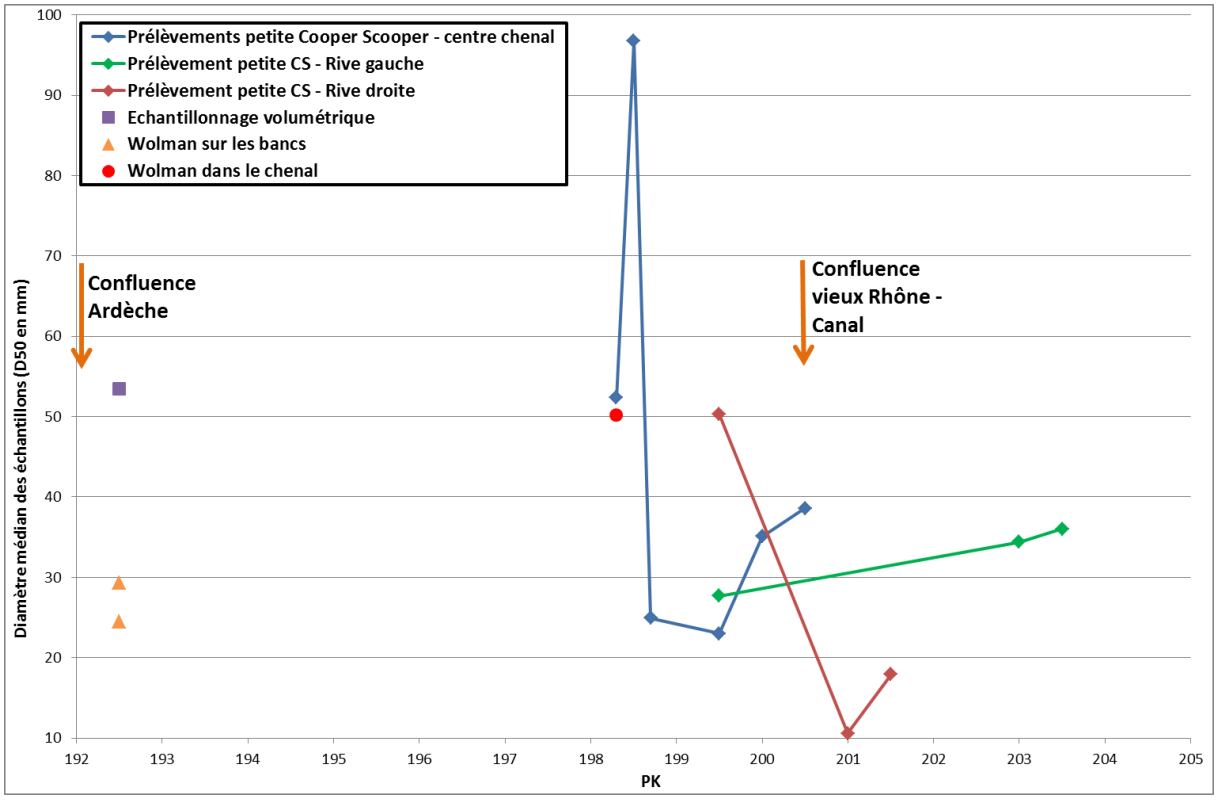


Figure 4-15 : Résultats des prélèvements-tests effectués sur le secteur de Donzère-Mondragon par différentes techniques. Les D_{50} sont présentés en fonction des PK

Au cours de ces tests nous avons ainsi rencontré certaines difficultés :

- nous n'avons pas pu prélever avec la grande CS qui n'était pas assez lestée et se renversait systématiquement,
- après lestage, la grande CS était beaucoup trop lourde à manier avec les équipements disponibles ; aucun bateau n'était capable de remonter une telle benne, même à moitié pleine,
- nous avons souvent remonté la petite CS vide ou avec très peu de sédiments, ne permettant pas de reconstituer un échantillon représentatif et donnant de très grandes gammes de D_{50}.

La petite CS présente un volume trop faible pour les prélèvements dont nous avons besoin pour établir la granulométrie comme c'est le cas par exemple sur le secteur de Donzère. Singer (2008) a démontré sur la Sacramento que cette benne convenait aux graviers et non aux particules plus grossières. En effet, lorsqu'elle était déployée sur des fonds plus grossiers, celle-ci se renversait à la rencontre de grosses particules ou ne réussissait pas à prélever les particules grossières.

3.3.3. Comparaison des préleveurs et choix du matériel

Une dernière tentative a été faite avec la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) pour pouvoir utiliser les Cooper Scoopers. L'alternative trouvée consiste à effectuer nos prélèvements avec le matériel de microbiologie de la Direction Ingénierie de la CNR. Nous avons réalisé des tests comparatifs entre les CS et leur drague (Figure 4-16), à bord de leur bateau (Figure 4-17).

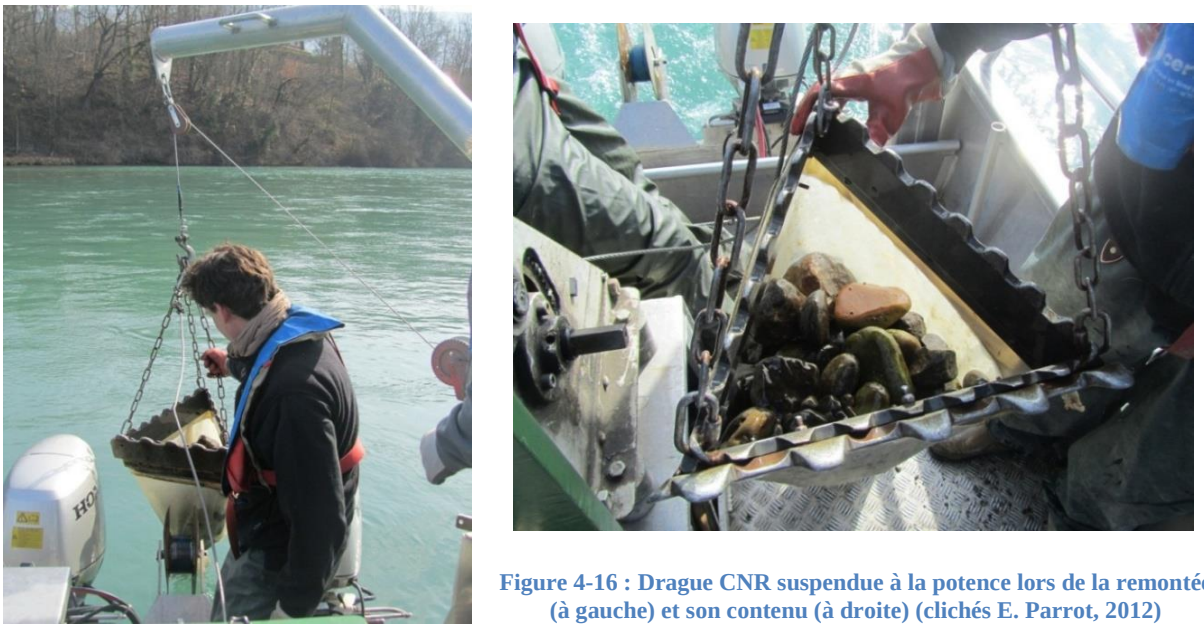


Figure 4-16 : Drague CNR suspendue à la potence lors de la remontée (à gauche) et son contenu (à droite) (clichés E. Parrot, 2012)

Nous avons réalisé les tests à l'aval du barrage de Seyssel, un secteur présentant un large éventail granulométrique. Il s'est avéré que la grosse CS n'a pas pu être déployée du fait de sa masse (trop importante par rapport à ce que peut supporter la potence du bateau lors de la remontée) et que la petite CS n'a pas ramené d'échantillons conséquents (Figure 4-18). Nous avons donc testé la drague de la CNR qui s'est révélée particulièrement efficace : elle a systématiquement permis de remonter des échantillons conséquents (Figure 4-16). Nous nous sommes aussi rendus compte que le volume contenu dans cette drague équivalait à celui de la grosse CS (Figure 4-18).

Figure 4-17 : Bateau de la CNR (cliché E. Parrot, 2012)

Figure 4-18 : A gauche : petite CS remontée avec quelques particules. A droite : grande CS remplie avec les sédiments remontés par la drague CNR (clichés E. Parrot, 2012)

Ces conclusions ont conduit à établir un partenariat avec la CNR afin de travailler avec les techniciens de la Direction Ingénierie qui possèdent un matériel adapté et connaissent bien le terrain (navigation, nature du substrat, opérations menées…).

Ainsi, les Cooper Scoopers ont été abandonnées au profit de la drague CNR, qui permet de prélever des gammes granulométriques très larges.

3.4. Elaboration d'une méthode de prélèvement uniforme et adaptée

Nous avons donc établi un plan d'échantillonnage (Annexe 20) à partir de la bathymétrie de la BDT Rhône de l'IGN (chapitre 3) afin de prélever systématiquement les points hauts du talweg et sur tout le linéaire, y compris dans les vieux Rhône, où les seuils sont situés au droit des bancs. Les prélèvements dans le chenal en eau navigable ont été réalisés dans la masse, c'est-à-dire comprenant la surface et

une partie de la subsurface du lit, à l'aide de la drague de la CNR. Par ailleurs, les données ont été complétées lors des campagnes de terrain de 2012 sur les vieux Rhône non accessibles en bateau par des comptages réalisés selon la méthode Wolman (1954), c'est-à-dire ici une estimation de la granulométrie de surface du lit. La subsurface a néanmoins été estimée sur les bancs, au droit du comptage réalisé dans le chenal. Kellerhals et Bray (1971) ont par ailleurs démontré que la granulométrie estimée par comptage des particules (gabarit) était équivalente à celle déterminée par échantillonnage massique (tamisage).

Les points de prélèvements sont généralement inter-distants d'environ 5 km, en suivant le schéma d'une succession de points dans la retenue (Rhône total) jusqu'à l'amont du barrage, puis de l'aval du barrage dans le vieux Rhône, jusqu'à la retenue suivante.

Certains secteurs ont été densifiés (environ un point tous les 1 à 3 km). Il s'agit notamment :

- des confluences : du Fier, du Guiers, de l'Ain, de la Saône, le Doux, l'Isère, l'Eyrieux, la Drôme, l'Ardèche, le Lèz, la Cèze, l'Ouvèze, la Durance, le Gard et à la diffluence Petit Rhône – Grand Rhône
- de la plupart des vieux Rhône : entre Chautagne et Brégnier-Cordon, Miribel-Jonage, entre Pierre-Bénite et Caderousse

La gamme granulométrique au sein d'un seul prélèvement est large, on peut retrouver des sédiments grossiers dans des matériaux très fins. Cette hétérogénéité, l'importance de la taille de certaines particules et les limites de la méthode dues aux conditions sur le terrain expliquent qu'il existe une forte variabilité intra-prélèvement qui ne permet pas à un seul échantillon d'être représentatif. C'est pourquoi chaque point échantillonné repose sur trois prélèvements successifs. Les prélèvements, réalisés avec la drague de la CNR, ont été effectués majoritairement dans les retenues (ou Rhône total) car celles-ci sont facilement accessibles avec le bateau au tirant d'eau le plus important et le plus puissant. Chaque échantillonnage (Figure 4-19) a systématiquement fait l'objet d'une première analyse granulométrique à bord, afin de ne pas se surcharger d'un échantillon trop volumineux (Figure 4-20).

Les campagnes de prélèvements et les traitements granulométriques ont été réalisés entre août 2012 et septembre 2013 sur tout le linéaire, entre l'amont de Génissiat et la mer, totalisant 306 prélèvements. Les prélèvements dans la retenue de Génissiat ont été effectués par la CNR lors d'une campagne menée avant les chasses de 2012 et les résultats des analyses ont été fournis en D_{50} uniquement.

Pour une meilleure représentativité de la granulométrie locale, les données brutes des trois prélèvements effectués sur chacune des stations ont été rassemblées en un seul échantillon, globalisant 122 échantillons prélevés à la drague CNR, ce à quoi se rajoutent les 35 mesures réalisées par comptage Wolman, soit un total de 157 mesures granulométriques échantillonnées dans le chenal du Rhône. Chaque prélèvement a fait l'objet d'un traitement statistique (Annexe 21) afin de déterminer les percentiles de D_5 à D_{99} (Annexe 22) et de caractériser quantitativement la répartition granulométrique (Annexe 23).

Près de 7 tonnes de sédiments ont été prélevées dans le chenal du Rhône lors des campagnes de dragages de 2012-2013, soit en moyenne 64 kg par échantillon et 22,5 kg par prélèvement. Le D95 moyen est estimé à environ 77 mm. Il faudrait donc prélever en moyenne 63 kg de sédiments pour avoir un échantillon global représentatif (Church et al., 1987 ; Bunte et Abt, 2001), ce qui correspond à nos mesures.

Sur l'ensemble du linéaire, le diamètre médian (D_{50}) varie entre une valeur proche de 0 mm (argiles très fines) et 133 mm (galets), avec un D_{50} moyen de 37 mm (graviers grossiers). Le D_{50} moyen est relativement proche du D_{50} moyen issu de la littérature (34,5 mm) mais le D_{50} maximal mesuré reste bien plus important (D_{50} bibliographie = 96 mm).

Figure 4-19 : Exemple de prélèvement remonté à la drague dans le secteur de Belley (cliché E. Parrot, 2012)

Figure 4-20 : a. Mesures granulométriques des particules les plus grossières réalisées avec un gabarit directement sur le bateau b. Système pour peser chaque classe de tailles (clichés E. Parrot, 2012)

4. Résultats

4.1. Distribution granulométrique et indices de pavage des bancs et du chenal des vieux Rhône

4.1.1. Distribution de la granulométrie sur les bancs émergés des vieux Rhône

La Figure 4-21 montre les résultats des prélèvements effectués en 2011 sur les bancs dans les tronçons du vieux Rhône. Les données figurent en Annexe 24 sous forme d'un tableau de données des valeurs statistiques (D_{10}, D_{50}, D_{90}), la localisation des points est cartographiée en Annexe 25. On constate sur la Figure 4-21 que la taille des sédiments tend à augmenter vers l'aval, de façon non uniforme et selon une tendance exponentielle (à l'exception du secteur de Sault-Brénaz, dans le Haut Rhône, qui montre une granulométrie plus grossière que les autres secteurs). La valeur du D_{50} à l'amont est comprise entre 10 et 25 mm, pour les secteurs de Chautagne et Brégnier-Cordon, et le D_{50} à l'aval est compris entre 25 et 50 mm, au niveau de Donzère-Mondragon, dernier secteur du Rhône présentant des bancs de graviers. Des secteurs semblent être moins grossiers, tels que Brégnier-Cordon, Miribel-Jonage, Pierre-Bénite et Baix-le Logis Neuf. Le prélèvement réalisé dans le chenal de Donzère-Mondragon est plus grossier que ceux réalisés sur les bancs dans ce même secteur. Cette première campagne de terrain permet de donner un ordre d'idée de l'état de la granulométrie sur les bancs des tronçons court-circuités du Rhône : le lit du fleuve ne présente pas d'affinement granulométrique vers l'aval. Il est néanmoins nécessaire de densifier les mesures et de se focaliser sur le chenal en eau pour déterminer plus précisément ses caractéristiques granulométriques.

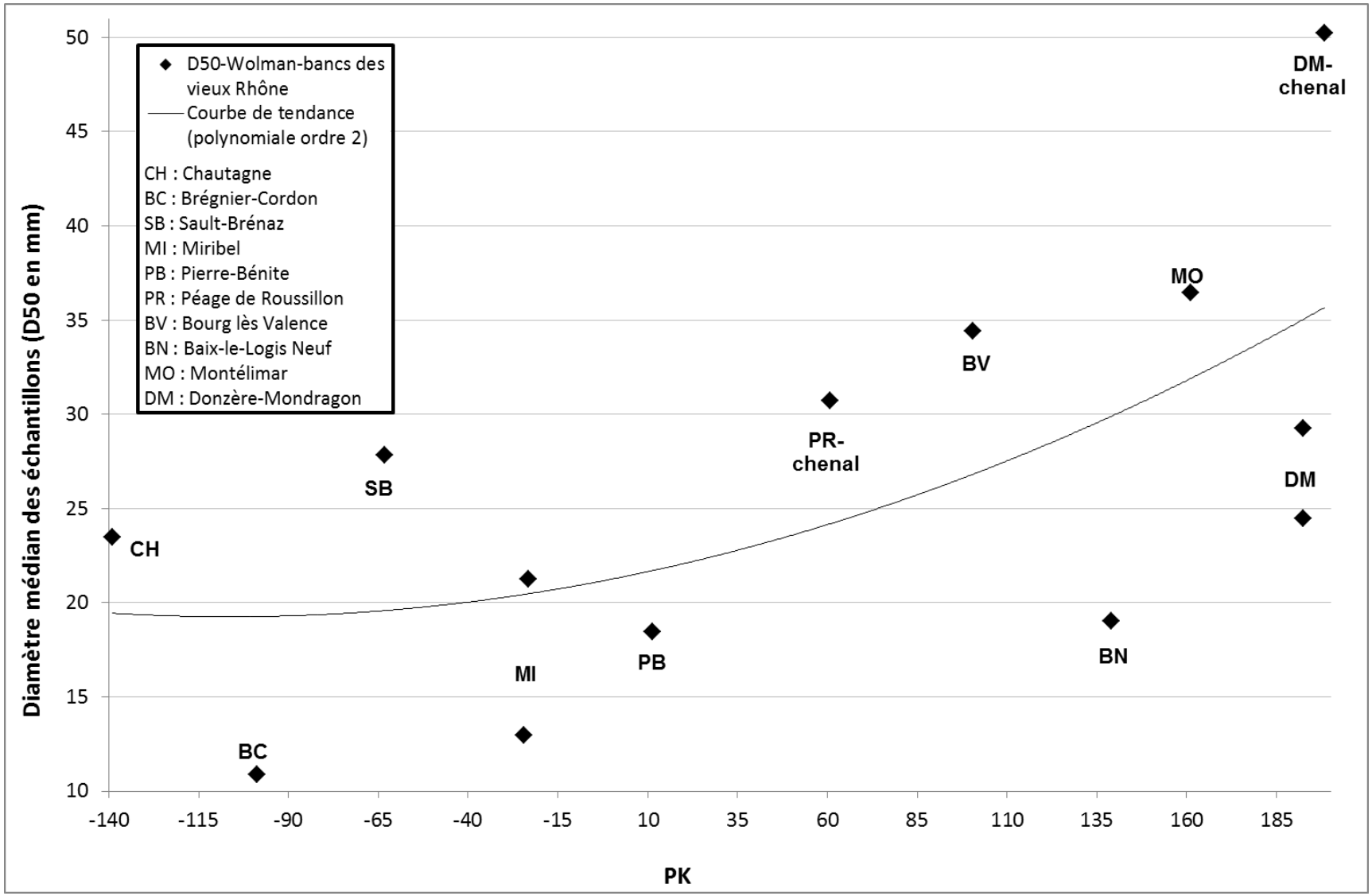


Figure 4-21 : Répartition des D_{50} mesurés par comptages Wolman lors de la campagne d'échantillonnage des bancs en 2011

4.1.2. Détermination du degré de pavage dans les tronçons court-circuités

La campagne de terrain conduite en 2012 à la fois sur les bancs et dans le chenal (principalement dans les vieux Rhône, cf. secteurs étudiés Annexe 25) a permis de déterminer par comptage : (1) les tailles médianes des bancs en surface et en subsurface, (2) les tailles médianes en surface dans le chenal et (3) les indices de pavage sur les bancs et dans le chenal.

Lorsque l'accès au banc était possible et le taux de recouvrement de la végétation faible, nous avons effectué des prélèvements à l'amont, à l'apex et à l'aval du banc. L'ensemble des données granulométriques a été listé en Annexe 26. Nous avons choisi d'analyser les D_{50} en tête de banc (Figure 4-22) où les conditions hydrauliques sont comparables d'un banc à l'autre, le processus de dépôt étant hétérogène. La Figure 4-22 confirme l'absence d'affinement granulométrique longitudinal sur le Rhône, la Figure 4-23 présente la répartition des indices de pavage.

Les Figure 4-22 & Figure 4-23 rendent compte de la faible quantité de données disponibles à l'aval de Lyon par rapport à l'amont. Cette différence est due à la diminution et à la forte végétalisation des bancs au Sud de Lyon qui a été favorisée par l'incision du chenal suite à la construction des casiers Girardon dans cette partie du Rhône.

L'organisation granulométrique longitudinale de ces têtes de bancs met en évidence trois principaux secteurs que nous nommerons ici Rhône amont pour le tronçon amont de la confluence de l'Ain, Rhône médian pour le secteur de Miribel-Jonage et Rhône aval pour toute la partie aval de Lyon :

Le Rhône amont

Les secteurs entre Chautagne et la confluence de l'Ain (PK -144 à -50) présentent une granulométrie de surface faible (16,3 à 32,2 mm), et par hypothèse, potentiellement mobile. Les secteurs principalement à l'amont, entre Chautagne et Brégnier-Cordon (PK -144 à -97) présentent des gammes de D_{50} sur les bancs (entre 19,7 et 32,2 mm) supérieures aux gammes de D_{50} dans le chenal (16,3 à 29 mm). A Chautagne, les D_{50} du chenal sont compris entre 19 et 21 mm et ceux des bancs entre 21 et 32 mm ; à Belley, 24 mm pour le chenal et entre 21 et 26 mm pour les bancs ; enfin à Brégnier-Cordon, entre 16 et 18 mm pour le chenal et entre 19 et 21 mm pour les bancs. Cet écart granulométrique peut mettre en évidence que le chenal est plus dynamique que les bancs, ce qui permet d'émettre l'hypothèse de l'existence d'un transit sédimentaire résiduel dans le chenal. Le chenal ne semble pas pavé ($1,5 < I < 2,7$) mais les bancs présentent des indices de pavage légèrement supérieurs à ceux du chenal ($1,75 < I < 2,9$) et se rapprochant de 3, la limite de pavage (Bunte et Abt, 2001), et des valeurs de D_{50} globalement plus importantes. On peut émettre l'hypothèse que les bancs, plus grossiers que le chenal, seraient de moins en moins mobilisés et qu'ils pourraient être susceptibles de se paver. En résumé, les bancs pourraient être affectés par un pavage « hydraulique » : ils ne sont plus mis en mouvement car les crues actuelles ne le permettent plus. En revanche, il y aurait encore un transport solide résiduel dans le lit du fait de ressources sédimentaires encore disponibles. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que le cours d'eau ne s'est pas encore ajusté aux aménagements plus récents. On serait ici sur un tronçon fluvial en voie de fixation mais encore caractérisé par une charge de fond résiduelle et de petite taille dans le chenal.

Le Rhône médian

Le secteur de Miribel présente des valeurs de D_{50} du chenal (16,9 à 25,2 mm) supérieures à celles du D_{50} des bancs (11,4 à 14 mm). L'écart entre les D_{50} du chenal et des bancs est plus important que dans le Rhône amont mais reste modéré (Figure 4-22). De plus, les indices de pavage dans ce secteur présentent les mêmes valeurs que celles du chenal du Rhône amont (1,4 à 2,6) et restent inférieurs à 3 (Figure 4-23). L'hypothèse ici est que le transport solide est encore actif du fait que le chenal et les bancs ne sont pas pavés ($I < 3$), et que les bancs sont plus dynamiques que le chenal (D_{50} chenal > D_{50} banc et I banc < I chenal). Les zones de dépôts présenteraient une moindre hydraulicité et de fait des tailles plus petites, ce qui est cohérent en termes de conditions hydrauliques et de transport sédimentaire imposés par les apports de l'Ain à l'amont du secteur.

Le Rhône aval

La Figure 4-22 montre que les granulométries les plus grossières se situent dans les chenaux de Pierre-Bénite (entre 43 et 55 mm) et de Donzère-Mondragon (entre 47 et 52 mm), localisés respectivement au PK 9,5 et 190. Ce phénomène s'explique par les héritages et les apports de sédiments grossiers des affluents (chapitre 2). Ils présentent une granulométrie des bancs légèrement plus grossière que sur les autres bancs du linéaire (entre 20 et 40 mm pour Pierre-Bénite et entre 30 et 40 mm pour Donzère-Mondragon). Ces secteurs possèdent une granulométrie plus grossière dans le chenal que sur les bancs (D_{50} chenal > D_{50} bancs). De plus, le pavage est marqué dans le chenal, notamment à Pierre-Bénite (entre 4 et 8 pour PB et entre 4 et 5 pour DM), et est supérieur à 3 sur les bancs sauf sur deux points (entre 2 et 6 à PB et entre 2 et 4 à DM). Ces observations laissent penser que le lit est figé et les bancs partiellement aussi. Les indices de pavage étant importants, le transport sédimentaire ne serait plus actif quelles que soient les unités concernées (chenal en eau et bancs) et les formes fluviales seraient majoritairement figées et donc difficilement mobilisables lors des crues. Ce phénomène est à corréler avec la stabilité des faciès morphologiques et leur petite taille (en amplitude et longueur d'onde) observées dans cette partie du Rhône (chapitre 3). Ils constitueraient donc des secteurs où la charge est difficilement mobilisable. Pourquoi observe-t-on la formation de zones de pavage à l'aval de Lyon et non à l'amont ? A la différence de la partie amont de Lyon, l'aval a subi une phase de chenalisation avant la construction des barrages, qui a été la phase la plus érosive (chapitre 3). A cela se rajoute la diminution des apports solides des affluents du Rhône aval fortement anthropisés et touchés par les extractions de granulats. Les aménagements hydroélectriques se seraient donc surimposés à ce déficit sédimentaire préexistant et au pavage hydraulique non abouti quand les barrages ont été construits. Ces aménagements auraient alors renforcé le processus de pavage du lit en réduisant les contraintes hydrauliques, généralement provoqué par les barrages qui à la fois bloquent le transit sédimentaire et diminuent l'intensité des crues.

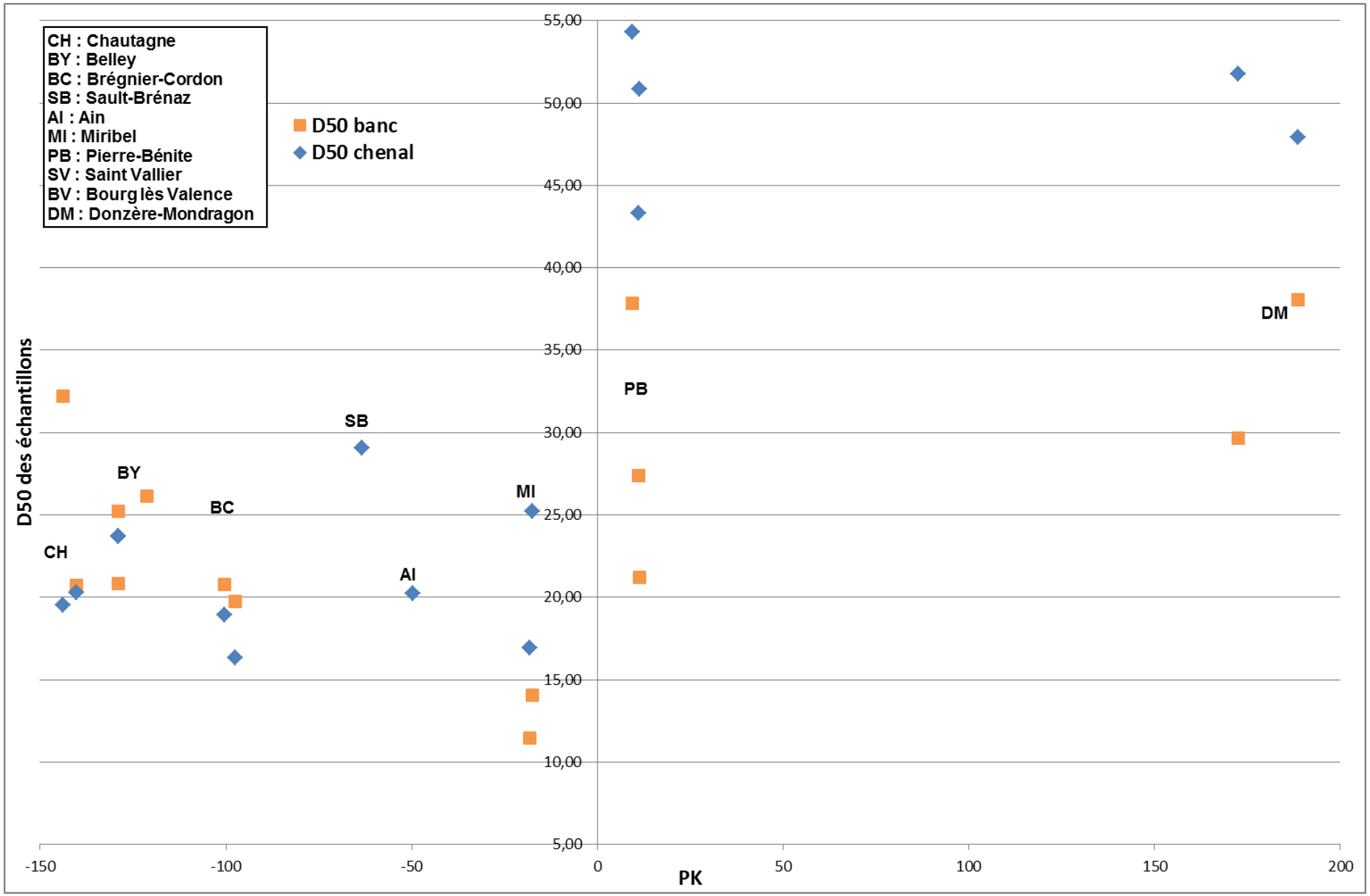


Figure 4-22 : Mesure par comptage du diamètre médian (mm) des échantillons prélevés sur les bancs et dans le chenal au niveau des têtes de bancs (2012)

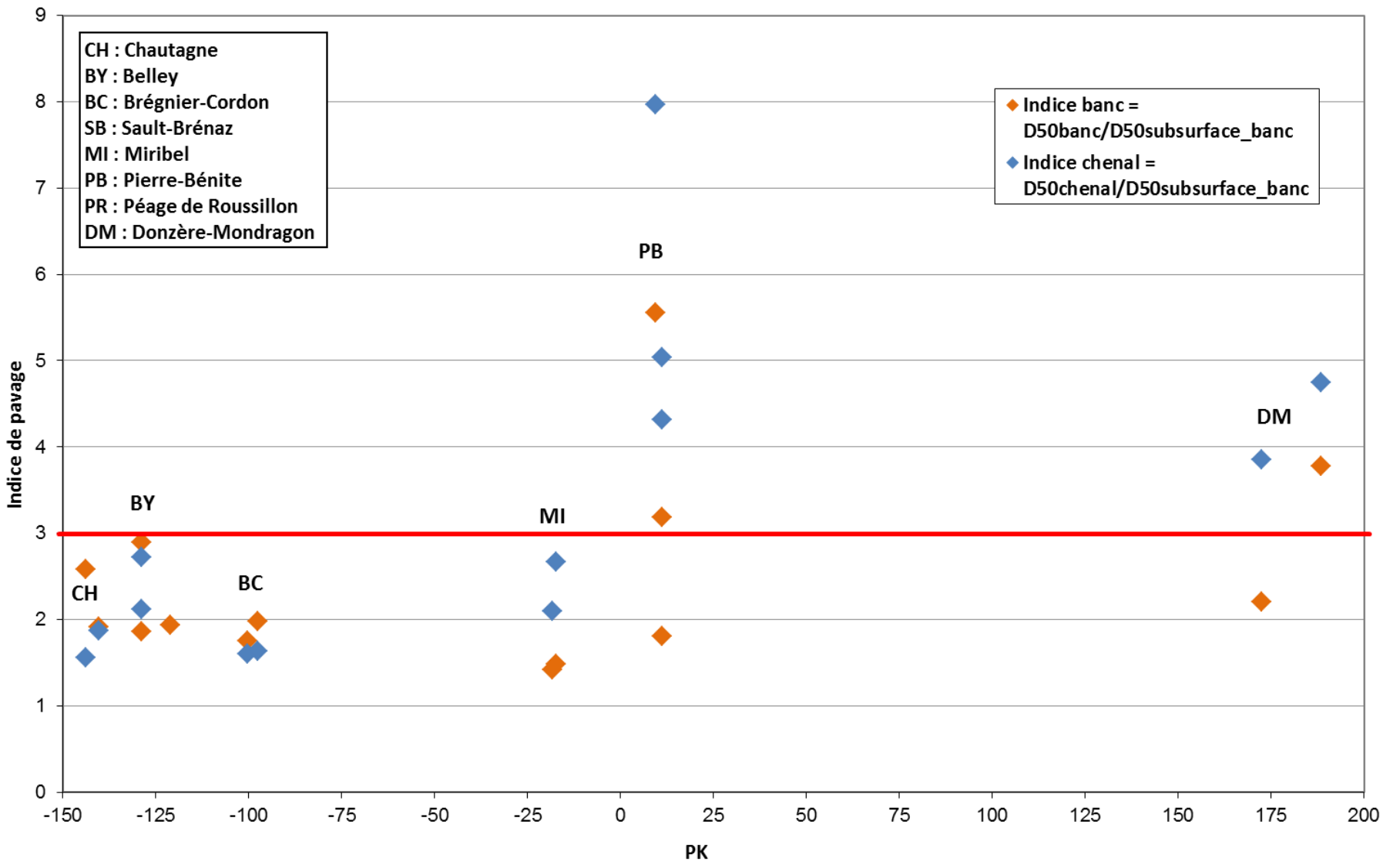


Figure 4-23 : Répartition amont/aval des indices de pavage calculés sur les têtes de bancs et dans le chenal adjacent (campagnes réalisées en 2012)

4.2. Caractérisation longitudinale du patron granulométrique du chenal

Le diamètre médian (D_{50}) est une donnée suffisamment intégrative (50% de l'échantillon) pour rendre compte de l'évolution granulométrique longitudinale sur le continuum fluvial. Lorsqu'on compare les données issues de la bibliographie (Annexe 18) aux D_{50} prélevés à la drague et par la méthode Wolman, on constate certaines similitudes mais aussi des différences notables sur certains secteurs, notamment l'absence de fines dans les retenues (Figure 4-24). Comme ces données étaient par ailleurs incomplètes, imprécises et issues de protocoles d'échantillonnage différents et hétérogènes, cette campagne a constitué un effort important et sans précédent visant à disposer d'un référentiel sur tout le continuum.

La cartographie des D_{50} résultant des dragages (campagnes 2012-13) et des comptages dans le chenal en eau des vieux Rhône (campagnes de 2012 réalisées selon la méthode Wolman, présentées précédemment) a été réalisée sur tout le linéaire sur les Figure 4-25 à Figure 4-29 afin de resituer spatialement les données et de visualiser le patron granulométrique du chenal du Rhône. Les valeurs sont par ailleurs listées dans les Tableau 4-1 et Tableau 4-2 et des agrandissements sont consultables dans l'Annexe 27. La représentation graphique permet quant à elle de caractériser plus précisément la distribution granulométrique longitudinale (Figure 4-31) en mettant en relief la partie grossière (Figure 4-32) et la partie fine (Figure 4-30).

4.2.1. Répartition granulométrique longitudinale

Toutes ces représentations cartographiques et graphiques montrent qu'il n'existe pas sur le Rhône un affinement granulométrique amont-aval mais au contraire une structure granulométrique très partitionnée. Des affinements locaux peuvent être observés dans quelques retenues des secteurs du Haut Rhône : à Génissiat, Belley, Sault Brénaz et Jons (Figure 4-25 & Figure 4-26). Les sédiments les plus fins (argileux, limoneux et sableux) sont généralement observés dans les retenues et dans le Rhône aval, un point 10 km en aval d'Arles et sur les 15 km avant l'embouchure (Figure 4-30). Le Haut Rhône présente globalement une gamme granulométrique plus réduite que le Rhône à l'aval de Sault-Brénaz, en termes de taille des graviers et de quantité de fines déposées dans les retenues. La Figure 4-31 permet de comparer la répartition granulométrique en fonction de la pente du profil en long. En excluant l'amont des barrages, les sédiments échantillonnés dans les vieux Rhône et dans le Rhône total sont plus grossiers (entre 40 et 133 mm) ; il s'agit majoritairement de graviers (Figure 4-32). Les sédiments les plus grossiers sont observés entre le secteur de Saint Vallier et Donzère-Mondragon (majoritairement > 70 mm), un maximum étant atteint dans le Rhône total de Montélimar (133 mm) où la pente sur ce tronçon semble forte (Figure 4-31 et Figure 4-32). La granulométrie met en lumière quatre principaux tronçons : le Haut Rhône, le Rhône médian, le Bas Rhône et le Delta (Figure 4-33). La tendance granulométrique générale décrit une courbe en forme de cloche (asymétrique) qui correspond à la convexité du profil en long (Figure 4-31) : les D_{50} augmentent vers l'aval jusqu'au Bas Rhône puis diminuent jusqu'au Delta.

L'absence d'un gradient granulométrique d'affinement vers l'aval peut être due à la diversité des apports (recharge des affluents), aux discontinuités imposées par les aménagements (blocage du transit en amont des barrages et diminution des pics de crue dans les tronçons court-circuités) et aux variations de pente locale imposées par la géométrie du lit (évolution de la pente et convexité du profil en long).

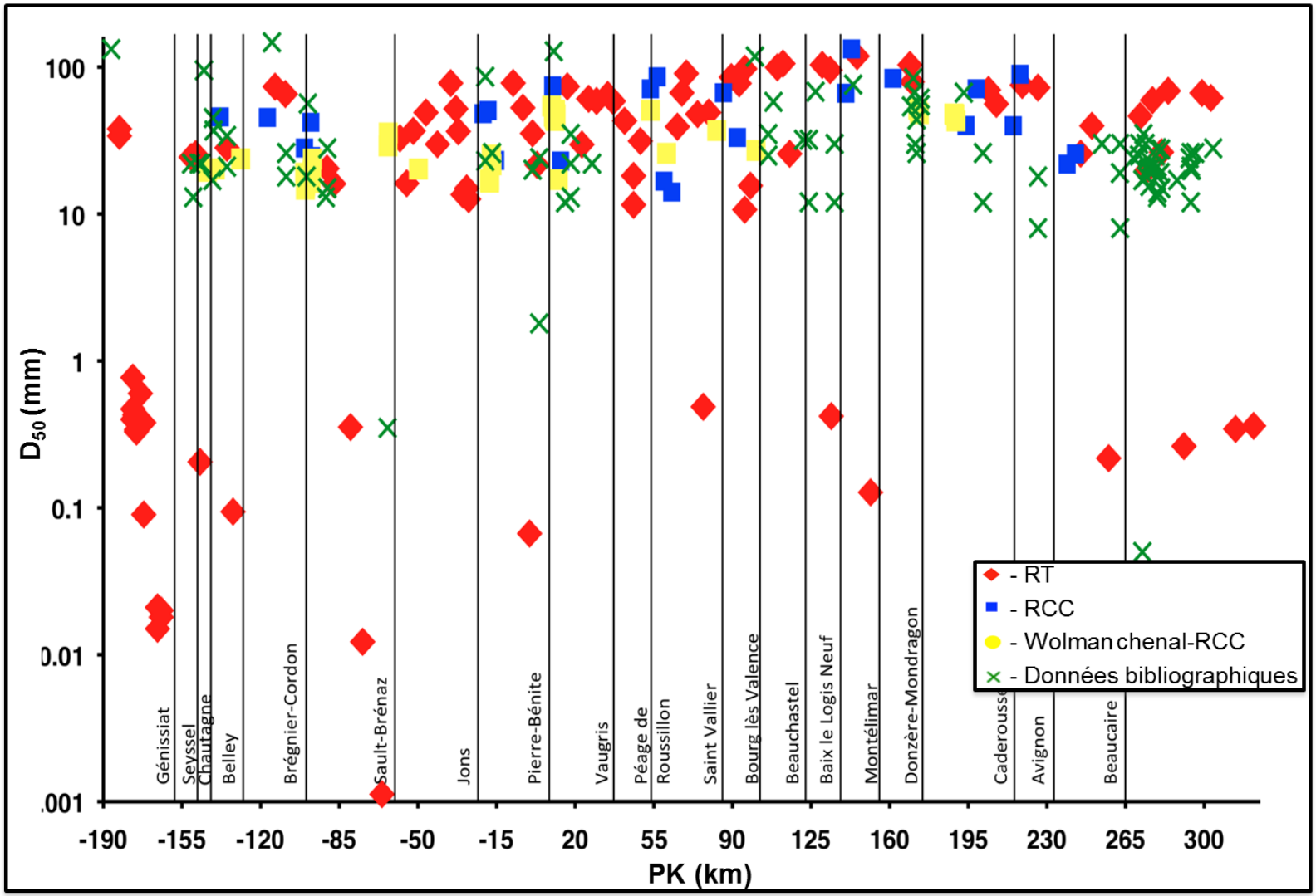


Figure 4-24 : Distribution granulométrique des D_{50} (échelle logarithmique) du linéaire du Rhône établie à partir des données de terrain (RT, RCC et Wolman) et des données bibliographiques

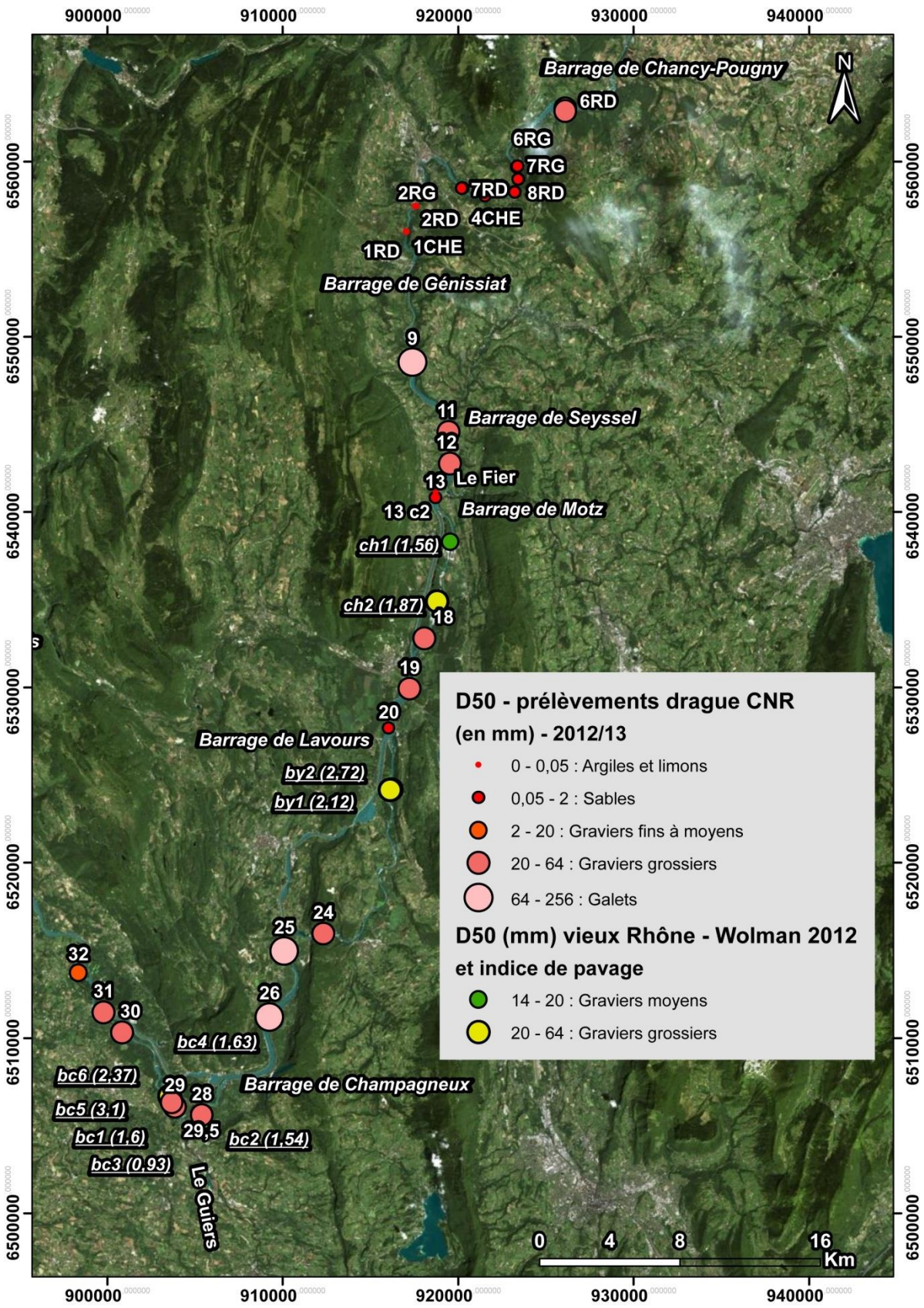


Figure 4-25 : Distribution granulométrique (D_{50} en mm) du fond du lit du Rhône du secteur de Génissiat à Brégnier-Cordon (PK -186 à -83). Les numéros font référence aux résultats des campagnes de terrain de 2012 et 2013 et les données entre parenthèses aux indices de pavage (Résultats dans les Tableau 4-1 & Tableau 4-2)

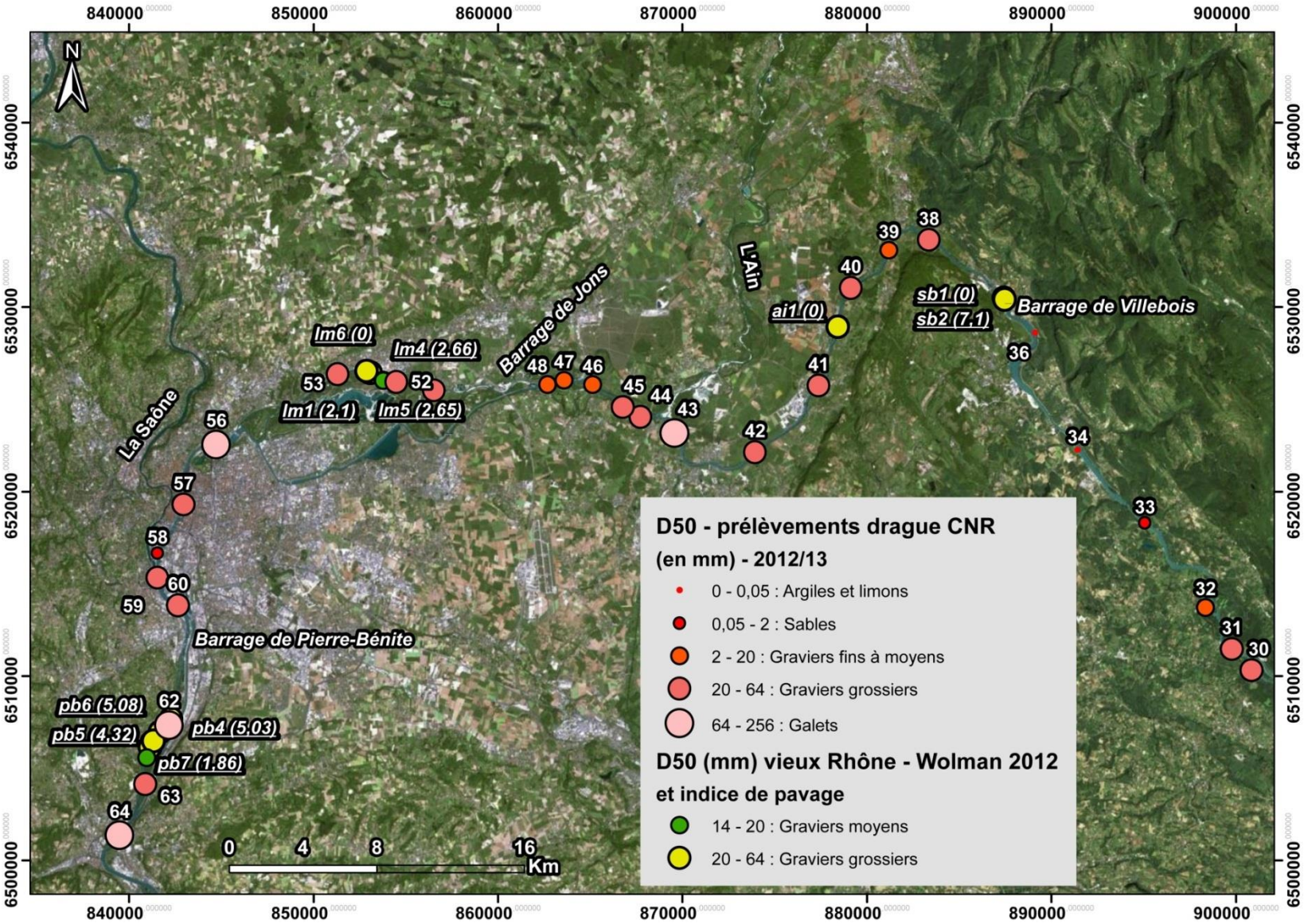


Figure 4-26 : Distribution granulométrique (D_{50} en mm) du fond du lit du Rhône du secteur de Brégnier-Cordon à Pierre-Bénite (PK -93 à 21). Les numéros font référence aux résultats des campagnes de terrain de 2012 et 2013 et les données entre parenthèses aux indices de pavage (Résultats dans les Tableau 4-1 & Tableau 4-2)

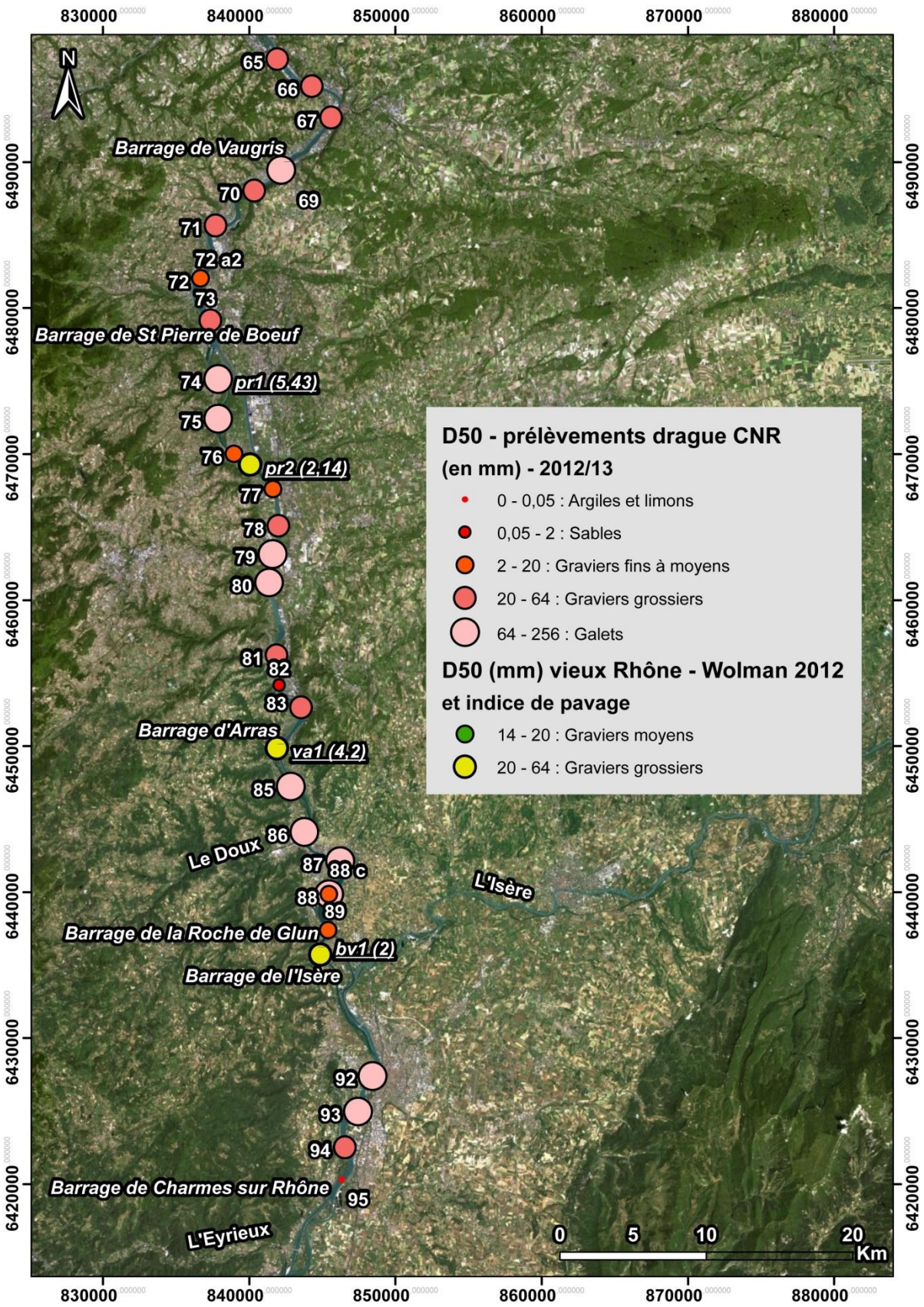


Figure 4-27 : Distribution granulométrique (D_{50} en mm) du fond du lit du Rhône du secteur de Vaugris à Beauchastel (PK 23 à 126). Les numéros font référence aux résultats des campagnes de terrain de 2012 et 2013 et les données entre parenthèses aux indices de pavage (Résultats dans les Tableau 4-1 & Tableau 4-2)

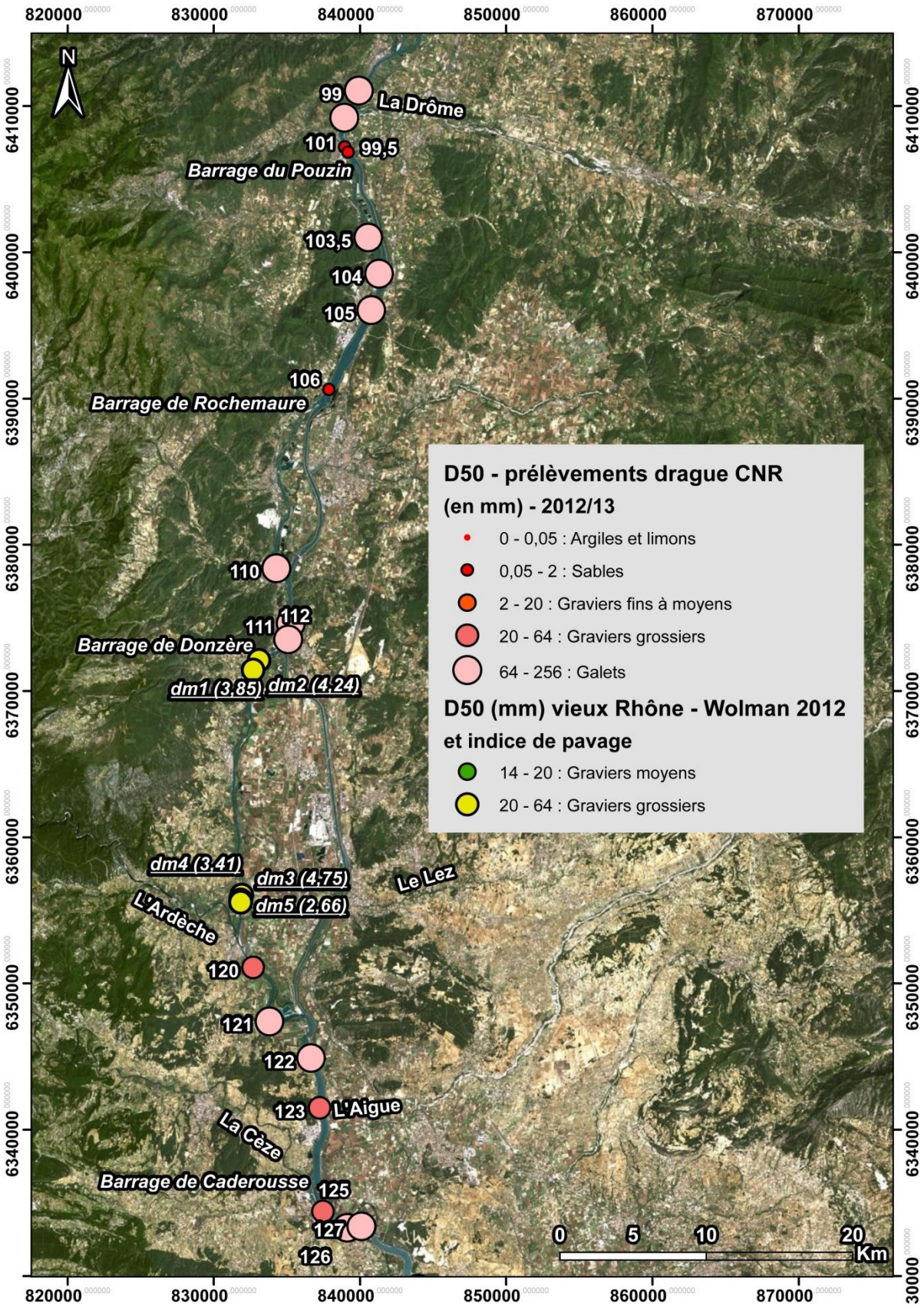


Figure 4-28 : Distribution granulométrique (D_{50} en mm) du fond du lit du Rhône du secteur de Baix le Logis Neuf à Caderousse (PK 126 à 225). Les numéros font référence aux résultats des campagnes de terrain de 2012 et 2013 et les données entre parenthèses aux indices de pavage (Résultats dans les Tableau 4-1 & Tableau 4-2)

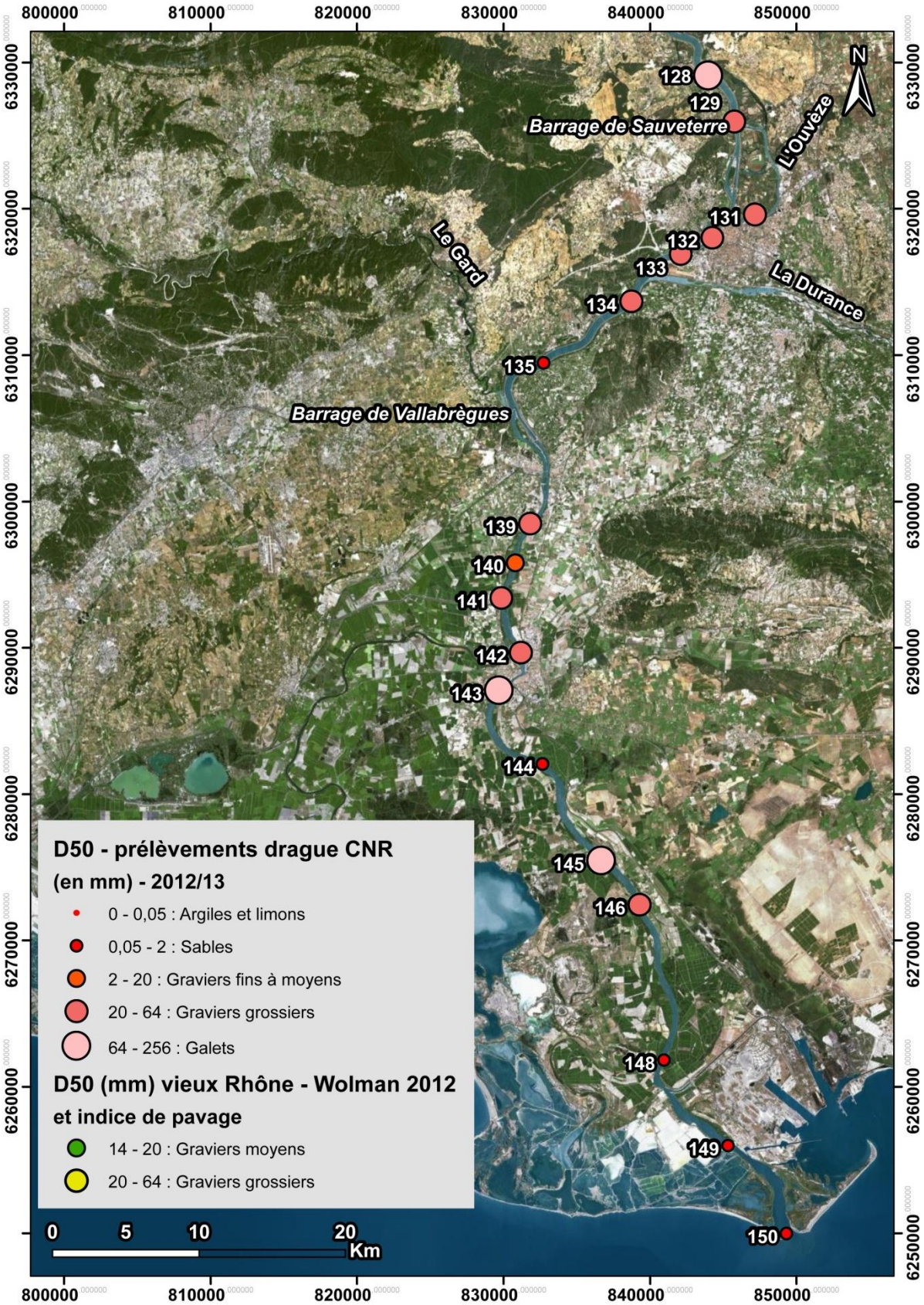


Figure 4-29 : Distribution granulométrique (D_{50} en mm) du fond du lit du Rhône du secteur d'Avignon au Littoral (PK 225 à 330). Les numéros font référence aux résultats des campagnes de terrain de 2012 et 2013 et les données entre parenthèses aux indices de pavage (Résultats dans les Tableau 4-1 & Tableau 4-2)

Campagne granulo wolman 2012 chenal					
Lieu	**Nom échantillon**	**Pk**	**N° référence**	**D50 (mm)**	**Indice pavage**
Chautagne	CHA_2012-05-23_b1-t-ch	-143,75	**ch1**	**27,59**	**2,21**
Chautagne	CHA_2012-05-23_b2-t-ch	-140,20	**ch2**	**20,26**	**1,87**
Belley	BEY_2012-05-22_b2-t-ch	-128,90	**by1**	**23,72**	**2,12**
Belley	BEY_2012-05-22_b2-t-ch	-128,90	**by2**	**23,72**	**2,72**
Brégnier-Cordon	*BRC_2012-05-11_b1-t-ch*	-100,40	**bc1**	**18,95**	**1,6**
Brégnier-Cordon	*BRC_2012-05-11_b1-m-ch*	-100,10	**bc2**	**14,75**	**1,54**
Brégnier-Cordon	*BRC_2012-05-11_b1-q-ch*	-99,95	**bc3**	**15,68**	**0,93**
Brégnier-Cordon	*BRC_2012-05-11_b2-t-ch*	-97,50	**bc4**	**16,34**	**1,63**
Brégnier-Cordon	*BRC_2012-05-11_b2-m-ch*	-97,20	**bc5**	**19,42**	**3,1**
Brégnier-Cordon	*BRC_2012-05-11_b2-q-ch*	-97,00	**bc6**	**23,64**	**2,37**
Sault-Brénaz	*SBR_2012-05-10_b1-t-ch*	-63,32	**sb1**	**29,05**	**0**
Sault-Brénaz	*SBR_2012-05-10_b1-m-ch*	-63,22	**sb2**	**35,59**	**7,1**
Saint-Vulbas	*AIN_2012-05-14_b1-t-ch*	-49,80	**ai1**	**20,23**	**0**
Miribel	*LYM_2012-05-03_b1-t-ch*	-18,20	**lm1**	**16,91**	**2,1**
Miribel	*LYM_2012-05-03_b1-m-ch*	-18,10	**lm2**	**16,44**	**1,68**
Miribel	*LYM_2012-05-03_b1-q-ch*	-18,00	**lm3**	**17,09**	**1,68**
Parc de Miribel Jonage	*LYM_2012-05-03_b2-t-ch*	-17,40	**lm4**	**25,19**	**2,66**
Parc de Miribel Jonage	*LYM_2012-05-03_b2-m-ch*	-17,20	**lm5**	**25,19**	**2,65**
Parc de Miribel Jonage	*LYM_2012-05-03_b2-q-ch*	-17,00	**lm6**	**21,61**	**0**
Ile de Ciselant	*PBN_2012-04-25_b1-t-ch*	9,50	**pb1**	**54,31**	**7,97**
Ile de Jaricot	*PBN_2012-04-25_b1-m-ch*	10,30	**pb2**	**46,23**	**4,98**
Ile de Jaricot	*PBN_2012-04-25_b1-q-ch*	10,70	**pb3**	**44,67**	**3,95**
Table Ronde	*PBN_2012-05-02_b2-t-ch*	11,12	**pb4**	**43,30**	**5,03**
Table Ronde	*PBN_2012-05-02_b2-t2-ch*	11,25	**pb5**	**50,83**	**4,32**
Table Ronde	*PBN_2012-05-02_b2-m-ch*	11,50	**pb6**	**47,23**	**5,08**
Table Ronde	*PBN_2012-05-02_b2-q-ch*	12,50	**pb7**	**17,16**	**1,86**
Péage de Roussillon	*PDR_2012-08-07_b-q-ch*	53,60	**pr1**	**50,74**	**5,43**
Péage de Roussillon	*PDR_2012-06-07_b2-t-ch*	60,70	**pr2**	**25,87**	**2,14**
Saint Vallier	*VAL_2012-08-07_b-m-ch*	83,00	**va1**	**37,03**	**4,2**
Bourg lès Valence	*BLV_2012-08-07_b-q-ch*	100,50	**bv1**	**27,05**	**2**
Donzère-Mondragon	*DZM_2012-05-30_b2-t-ch*	172,50	**dzm1**	**51,74**	**3,85**
Donzère-Mondragon	*DZM_2012-05-30_b2-m-ch*	173,20	**dzm2**	**48,21**	**4,24**
Donzère-Mondragon	*DZM_2012-05-30_b1-t-ch*	188,55	**dzm3**	**47,92**	**4,75**
Donzère-Mondragon	*DZM_2012-05-30_b1-m-ch*	189,00	**dzm4**	**47,46**	**3,41**
Donzère-Mondragon	*DZM_2012-05-30_b1-q-ch*	189,50	**dzm5**	**43,00**	**2,66**

Tableau 4-1 : Référencement des mesures granulométriques (D_{50} en mm) réalisées en 2012 dans le chenal des vieux Rhône par comptage selon la méthode Wolman et des indices de pavage (D_{50} surface/D_{50} subsurface du banc). Extrait de l'Annexe 26.

Campagne dragages CNR 2012-2013			
Nom échantillon	PK	N° référence	D50 (mm)
Génissiat CNR-6RD	-182,85	**6RD**	**38,00**
Génissiat CNR-6RG	-182,85	**6RG**	**34,00**
Génissiat CNR-7RD	-176,9	**7RD**	**0,77**
Génissiat CNR-7CHE	-176,9	**7CHE**	**0,47**
Génissiat CNR-7RG	-176,9	**7RG**	**0,40**
Génissiat CNR-8RD	-176,05	**8RD**	**0,40**
Génissiat CNR-8CHE	-176,05	**8CHE**	**0,43**
Génissiat CNR-5RD	-175,3	**5RD**	**0,34**
Génissiat CNR-5CHE	-175,3	**5CHE**	**0,33**
Génissiat CNR-4CHE	-173,55	**4CHE**	**0,60**
Génissiat CNR-9CHE	-172,05	**9CHE**	**0,38**
Génissiat CNR-9RG	-172,05	**9RG**	**0,09**
Génissiat CNR-2RD	-165,93	**2RD**	**0,02**
Génissiat CNR-2RG	-165,93	**2RG**	**0,02**
Génissiat CNR-1CHE	-164,27	**1CHE**	**0,02**
Génissiat CNR-1RD	-164,27	**1RD**	**0,02**
SEY-9-2013-07-11	-156	**9**	**69,57**
SEY-10-2013-07-11	-152,5	**10**	**0,17**
SEY-11-2012-08-21	-151	**11**	**24,37**
SEY-12-2012-08-21	-149	**12**	**25,55**
SEY-13-a-2012-08-21	-147	**13**	**0,21**
SEY-13-c2-2012-08-21	-147	**13 c2**	**0,00**
CHA-18-2012-08-22	-138	**18**	**45,80**
CHA-19-2012-08-22	-135	**19**	**28,22**
CHA-20-2012-08-22	-132,3	**20**	**0,09**
BEL-24-2012-08-22	-117	**24**	**45,42**
BEL-25-2012-08-22	-113,6	**25**	**73,61**
BEL-26-a2-2012-08-23	-109	**26**	**65,48**
BRC-28-2013-02-21	-100,5	**28**	**28,12**
BRC-29-2013-02-21	-97,7	**29**	**42,09**
BRC-29,5-2013-02-21	-97,4	**29,5**	**24,61**
BRC-30-2013-02-21	92,2	**30**	**33,17**
BRC-31-2012-08-23	-90,5	**31**	**20,40**
BRC-32-2012-08-23	-87,5	**32**	**16,06**
BRC-33-2012-08-24	-80	**33**	**0,35**
SBZ-34-2012-08-24	-74,6	**34**	**0,01**
SBZ-36bis-a-2012-08-24	-66	**36**	**0,00**
AIN-38-2012-08-27	-58	**38**	**32,73**
AIN-39-2012-08-27	-55	**39**	**16,17**
AIN-40-2012-08-27	-52,1	**40**	**36,76**
AIN-41-2012-08-27	-46,4	**41**	**49,02**
AIN-42-2012-08-28	-41,3	**42**	**29,83**
AIN-43-2012-08-28	-35,4	**43**	**77,74**
AIN-44-2012-08-28	-33,1	**44**	**51,96**
AIN-45-2012-08-28	-32	**45**	**36,49**
AIN-46-2012-08-29	-29,9	**46**	**13,55**
AIN-47-2012-08-29	-28,3	**47**	**14,94**
AIN-48-2012-08-29	-27,4	**48**	**12,62**
LYM-51-2013-03-20	-21	**51**	**48,20**
LYM-52-2013-03-20	-18,8	**52**	**50,67**
LYM-53-2013-03-20	-15,4	**53**	**23,16**
LYM-56-2012-08-30	-7,6	**56**	**77,88**
LYM-57-2012-08-30	-3,3	**57**	**52,83**
LYM-58-2012-08-30	-0,3	**58**	**0,07**
LYM-59-2012-08-30	1	**59**	**35,38**
LYM-60-2012-08-30	3	**60**	**21,63**
PBN-62-2012-08-31	10	**62**	**74,45**
PBN-63-2012-08-31	13,5	**63**	**22,93**
PBN-64-2012-08-31	16,5	**64**	**73,84**
VAU-65-2013-01-23	23	**65**	**29,69**
VAU-66-2013-01-23	26	**66**	**60,84**
VAU-67-a-2013-01-23	29,5	**67**	**58,76**

Campagne dragages CNR 2012-2013			
Nom échantillon	PK	N° référence	D50 (mm)
VAU-69-2013-01-24	34,5	**69**	**64,68**
VAU-70-2013-01-24	37	**70**	**58,55**
VAU-71-2013-01-24	42	**71**	**43,05**
VAU-72-a-2013-01-24	46	**72**	**11,53**
VAU-72-a2-2013-01-24	46	**72 a2**	**18,17**
VAU-73-a-2013-01-24	49	**73**	**31,35**
PDR-74-2013-03-21	53,5	**74**	**71,15**
PDR-75-2013-03-21	56,5	**75**	**85,90**
PDR-76-2013-03-21	59,5	**76**	**16,74**
PDR-77-a-2012-10-09	63	**77**	**14,11**
PDR-78-2012-10-09	65,5	**78**	**39,30**
VAL-79-2012-10-09	67,5	**79**	**66,83**
VAL-80-2012-10-08	69,5	**80**	**90,43**
VAL-81-2012-10-08	74,5	**81**	**47,86**
VAL-82-a-2012-10-08	77	**82**	**0,49**
VAL-83-2012-10-08	79,5	**83**	**49,05**
BLV-85-2013-01-30	86	**85**	**66,87**
BLV-86-2013-01-30	89,5	**86**	**85,41**
BLV-87-2013-01-30	93	**87**	**77,43**
BLV-88-b-2013-01-30	95,5	**88**	**10,69**
BLV-88-c-2013-01-30	95,5	**88 c**	**97,39**
BLV-89-2013-01-30	98	**89**	**15,59**
BEA-92-2013-01-29	110	**92**	**99,62**
BEA-93-2013-01-29	112,5	**93**	**105,57**
BEA-94-2013-01-29	115,5	**94**	**25,68**
BEA-95-2013-01-29	118	**95**	**0,04**
BLN-99-2012-10-05	130	**99**	**103,50**
BLN-99,5-a-b-c-2012-10-05	132	**99,5**	**95,43**
BLN-101-a-2012-10-05	134	**101**	**0,42**
BLN-101,5-2012-10-05	134,5	**101,5**	**0,14**
BLN-103,5-a-2012-10-04	140,5	**103,5**	**66,35**
BLN-104-a-2012-10-04	143	**104**	**133,00**
MON-105-a-2012-10-04	145,5	**105**	**118,66**
MON-106-2012-10-04	151,5	**106**	**0,16**
DZM-110-a-bis-3-2012-10-02	161,5	**110**	**83,78**
DZM-111-a2-2012-10-02	169	**111**	**103,45**
DZM-112-2012-10-02	170	**112**	**79,38**
DZM-120-2012-10-03	194	**120**	**40,06**
DZM-121-2012-10-03	198,5	**121**	**71,18**
DZM-122-2012-10-03	204	**122**	**69,93**
DZM-123-2012-10-03	207,5	**123**	**56,12**
CAD-125-2013-04-26	215	**125**	**39,93**
CAD-126-2013-04-26	218	**126**	**89,38**
AVI-127-2013-04-26	219	**127**	**75,43**
AVI-128-2013-04-26	226	**128**	**72,50**
AVI-129-2013-04-26	230	**129**	**45,13**
AVI-131-2013-04-25	239	**131**	**21,84**
AVI-132-2013-04-25	242,7	**132**	**25,65**
AVI-133-2013-04-25	245	**133**	**25,74**
AVI-134-2013-04-25	250	**134**	**39,82**
AVI-135-2013-04-25	257,5	**135**	**0,22**
GRO-139-2013-04-24	271,5	**139**	**44,21**
GRO-140-a-2013-04-24	274,5	**140**	**19,95**
GRO-141-2013-04-24	277	**141**	**50,38**
GRO-142-2013-04-24	281	**142**	**30,22**
GRO-143-2013-04-23	284	**143**	**67,10**
GRO-144-2013-04-23	291	**144**	**0,26**
GRO-145-2013-04-23	299	**145**	**69,02**
GRO-146-2013-04-23	303	**146**	**61,68**
GRO-148-2013-04-22	314	**148**	**0,32**
GRO-149-2013-04-22	322	**149**	**0,32**
GRO-150-2013-04-22	330	**150**	**0,22**

Tableau 4-2 : Référencement des mesures granulométriques (D_{50} en mm) réalisées en 2012 et 2013 dans le chenal par dragage CNR. Extrait de l'Annexe 22

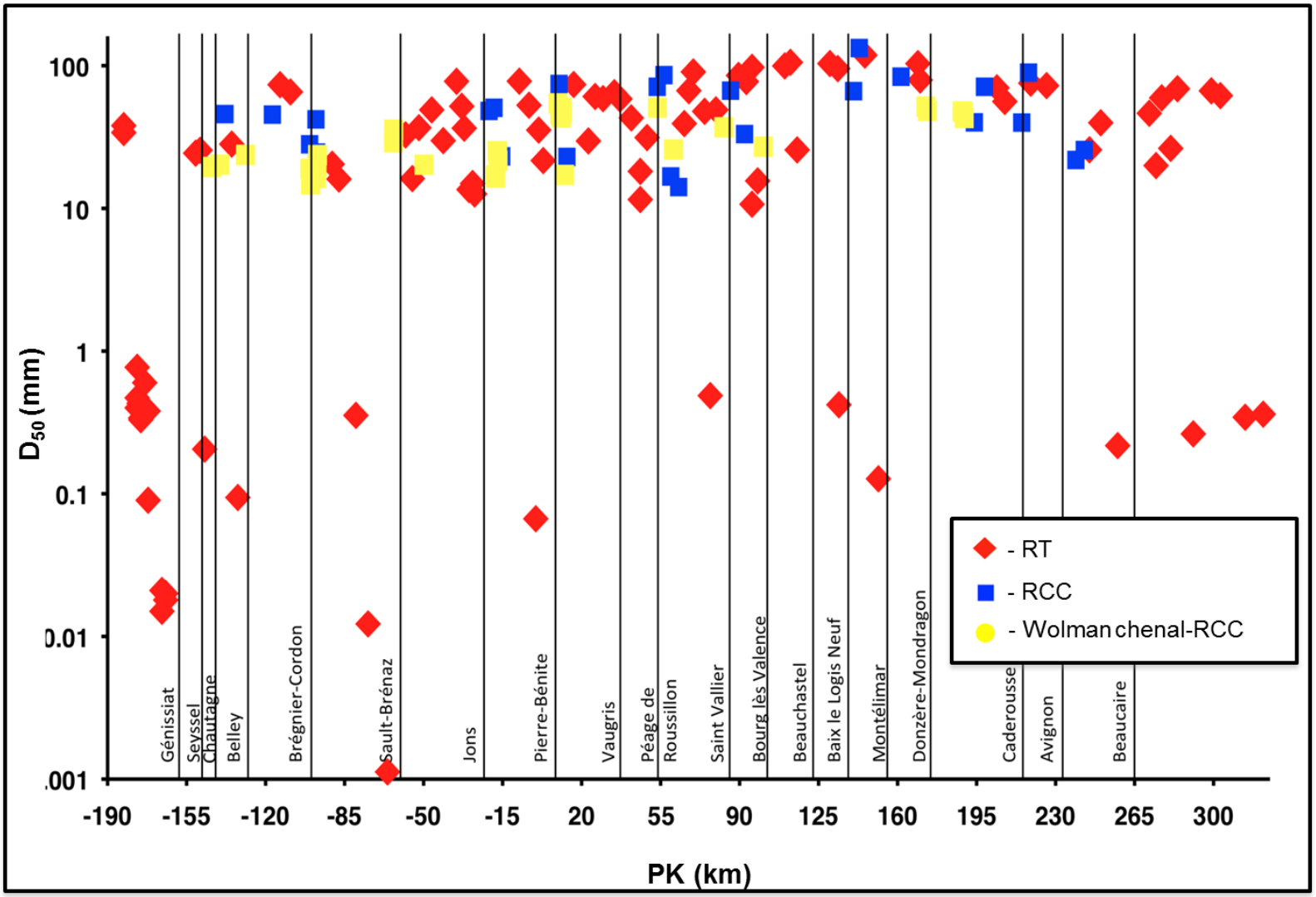


Figure 4-30 : Répartition granulométrique du diamètre médian (D_{50} en échelle log) des prélèvements effectués dans le chenal du Rhône en bateau (RC&RCC) et à pied (RCC) – en collaboration avec la CNR (2012-2013) – ***Echelle log mettant en évidence la distribution des fines***

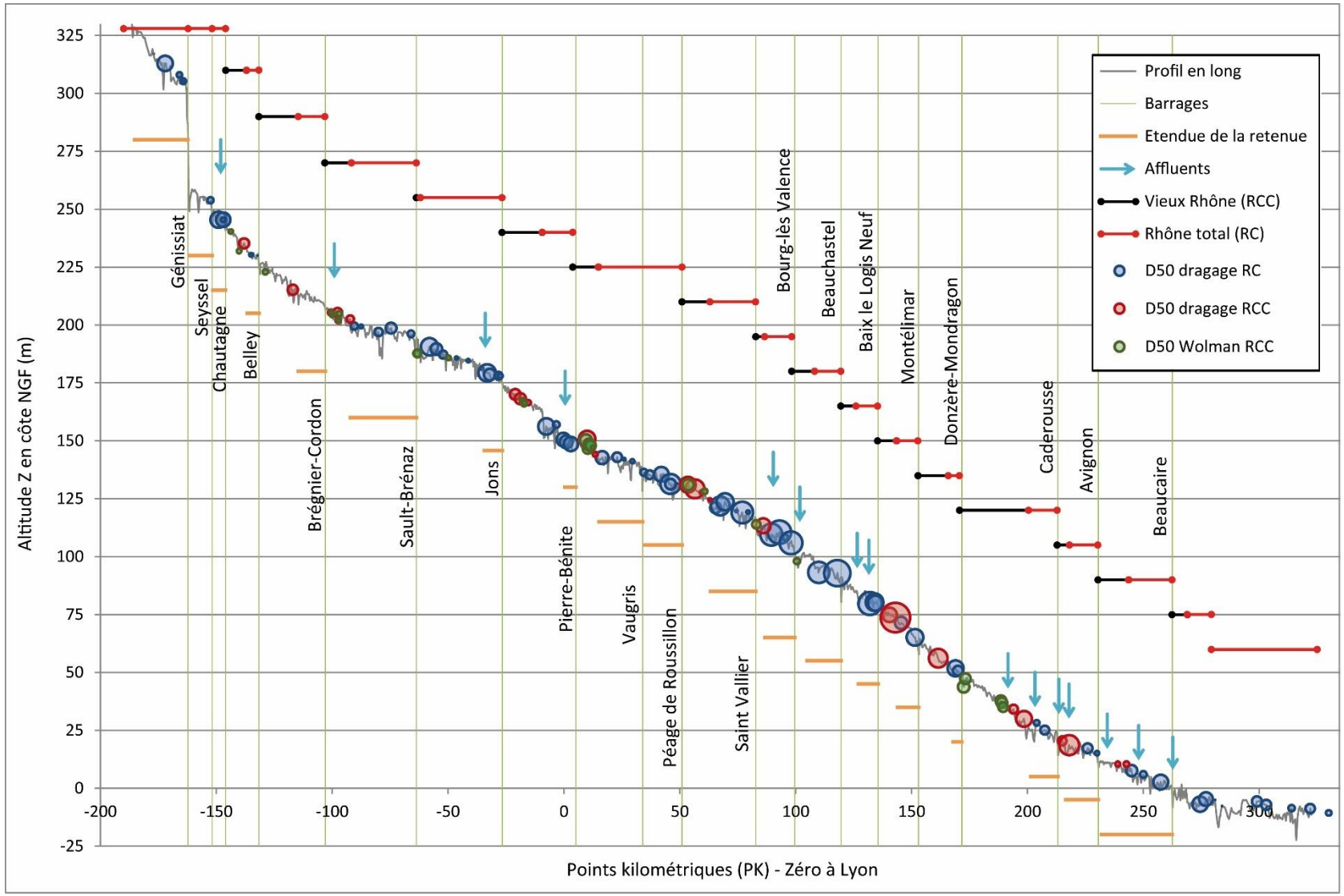


Figure 4-31 : Distribution granulométrique longitudinale sur le profil en long actuel du Rhône (campagnes Wolman et dragages CNR 2012-13). Le diamètre des cercles représente le D_{50} de l'échantillon réduit à 12% du D_{50} réel (valeurs consultables Tableau 4-1 et Tableau 4-2).

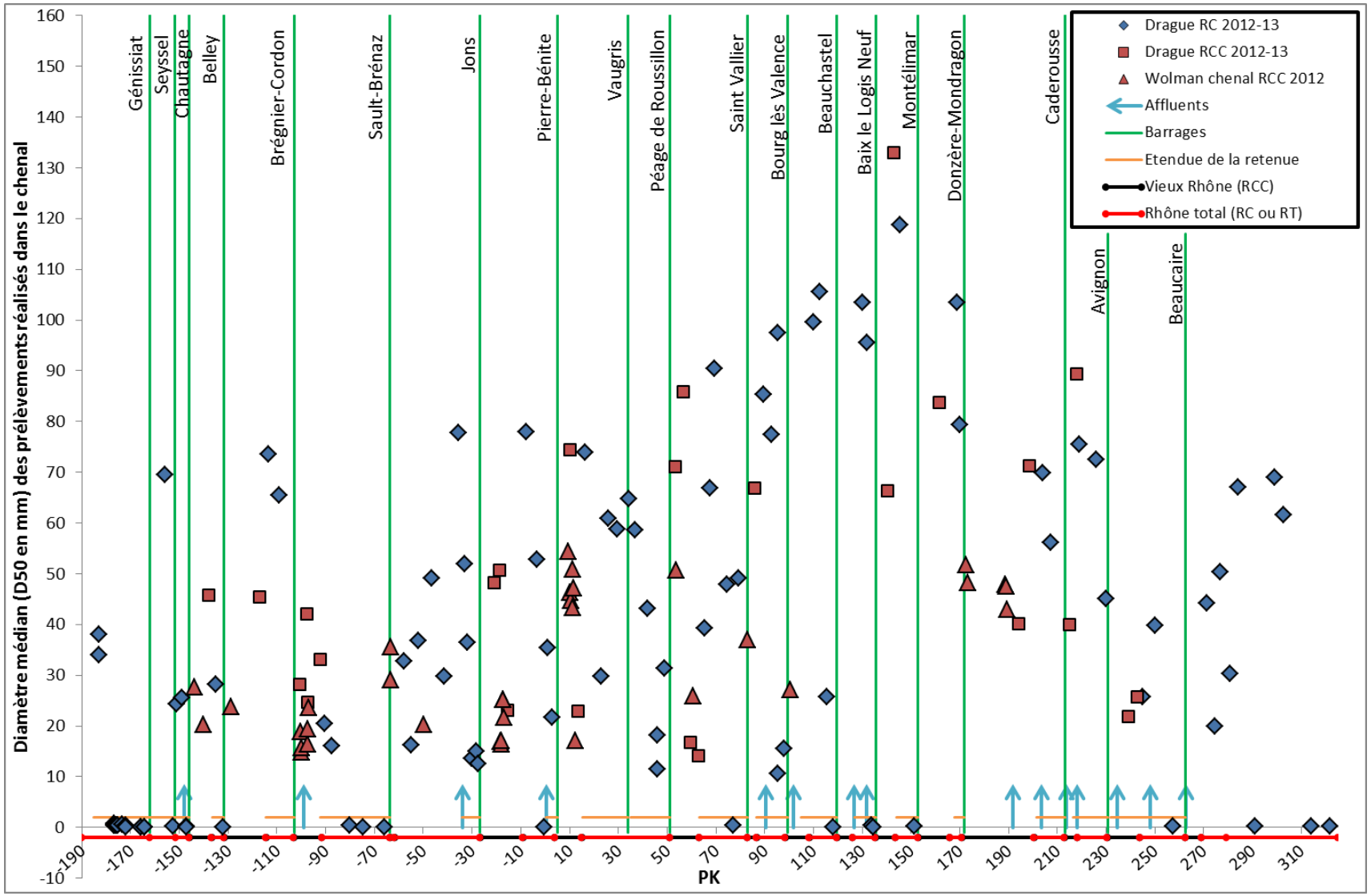


Figure 4-32 : Répartition granulométrique du diamètre médian (D_{50} en mm) des prélèvements effectués dans le chenal du Rhône en bateau (RC&RCC) et à pied (RCC) – en collaboration avec la CNR (2012-2013) – ***Echelle arithmétique mettant en évidence la répartition des sédiments grossiers***

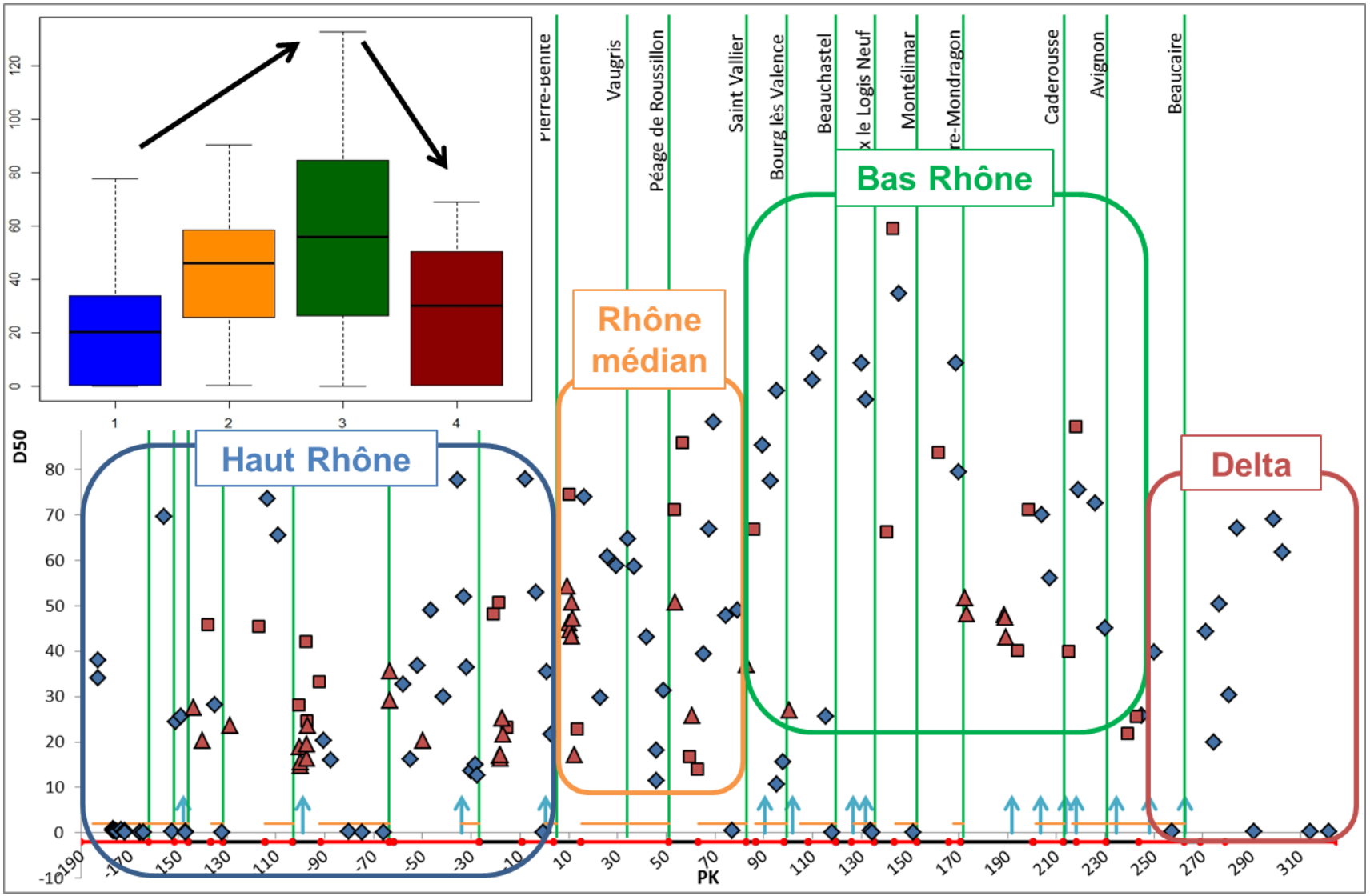


Figure 4-33 : Distribution granulométrique compartimentée en quatre grands secteurs. La répartition des D_{50} de cette sectorisation est représentée sous la forme de boîtes à moustaches donnant les valeurs de D_{50} médian pour le Haut Rhône = 20 mm, le Rhône médian = 46 mm, le Bas Rhône = 56 mm et le Delta = 30 mm.

4.2.2. Répartition par rapport aux affluents

L'objectif est de caractériser les affluents et identifier les sources des apports sédimentaires actuels à partir du patron granulométrique.

La Figure 4-34 tente de synthétiser l'effet des affluents sur la répartition granulométrique longitudinale en présentant les conditions amont et aval moyennes. Pour comprendre si les confluences constituent des zones où la distribution granulométrique est perturbée, on a représenté, à l'aide d'histogrammes, la moyenne des quartiles granulométriques (D_{16} à D_{90}) normalisés par leur moyenne (par secteur) pour chaque catégorie de biefs. Ces biefs ont été déterminés par une analyse longitudinale des quartiles de la distance à la confluence amont (AM25 à AM100) et aval (AV25 à AV100) jusqu'à un barrage ou à une autre confluence. Les distances et les segmentations sont recensées dans le Tableau 4-3. On observe que les histogrammes, notamment ceux des D_{90}, décrivent une courbe en cloche (à l'exclusion du D_{16} et D_{50} à AM100) avec les maxima localisés autour de la confluence, entre AM50 et AV50. Ce phénomène pourrait s'expliquer par le stockage de la plupart des apports des affluents (éventuellement plus grossiers) au niveau des confluences, où la pente est généralement faible, avant leur remobilisation par les crues (chapitre 2). Néanmoins, les pentes moyennes de la ligne d'eau et du fond du lit ne semblent pas être liées à la distribution des D_{50} amont-aval moyenne des affluents. Les valeurs les granulométries les plus faibles sont situées à l'aval de la confluence, à AV100. Cette diminution de la moyenne peut être dû au stockage des fines dans les retenues. Chaque configuration est assez spécifique et aucune tendance claire ne s'exprime : les phénomènes ne peuvent pas être généralisés ; ils sont locaux et il faut considérer chaque affluent avec ses apports (qui diffèrent fortement), les pentes et le régime hydrologique au niveau de la confluence.

La répartition granulométrique a été retracée autour de chaque confluence des principaux affluents du Rhône : le Fier et le Guiers en Figure 4-35, l'Ain et la Saône en Figure 4-36, le Doux, l'Isère, l'Eyrieux et la Drôme en Figure 4-37 et enfin l'Ardèche, le Lez, la Cèze, l'Aigue, l'Ouvèze, la Durance et le Gard en Figure 4-38. Une synthèse des connaissances des apports actuels de ces affluents par rapport au Rhône a été réalisée et confrontée à nos observations dans le Tableau 4-4. L'Etude Globale du Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5) rend compte des recharges actuelles par les affluents, en taille des particules et en quantité des apports, tout en considérant les opérations d'extraction et les différentes études de terrain réalisées aux confluences. Malgré la densité de points existant sur tout le fleuve, certains secteurs compris entre deux affluents ou un affluent et un barrage ne présentent parfois qu'une faible quantité de données ne permettant pas de suivre avec précision l'évolution granulométrique depuis la confluence, notamment sur le Rhône médian et le Bas Rhône. Nous retiendrons principalement que les fines apportées notamment par l'Arve, le Fier, le Guiers, la Saône, l'Isère et la Durance se retrouveraient stockées dans les retenues de la plupart des barrages aval. Les apports de l'Ain en graviers feraient baisser la valeur du D_{50} depuis la confluence jusqu'au barrage de Jons, de la même façon que certains affluents en aval de l'Ardèche qui alimenteraient le fleuve en sédiments moins grossiers que la charge en place. La granulométrie des apports de l'Ardèche (D_{50} compris entre 36 et 66 mm) est plus ou moins équivalente à celle du Rhône en aval de la confluence (entre 40 et 70 mm environ). Les observations données dans le Tableau 4-4 permettent de donner une idée qualitative de la dynamique à l'aval des confluences, ne considérant pas la part des héritages ou le rôle de la pente par exemple. Ces premiers résultats sont donc à considérer avec précautions et une analyse granulométrie plus fine est sans doute nécessaire au droit des différentes confluences pour vraiment les confirmer. Malgré l'effort engagé, le pas d'échantillonnage actuel est sans doute trop grand compte tenu de l'extrême fragmentation du continuum

Affluents	Distance amont	Quartile amont	Distance aval	Quartile aval
Le Fier	3,61	0,54	2,18	0,54
Le Guiers	3,83	0,96	35,47	8,87
L'Ain	29,67	7,42	7,33	1,83
La Saône	27,12	6,78	4,63	1,16
Le Doux	7,49	1,87	9,31	2,33
L'Isère	2,17	0,54	17,83	4,46
L'Eyrieux	6,91	1,73	5,03	1,26
La Drôme	5,03	1,26	4,06	1,01
L'Ardèche	19,92	4,98	11,68	2,92
Le Lez	11,68	2,92	9,81	2,45
La Cèze	0,44	0,11	4,37	1,09
L'Aigue	4,37	1,09	12,70	3,17
L'Ouvèze	3,89	0,97	13,46	3,36
La Durance	13,46	3,36	14,55	3,64
Le Gard	0,24	0,06	16,64	4,16
Moyenne	**9,32**	**2,31**	**11,27**	**2,82**

Tableau 4-3 : Segmentation du secteur amont et aval de la confluence avec un affluent jusqu'à un ouvrage ou une autre confluence selon les quartiles propres de la distance à l'affluent (en km)

Les affluents peuvent constituer des points de recharge sédimentaire du Rhône qu'il n'est pas évident d'observer à partir du seul indicateur granulométrique, et surtout sans réaliser un suivi précis du transport sédimentaire. La nature des apports des affluents (sédiments fins versus grossiers) ne peut pas directement être corrélée à ce que l'on observe à l'aval immédiat de la confluence. De plus, ces observations ne permettent pas de déterminer quand ont lieu les apports pour chaque affluent, si ceux-ci sont stockés à la confluence et quand ils sont transportés vers l'aval : en période de hautes eaux ou de crues morphogènes. Pour ce faire, il serait nécessaire de densifier les mesures autour des confluences et dans les affluents afin de caractériser la capacité de transport et de calculer plus précisément le débit solide provenant des affluents.

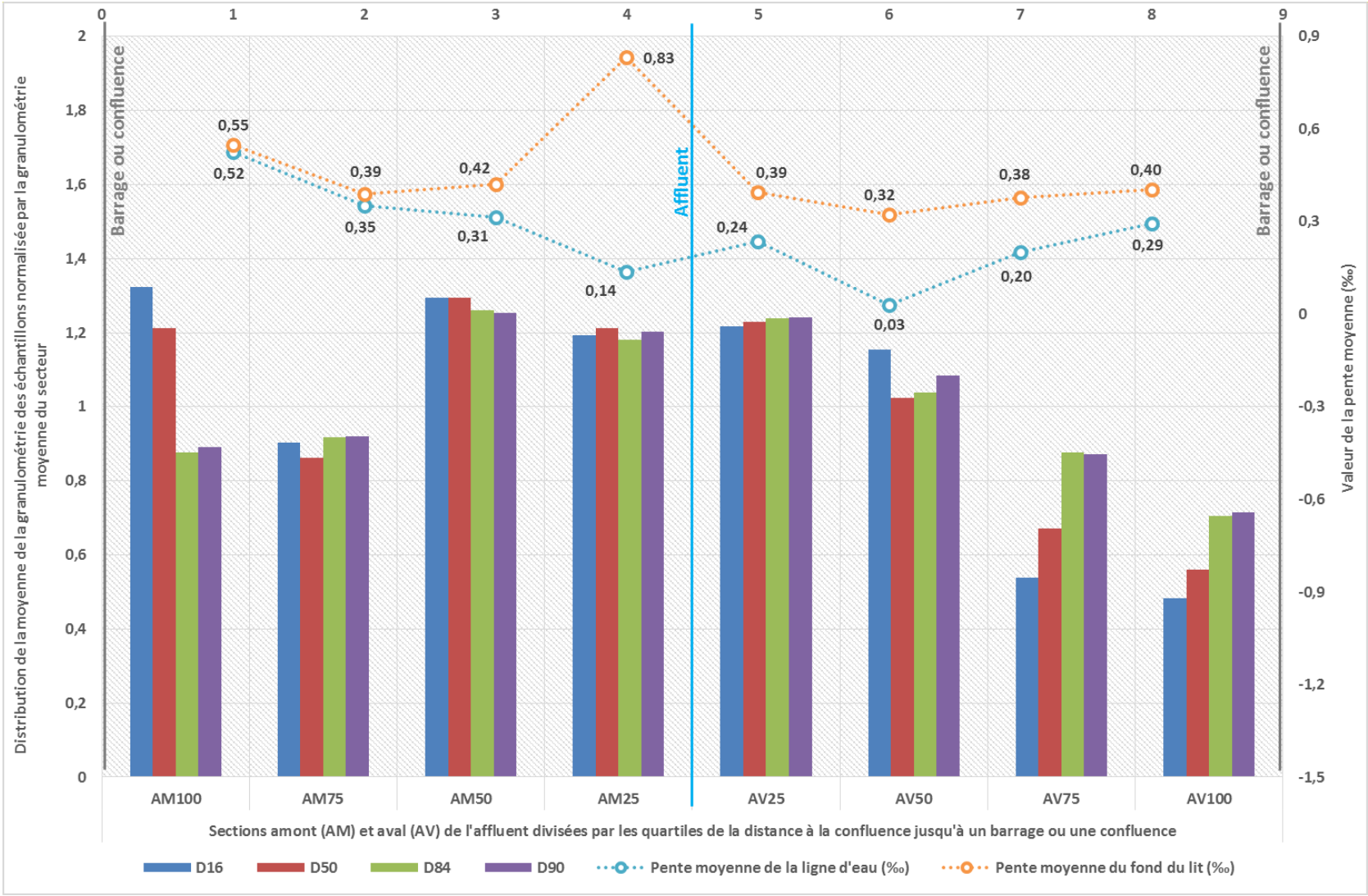


Figure 4-34 : Distribution de la moyenne des D_{16}, D_{50}, D_{84} et D_{90} des échantillons normalisés par leur moyenne sur chaque secteur depuis la confluence avec les affluents vers l'amont et vers l'aval jusqu'à un « obstacle » (barrage ou confluence). Courbe de l'évolution de la pente moyenne par section. Valeurs des distances recensées dans le Tableau 4-3

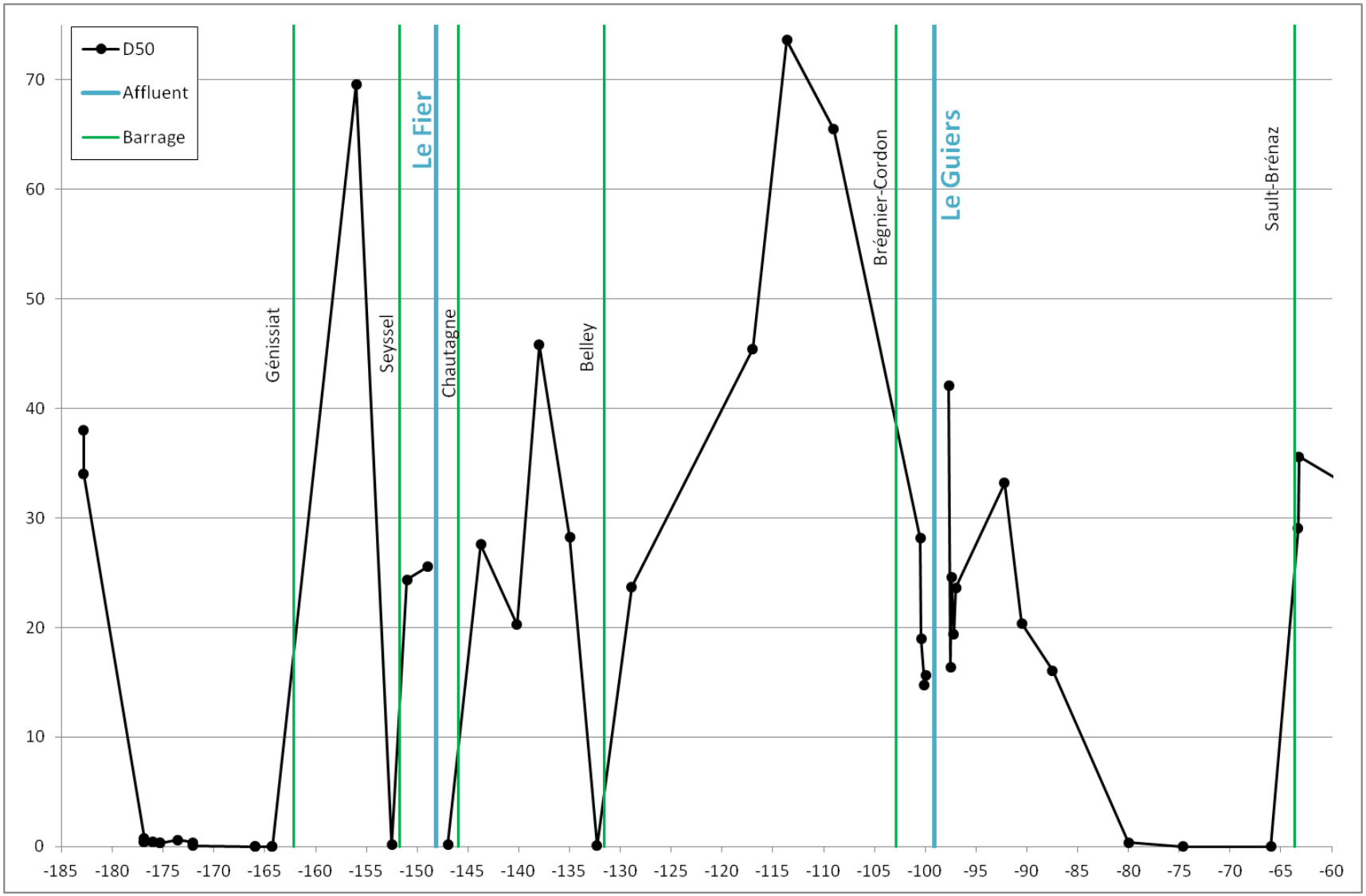


Figure 4-35 : Distribution granulométrique (D_{50}) autour des confluences du Fier et du Guiers

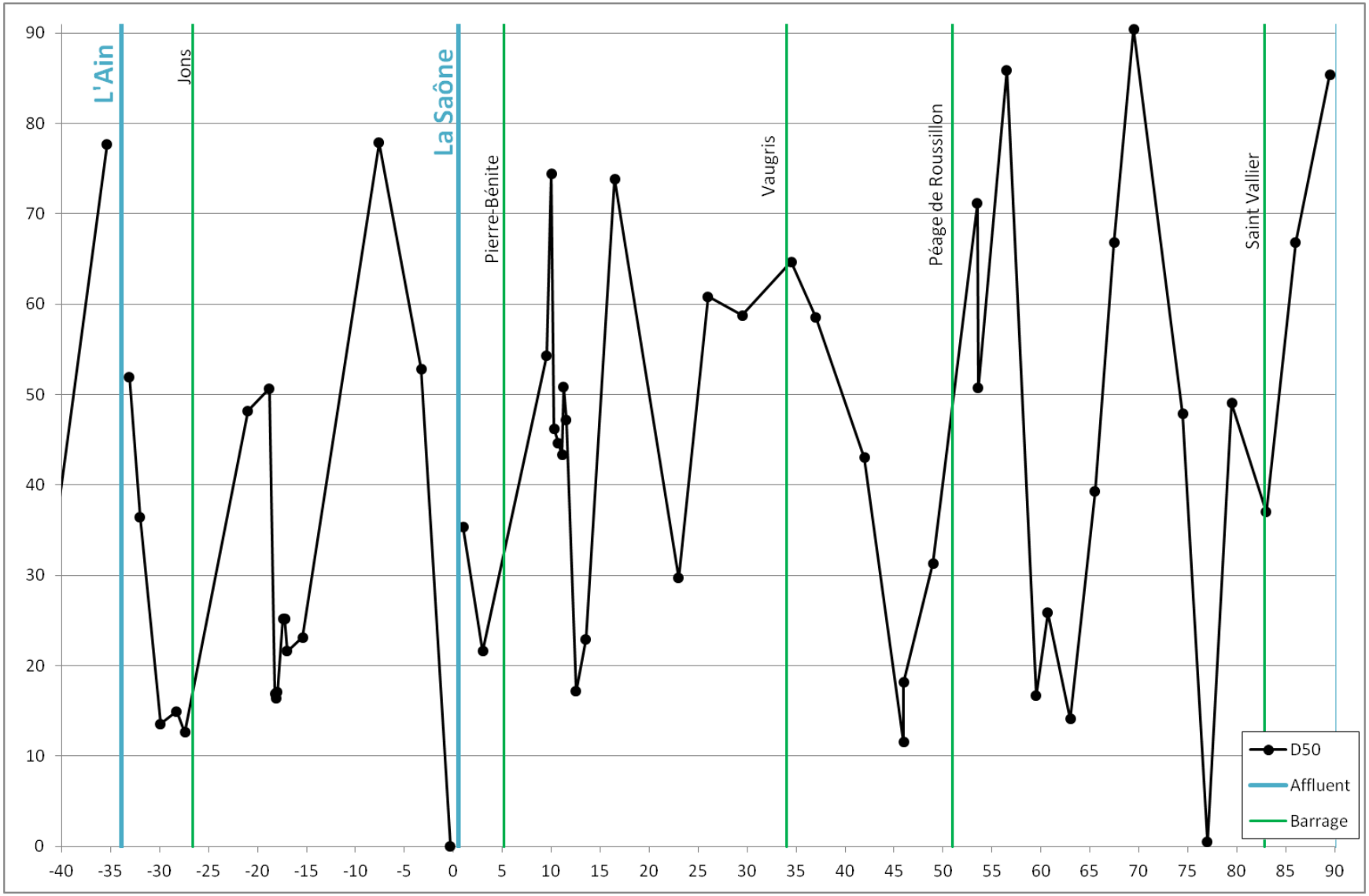


Figure 4-36 : Distribution granulométrique (D_{50}) autour des confluences de l'Ain et de la Saône

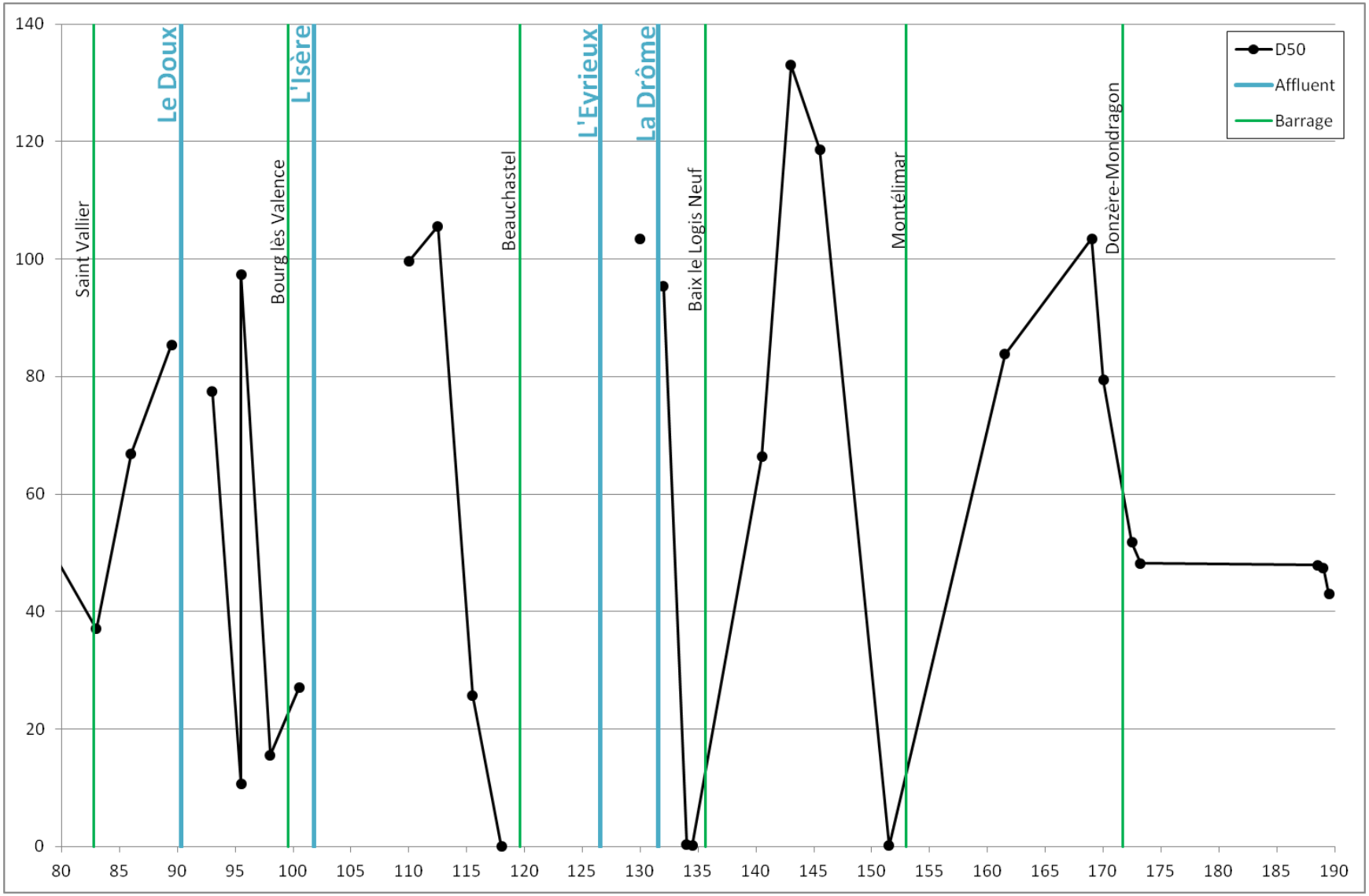


Figure 4-37 : Distribution granulométrique (D_{50}) autour des confluences du Doux, de l'Isère, de L'Eyrieux et de la Drôme

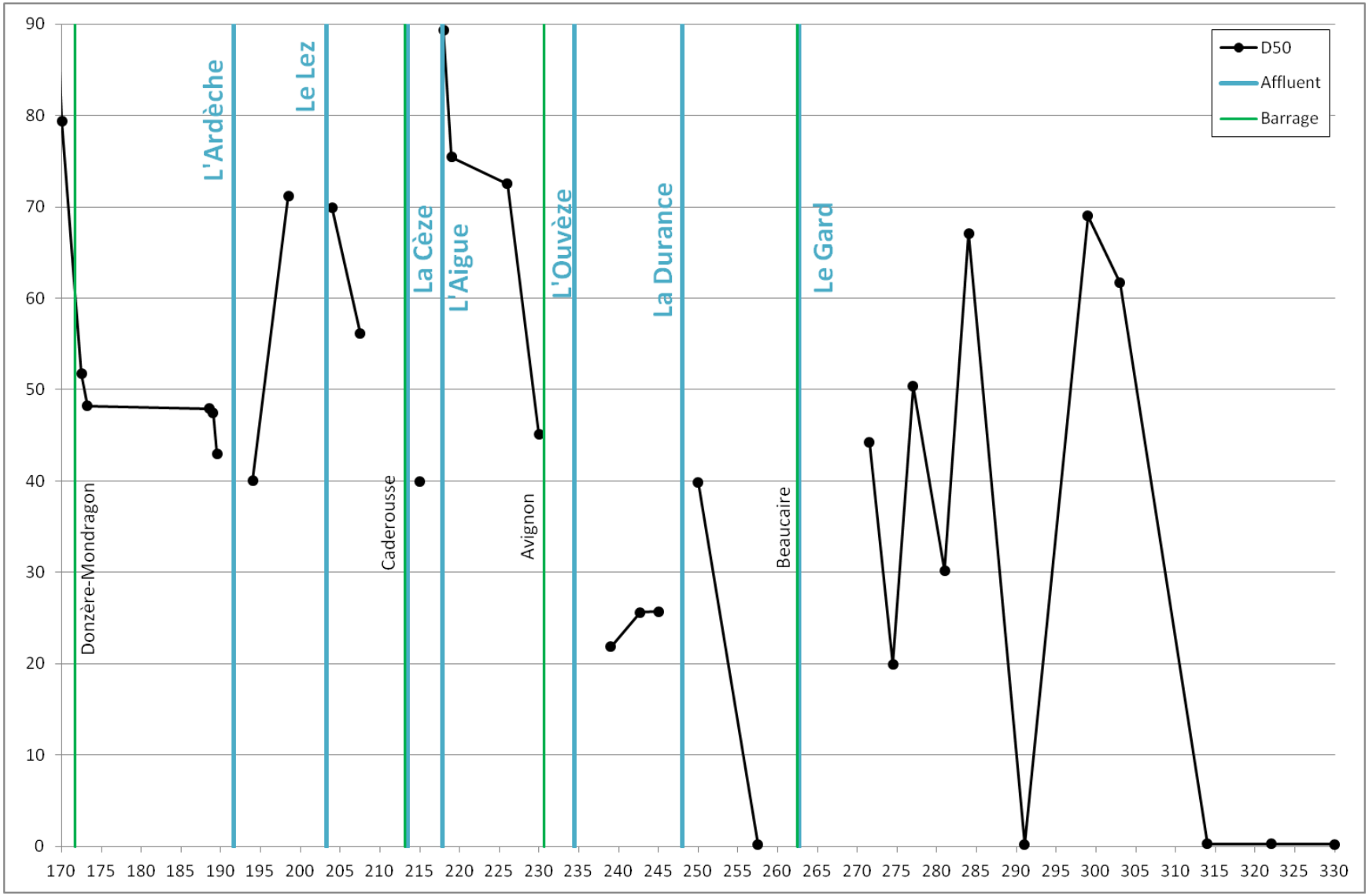


Figure 4-38 : Distribution granulométrique (D_{50}) autour des confluences de l'Ardèche, du Lez, de la Cèze, de l'Aigue, de l'Ouvèze, de la Durance et du Gard

Affluent	Dynamique sédimentaire observée principalement dans l'EGR (2000-V3D1A5)	Organisation granulométrique pertinente à l'aval des affluents
Arve	Transporterait des sables et des matières en suspension (MES) et serait déficitaire en gravier (capacité de transport < 10 000 m³/an)	Fines dans la retenue de Génissiat
Fier	-Apporte une part importante de MES : 4ème fournisseur de MES après la Durance, l'Isère et l'Arve et se positionne avant la Saône (Launey, 2014) -Ne charrie plus de graviers depuis le début du 20ème s.	Sables et limons dans la retenue de Chautagne et Belley
Guiers	Peu perturbé, transporte peu de sédiments, entre 10 000 et 20 000 m³/an par charriage et 100 000 t/an en suspension	Fines dans la retenue de Sault-Brénaz
Ain	Serait la dernière source de graviers du Haut-Rhône et rechargerait le tronçon entre l'Ain et Miribel	Diminution des D_{50} vers l'aval jusqu'au barrage de Jons
Saône	Alimenterait majoritairement le Rhône par des apports en suspension et de faibles quantités de sable par roulage	Fines dans la retenue de Pierre-Bénite : échantillons très hétérogènes (fines+grossiers) qui font ressortir une granulométrie grossière. Idem dans les retenues de Vaugris et Péage de Roussillon.
Doux	Peu d'apports en suspension et transit limité des graviers puisqu'il provient d'un bassin cristallin	Passages de galets à graviers à l'aval de la confluence
Isère	Ne recharge plus le Rhône en graviers. Le transit de 3 Mt/an de matières en suspension est réalisé en période de chasse par les retenues de Basse Isère, mais est interrompu en fonctionnement ordinaire	Faible quantité de sédiments fins 8 km plus à l'aval au niveau du barrage de Beauchastel, mais aussi dans les retenues de Baix le Logis Neuf et Montélimar.
Eyrieux	Présente un très faible charriage des galets et des apports en suspension de l'ordre de 40 000 t/an	Granulométrie grossière à l'aval direct (1 point) mais fines dans les retenues de Baix le Logis Neuf et Montélimar, à l'aval de la Drôme.
Drôme	Serait encore une des dernières sources de recharge sédimentaire, avec un charriage limité, disponible à moyen terme	Granulométrie grossière à l'aval et fines à l'amont du barrage de Baix-le Logis Neuf
Ardèche	Les apports se réduiraient à des graviers moins grossiers (D_{50}=36-66mm)	Diminution de la taille des grains 2,5 km à l'aval de la confluence puis augmentation au point suivant (2 points) et diminution à l'aval du Lez
Lez	Le Lez apporterait des graviers moyens au Rhône	Diminution du D_{50} jusqu'à l'amont du barrage de Caderousse (2 points)
Cèze	Transporterait des graviers, transit qui se réduirait naturellement par un exhaussement dans la plaine terminale du cours d'eau	Diminution du D_{50} à l'aval direct (1 point en amont de l'Aigue)
Aygues	Le transit résiduel de petits graviers serait limité mais les apports de limons resteraient importants.	Présence de galets et de fines dans des granulométries hétérogènes plutôt grossières dans la retenue d'Avignon
Ouvèze	Le transit des graviers est très limité, les apports de limons seraient conséquents	Fines et grossiers dans la retenue de Vallabrègues
Durance	N'apporte plus de graviers au Rhône mais la majorité des apports en suspension qui se font en Basse Durance (1,2 Mt/an en 2000) atteindrait le Rhône	Fines en amont du barrage de Vallabrègues (accumulation des apports de l'Ouvèze)
Gard	N'apporterait que la part la plus petite des graviers au Rhône	Graviers à galets à l'aval

Tableau 4-4 : Synthèse des apports des affluents (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5 ; Launey, 2014) et répartition granulométrique à l'aval des affluents interprétée à partir des Figure 4-35 à Figure 4-38

4.2.3. Une organisation par bief : l'élément anthropique dans la répartition granulométrique

La répartition granulométrique globale (Figure 4-39) peut s'expliquer par le découpage du Rhône aménagé en trois entités présentant des caractéristiques hydrauliques distinctes :

- le vieux Rhône, avec un D_{50} moyen de 51 mm, où circule un débit réservé ne permettant pas le transport sédimentaire en période hors crues,
- le Rhône total, avec un D_{50} moyen de 38 mm, où le débit qui circule représente le régime naturel du Rhône
- la retenue, avec un D_{50} moyen de 34 mm, étant la partie du Rhône total où l'hydraulicité diminue du fait de la présence d'un barrage aval, constituant une zone favorable au dépôt, notamment de fines.

Les barrages peuvent donc entrainer une modification de la composition de la charge de fond, comme à l'amont des barrages de Génissiat, Seyssel, Chautagne, Belley (Figure 4-25), Sault-Brénaz, Pierre-Bénite (fines à l'amont de la retenue puis graviers jusqu'au barrage) (Figure 4-26), Saint Vallier (fines 5 km à l'amont du barrage puis graviers grossiers jusqu'à l'ouvrage), Beauchastel (Figure 4-27), Baix-le Logis Neuf, Montélimar (Figure 4-28) et Beaucaire (Figure 4-29), où les sédiments sont des sables et des limons qui se stockent dans la retenue, zone de moindre hydraulicité. Dans les retenues de Génissiat, Belley, Sault Brénaz et Jons, on observe même une augmentation progressive de la taille des grains vers l'amont de la retenue, symbolisant un gradient hydraulique local (Figure 4-30 et Figure 4-32). Pierre-Bénite et Saint-Vallier constituent des retenues particulières du fait qu'elles ne présentent un stockage des fines à l'amont des barrages mais en un point localisé au milieu d'un lit grossier.

C'est dans la retenue qu'il est possible d'observer les gammes granulométriques les plus variables, et notamment, sur certains secteurs, un affinement vers l'aval. Les Figure 4-30 et Figure 4-32 permettent de détailler cette distribution des sédiments, respectivement grossiers et fins.

- Dans les retenues du **Haut Rhône**, la présence de sédiments fins est plus fréquente que dans les autres secteurs (5 sur 7 retenues). Il s'agit également du secteur présentant un affinement granulométrique dans la majorité des retenues (4 sur 7). Deux des retenues sont exclusivement caractérisées par des fonds à granulométrie grossière) :

    - De l'amont de la retenue de **Génissiat** vers le barrage, les sédiments passent des graviers grossiers (D_{50}=38 mm) aux sables (0,7 à 0,09 mm) puis aux limons (0,02 mm) pour la partie la plus proche de l'ouvrage.
    - Dans la retenue de **Seyssel**, l'amont direct du barrage est constitué de sables (0,2 mm).
    - L'amont du barrage de **Chautagne** présente des sables (0,2 mm) et des argiles (<0,05 mm).
    - La retenue de **Belley** montre une diminution de la taille des grains vers l'aval, on passe des graviers grossiers (46 mm) en queue de retenue au sable (0,09 mm) à l'amont du barrage.
    - Les sédiments dans la retenue de **Brégnier-Cordon** sont des graviers grossiers à des galets (45-74 mm), sans logique d'affinement amont-aval.
    - La retenue de **Sault-Brénaz** montre quant à elle un affinement granulométrique vers le barrage mais plus fin, on passe progressivement des sables (0,35 mm) aux argiles (0,001 mm).

- Les sédiments de la retenue de **Jons** montrent un affinement granulométrique des sédiments grossiers, passant des galets (78 mm) à des graviers (13 mm)

- Les retenues du **<u>Rhône moyen</u>** présentent des sédiments moyens à grossiers, et aucune décroissance granulométrique ; un seul site enregistre le dépôt de fines :

  - Les sédiments dans la retenue de **Pierre-Bénite** sont globalement grossiers (22 à 35 mm), sauf en amont de la retenue, au niveau de la confluence avec la Saône, où l'on retrouve des sables très fins (0,07 mm) et des granulométries hétérogènes (fines + grossiers).
  - A **Vaugris** et **Péage de Roussillon**, les retenues sont composées respectivement de galets et graviers grossiers (30-74 mm), et de graviers moyens à grossiers (11-65 mm).

- Dans les retenues du **<u>Bas Rhône</u>**, on retrouve majoritairement des sédiments plus grossiers que dans les autres secteurs, quelques fines stockées en amont des barrages (5 sur 9 barrages) et aucun affinement granulométrique :

  - Dans la retenue de **Saint Vallier**, on retrouve des sables (0,5 mm) à plus de 5 km en amont du barrage, des graviers grossiers (49 mm) en amont direct du barrage et des graviers grossiers et des galets (48 à 90 mm) dans le reste de la retenue sans observer d'affinement.
  - A **Bourg-lès-Valence**, la retenue est constituée de graviers moyens (11 mm) à très grossiers (97 mm) sans logique de diminution de la taille du diamètre.
  - L'amont direct du barrage de **Beauchastel** est marqué par la présence de limons (0,04 mm) puis de graviers grossiers (26 mm) à des galets (106 mm).
  - A **Baix-le Logis Neuf,** on passe des galets (100 mm) en amont de la retenue directement à des sables (0,14-0,4 mm) au niveau du barrage et 2,5 km en aval de la confluence avec la Drôme, sans décroissance progressive.
  - De la même façon pour la retenue de **Montélimar**, où l'amont du barrage présente des sables (0,16 mm) puis des galets (119 mm) 4 km à l'amont.
  - Les prélèvements de la retenue de **Donzère-Mondragon** ne montrent que des sédiments grossiers (80-104 mm) sans affinement granulométrique, idem pour ceux de la retenue de **Caderousse** (56-71 mm)
  - Les prélèvements dans la retenue d'**Avignon** présentent une très forte hétérogénéité, avec un mélange de graviers moyens à grossiers (45-75 mm).
  - Dans la retenue de **Beaucaire**, 5 km en amont du barrage et 10 km en aval de la Durance, on retrouve des sables (0,2 mm) et des graviers grossiers dans le reste amont de la retenue (22-40 mm).

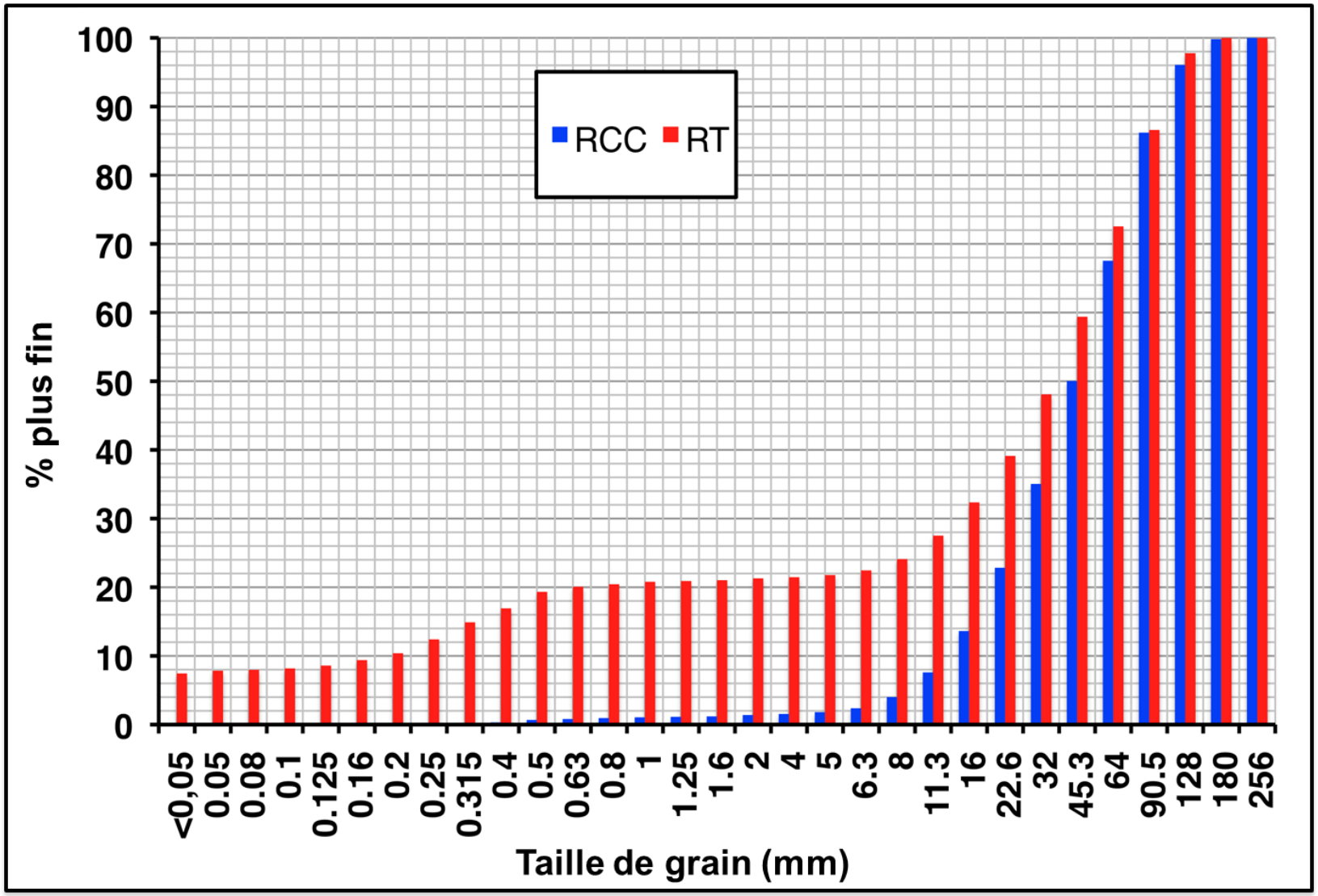


Figure 4-39 : Distribution granulométrique des prélèvements réalisés dans le Rhône total (RT) et le vieux Rhône (RCC) – mission 2012-13

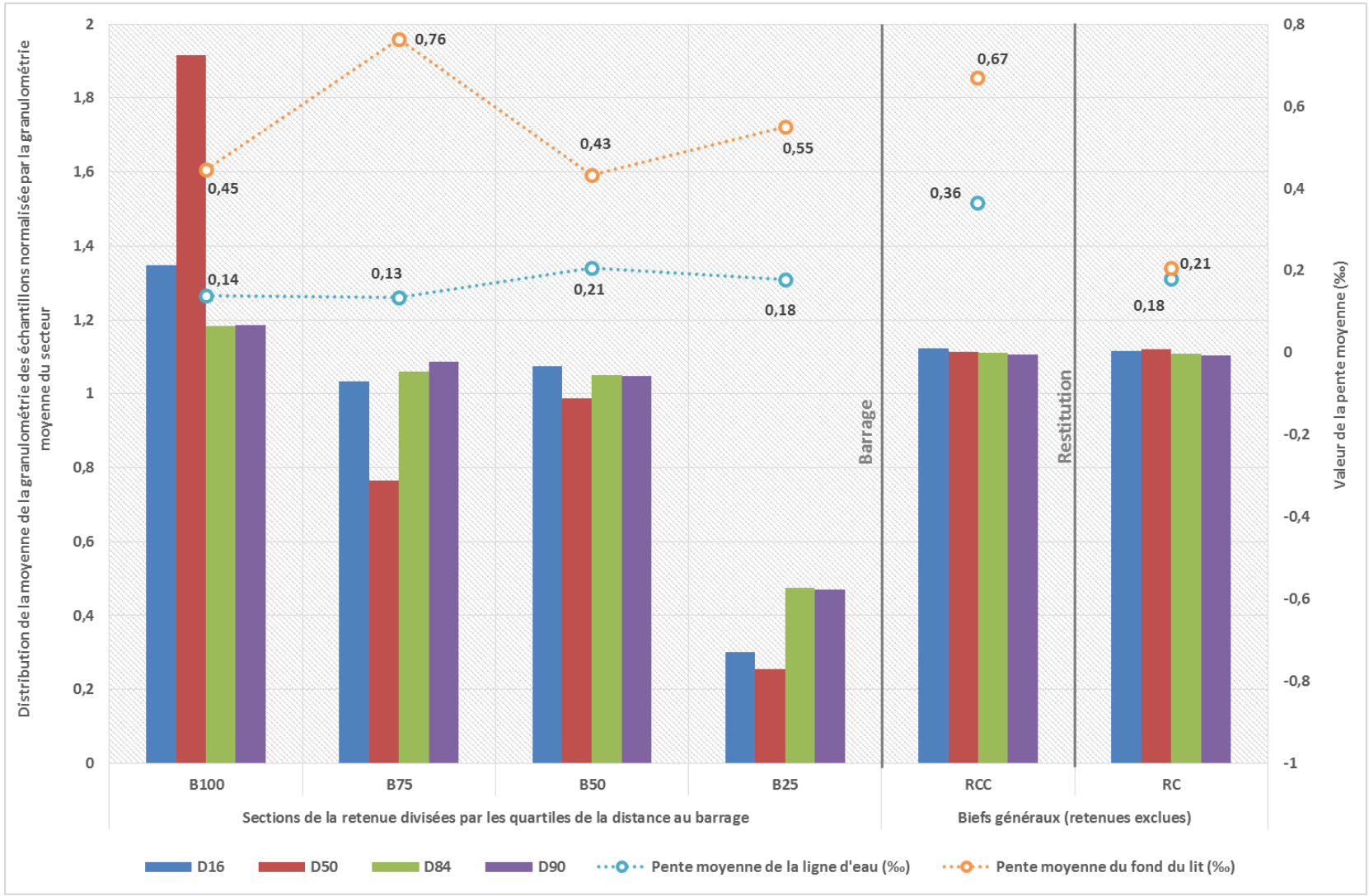


Figure 4-40 : Distribution de la moyenne des D_{16}, D_{50}, D_{84} et D_{90} des échantillons normalisés par leur moyenne sur chaque secteur depuis le barrage jusqu'à l'extrémité amont de la retenue (distances observées à respectivement 25%, 50%, 75% et 100% de la longueur de la retenue selon le Tableau 4-5), dans les vieux Rhône (RCC) et les Rhône totaux (RC). Courbes de l'évolution de la pente de la ligne d'eau moyenne actuelle et de la pente du fond du lit actuel par section.

Barrage	Longueur retenue
Génissiat	23,10
Seyssel	10,03
Chautagne	5,58
Belley	5,05
Brégnier-Cordon	11,72
Sault-Brénaz	28,55
Jons	7,33
Pierre-Bénite	4,76
Vaugris	18,84
Péage de Roussillon	16,08
Sait Vallier	19,52
Bourg-lès Valence	12,85
Beauchastel	14,63
Baix-le Logis Neuf	8,56
Montélimar	9,01
Donzère-Mondragon	3,70
Caderousse	11,60
Avignon	14,10
Beaucaire	30,50
Moyenne	**13,45**

Tableau 4-5 : Longueur de la retenue de chaque ouvrage en km

Les vieux Rhône possèdent donc les sédiments les plus grossiers, suivis des Rhône totaux puis des retenues. La Figure 4-40 représente la moyenne des quartiles granulométriques (D_{16} à D_{90}) normalisés par leur moyenne (par secteur) pour chaque catégorie de biefs. Une analyse longitudinale des retenues a été réalisée selon les quartiles de la distance au barrage, les longueurs propres étant présentées dans le Tableau 4-5. La granulométrie des vieux Rhône et Rhône totaux est relativement plus grossière que dans les retenues, entre B25 et B75. La queue des retenues (B100), présente la granulométrie la plus grossière, du fait qu'elle constitue la limite, souvent transgressée, entre la zone de remous favorable au dépôt de fines et le Rhône total ou le vieux Rhône. Tandis que l'amont direct du barrage (B25) présente la granulométrie la plus fine, résultant de la sédimentation dans ces zones de faible hydraulicité, où la pente de la ligne d'eau est faible (0,18 ‰), mais la pente du fond est forte (0,55 ‰). La pente moyenne de la ligne d'eau reste globalement faible dans la retenue.

Ces conditions hydrauliques locales peuvent être à l'origine de la formation de zones d'accumulation sédimentaire induites par le barrage. La pente actuelle de la ligne d'eau est assez différente de celle du fond du lit actuel puisqu'elles ne sont pas influencées par les mêmes phénomènes. La première dépend clairement de la position des barrages alors que la seconde semble faiblement influencée par les aménagements récents.

La variabilité granulométrique observée est particulièrement complexe et son interprétation doit tenir compte des conditions hydrauliques locales et notamment de l'évolution de la pente.

4.2.4. Influence de la pente sur la répartition des sédiments

En théorie, plus la pente est importante et plus la capacité de transport augmente et favorise ainsi le transit de sédiments grossiers. A l'inverse, lorsque la pente diminue et se rapproche de zéro, les conditions de transport sont limitées aux sédiments fins, voire inexistantes, favorisant alors des conditions de dépôt. Nous cherchons à déterminer si la pente joue un rôle dans la répartition granulométrique. Il est nécessaire de distinguer au préalable les différents types de pentes disponibles :

- la pente calculée à partir de la ligne d'eau actuelle correspondant au module à ± 30 % : établie pour chaque tronçon homogène découpé selon les ruptures de pente définies par l'étude statistique du chapitre 3,
- la pente du fond du lit actuel tirée du profil en long récent : calculée par tronçon homogène,
- la pente de la ligne d'eau à l'étiage de 1867-68 pour le Haut-Rhône et de 1902-03 pour le Bas-Rhône : pente kilométrique lissée par la moyenne mobile de période 2.

Les pentes issues du profil en long sont beaucoup plus variables que les pentes tirées des lignes d'eau car le fond du lit est plus rugueux que la ligne d'eau qui lisse les mésoformes du lit.

Chaque pente est susceptible d'influer spécifiquement sur le transport sédimentaire fin et grossier, notamment dans le contexte du Rhône où s'opposent les conditions passées (cours d'eau naturel et aménagement Girardon) et actuelles (segmentation dictée par les barrages). Les pentes à prendre en compte sont :

- la pente du fond du lit actuel qui s'est retrouvée « figée » par les aménagements Girardon, révélant ainsi l'état du fond avant la construction des barrages,
- la pente de la ligne d'eau historique, avant la construction des barrages, qui se rapproche le plus de la période où les conditions de transports des sédiments grossiers étaient favorables.

Le chenal actuel est régulé par la présence des barrages, et de ce fait, la pente de la ligne d'eau actuelle l'est aussi et diminue dans les retenues. La présence de ces ouvrages tend à diminuer la pente motrice, à réduire ainsi le charriage et à favoriser le stockage des fines dans les retenues.

La Figure 4-41 permet de rendre compte de la distribution amont-aval des D_{50} en fonction des différentes pentes. Globalement, les pentes ne diminuent pas vers l'aval mais présentent au contraire une grande variabilité tout au long du linéaire, que l'on considère ou non la présence des barrages. Il n'y a pas de répartition logique de la taille des particules vers l'aval en lien avec la pente en générale, mais plutôt une organisation très fragmentée de la granulométrie. On peut néanmoins observer quelques tendances :

- Les échantillons du **Haut Rhône** ont été majoritairement prélevés aux endroits où la pente historique de la ligne d'eau était très forte. Les pentes actuelles du lit et de la ligne d'eau sont aussi importantes dans les sections encore graveleuses, comme à l'amont de la retenue de Génissiat, ou dans les Rhône totaux de Seyssel, Belley et Brégnier-Cordon. L'amont du barrage de Génissiat, pouvant potentiellement stocker les fines provenant de l'Arve, montre une pente de la ligne d'eau actuelle très faible. Lorsqu'on regarde plus précisément, l'amont direct des barrages montre une pente de la ligne d'eau actuelle très faible qui ne coïncide pas forcément avec un stockage des fines, comme à Belley, où la granulométrie est très grossière et la pente historique et celle du fond actuel importantes. La section à l'aval de la confluence de l'Ain a des pentes fortes, ce qui pourrait favoriser le transport des graviers.

- Dans le **Rhône Moyen**, les granulométries des échantillons entre Lyon et Donzère-Mondragon semblent obéir aux conditions de pente du fond du lit actuel. Quand la pente est forte, les échantillons sont grossiers (décrit aussi par la pente de la ligne d'eau historique) et quand la pente est faible, les échantillons sont fins (décrit par la pente des retenues de la ligne d'eau actuelle).
- Les secteurs du **Bas Rhône** sont marqués par des alternances de pentes locales fortes et faibles de Donzère-Mondragon au Palier d'Arles (visibles sur les trois pentes). La granulométrie est grossière sur l'ensemble des secteurs qui présentent une pente de la ligne d'eau historique globalement forte. La taille des sédiments grossiers semble décroître vers l'aval jusqu'au barrage de Beaucaire, tendance parallèlement décrite par la pente de la ligne d'eau de 1900 qui diminue jusqu'au Palier d'Arles. On note trois exceptions sur cette portion où l'on retrouve des fines. La première se situe à l'amont du barrage de Beaucaire où les sédiments sont des fines localisées dans la retenue présentant une pente de la ligne d'eau actuelle nulle, voire négative (tendance décrivant une zone de stockage). Le Grand Rhône montre des pentes de ligne d'eau (actuelle et historique) très faibles juste à l'amont du seuil de Terrin (PK 292 où le profil s'exhausse) qui peuvent expliquer le dépôt des fines. Au niveau du seuil (PK 292 à 295.5), la pente du fond du lit actuel est négative puis redevient positive à l'aval du seuil où l'on observe des sédiments grossiers. Les pentes de la ligne d'eau (actuelle et historique) sont nulles jusqu'à la mer, et les sédiments observés plus à l'aval du seuil sont des sables.

En définitif, tous les prélèvements de fines qui ont été effectués se situaient dans les retenues, zones où la pente de la ligne d'eau actuelle est faible (Figure 4-41). La pente du fond du lit actuel et la pente de la ligne d'eau de 1900 suivent globalement la même loi (Figure 4-42), ce qui appuie l'hypothèse que le fond a été figé suite aux aménagements Girardon et que le transport solide grossier est faible. Lorsqu'on exclut les secteurs où se déposent les fines (Figure 4-43), on constate que les sédiments les plus grossiers suivent quasiment la même tendance que celle observée sur les pentes du profil en long actuel et du profil de la ligne de 1900 (Figure 4-42). La pente historique aurait donc été responsable du charriage de ces sédiments, encore présents, avant les aménagements CNR. Une relation existe bien entre la taille des échantillons (D_{50}) et la pente mais elle rend compte d'une situation avant barrage. La pente de la ligne d'eau actuelle régie par les barrages a, quant à elle, contribué à favoriser le stockage des fines dans les retenues. La ligne d'eau actuelle n'a donc modifié la composition du fond qu'en instaurant un processus de dépôt très localisé de sédiments sablo-argileux à l'amont des barrages, et remobilisé lors des crues.

La caractérisation hydraulique du chenal en crue est maintenant nécessaire pour évaluer la capacité de transport de la charge de fond et déterminer à quelle fréquence les sédiments observés sont mis en mouvement.

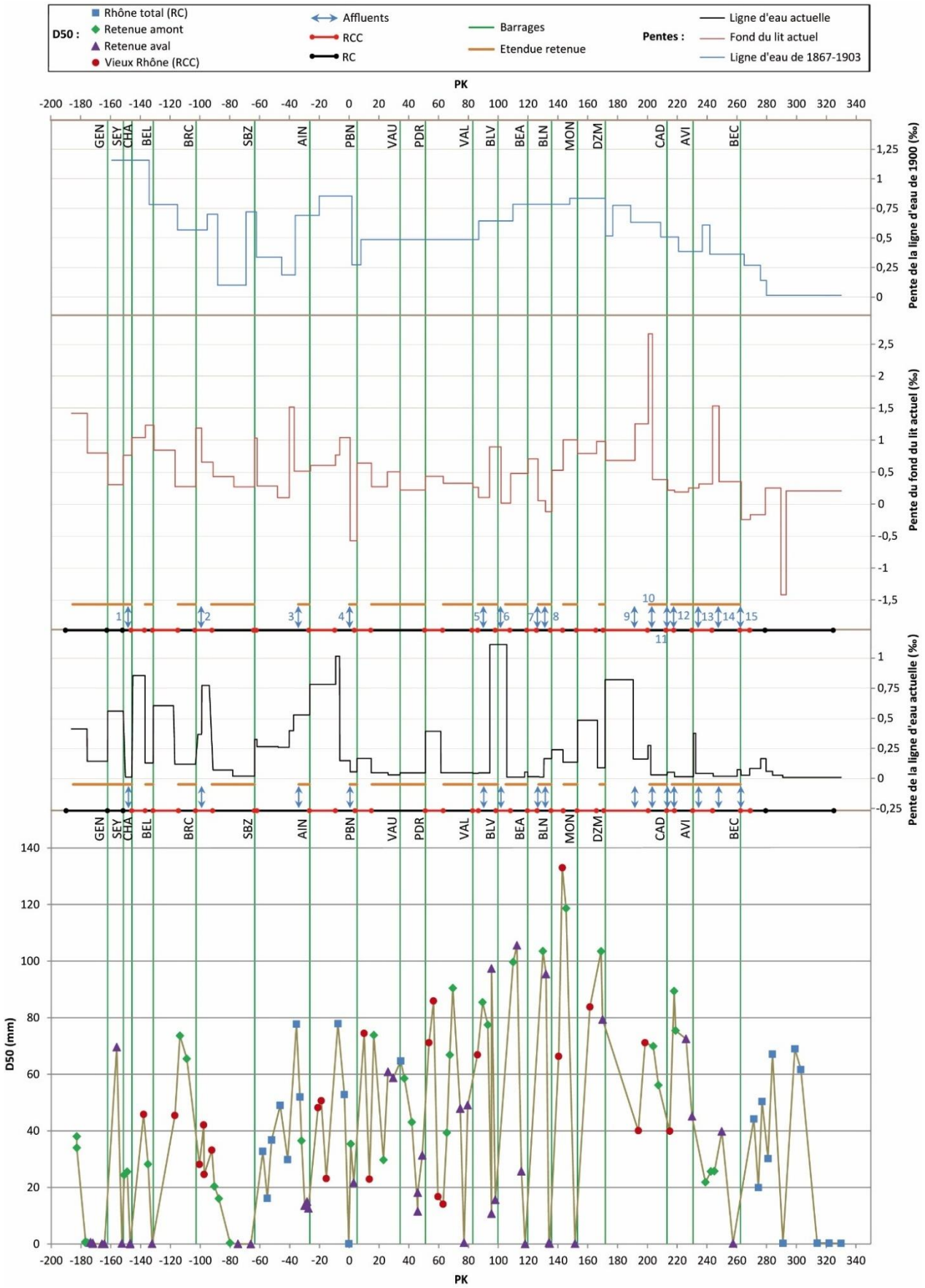


Figure 4-41 : Evolution longitudinale du D_{50} en fonction des pentes du fond du lit actuel, de la ligne d'eau actuelle et de celle de 1867-1903. [Affluents : 1-Fier, 2-Guiers, 3-Ain, 4-Saône, 5-Doux, 6-Isère, 7-Eyrieux, 8-Drôme, 9-Ardèche, 10-Lez, 11-Cèze, 12-Aigue, 13-Ouvèze, 14-Durance, 15-Gard]

Figure 4-42 : Pentes de la ligne d'eau actuelle, du fond du lit actuel et de la ligne d'eau de 1867-1903 et leurs lois polynomiales d'ordre 3 respectives

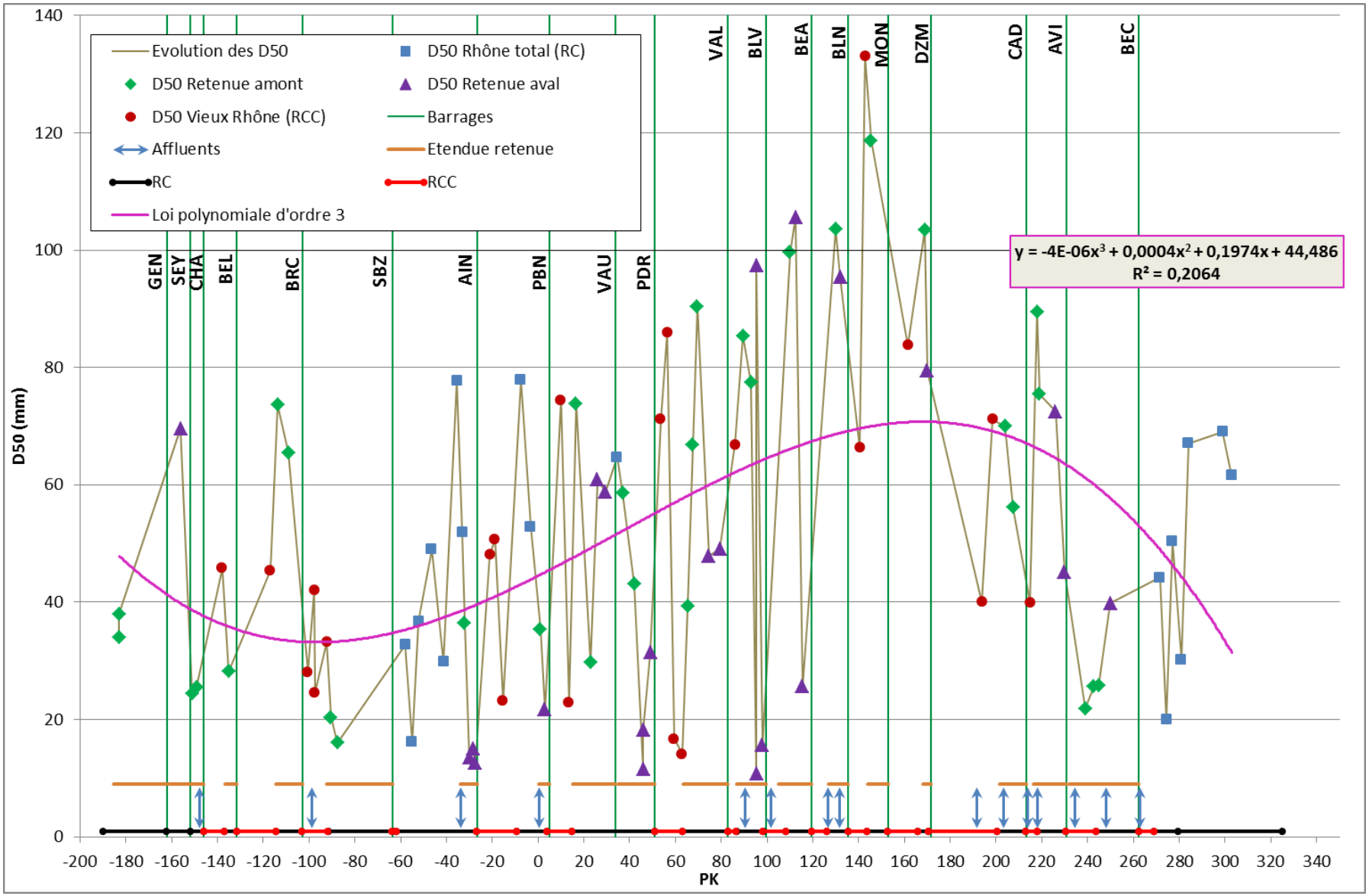


Figure 4-43 : Evolution longitudinale des D_{50} graveleux (fines exclues) et ajustement d'une loi polynomiale d'ordre 3

5. Etat des lieux de la granulométrie du chenal actuel

Les différentes campagnes de terrain réalisées ont permis d'obtenir un échantillonnage granulométrique systématique sur tout le linéaire du Rhône avec des méthodes adaptées aux conditions de prélèvement. Les résultats soulignent un patron granulométrique complexe. Aucun affinement granulométrique amont-aval n'est observé. Cette absence d'affinement s'explique par des phénomènes naturels ou d'origine anthropique parfois très localisés tels que l'organisation longitudinale de la pente de la vallée, qui est régie par les héritages sédimentaires et la tectonique, le processus de pavage sans doute engagé à la suite de la construction des casiers Girardon sur certaines sections, la présence de sections encore potentiellement actives et en voie d'ajustement, la recharge sédimentaire ponctuelle de certains affluents et la présence des barrages qui imposent des discontinuités hydrauliques.

La distribution granulométrique montre globalement une répartition plus grossière dans les vieux Rhône que dans les Rhône totaux et les retenues. On observe une forte variabilité entre les vieux Rhône avec des secteurs en amont de Lyon qui ne semblent pas pavés, tandis que certains secteurs en aval présentent de forts taux de pavage, notamment à Pierre-Bénite et à Donzère-Mondragon. Les campagnes de terrain dans les vieux Rhône ont montré que le chenal présente une granulométrie plus grossière que les bancs et une surface plus grossière que la subsurface (tendance plus importante dans le Rhône médian).

Ces travaux ont ainsi permis de distinguer les zones pavées des zones non pavées, voire en cours de pavage. La granulométrie la plus grossière est observée dans la partie Sud du Rhône, avec un maximum dans le secteur de Baix-le Logis Neuf - Montélimar.

Les dernières campagnes de terrain ont mis en évidence les secteurs à granulométrie grossière, présentant généralement une forte pente du fond du lit actuel ou de la ligne d'eau historique, et des zones de granulométrie fine, où la pente actuelle de la ligne d'eau est faible.

Par ailleurs, ces observations appuient la régionalisation en trois secteurs identifiés dans le chapitre 3 sur l'étude des mésoformes, avec un Rhône amont semblant montrer un transport solide modéré, le secteur de l'Ain à Miribel présentant un transport solide visiblement toujours actif et un Rhône aval pavé dans les vieux Rhône et soumis à un transport de sédiments sablo-limoneux partiellement piégés dans les retenues. La dynamique sédimentaire persisterait donc principalement dans les secteurs amont mais serait plus locale dans les secteurs aval.

Le patron granulométrique du chenal du Rhône répond ainsi à une histoire complexe résultant du contexte géologique, des sources sédimentaires encore actives et de différentes perturbations anthropiques le long du continuum.

La fragmentation longitudinale de la granulométrie, ainsi que la configuration géographique particulière et variable dans laquelle est contraint le Rhône, en termes de sources sédimentaires et de géologie locale, complexifient les phénomènes en cause et la localisation des zones potentiellement mobilisables. Afin de déterminer précisément les conditions de transport sédimentaire et de confirmer plus finement le caractère stable ou dynamique des différents biefs, il est maintenant nécessaire de confronter ces résultats à une modélisation hydraulique pour caractériser les forces tractrices par bief et les fréquences de mise en mouvement des sédiments du fond.

5e Chapitre : *Caractérisation de la dynamique sédimentaire actuelle*

L'objectif de ce chapitre de synthèse est de confronter les observations morphologiques et granulométriques avec des analyses hydrauliques afin d'interpréter les patrons géographiques et temporels. Il s'agit ainsi de vérifier si les modifications morphologiques actuelles sont, par exemple, liées au transfert d'une charge fine sur une géométrie pavée et stockée dans les retenues, ou s'il existe des secteurs caractérisés par une charge de fond plus grossière résultant d'apports d'affluents locaux. L'analyse du transport solide sera réalisée sur deux zones d'étude particulières : entre la confluence de la Saône et le barrage de Vaugris (PK 0-34) d'une part et entre le Rhône total de Montélimar et le barrage de Caderousse (PK 143-213) d'autre part. Ces secteurs étendus seront respectivement nommés secteurs de Pierre-Bénite et de Donzère-Mondragon dans la suite de ce travail pour plus de facilité. Nous avons retenu ces vieux Rhône car ils constituent des secteurs particuliers où la granulométrie est grossière, le pavage est fort mais où un profil en long est mobile verticalement au cours du temps (paragraphe 1.3, p.249). De plus, des actions de restauration ont été entreprises ou sont en cours de réalisation sur ces secteurs.

1. Synthèse des connaissances en matière de transport solide

1.1. Eléments bibliographiques

Avant de mener une étude sur la capacité de transport solide d'un cours d'eau aussi aménagé, il est essentiel de comprendre l'état du système d'origine, si possible avant tout aménagement. Les travaux de Bravard (2010) et de l'Etude Globale Rhône (EGR, SOGREAH, 2000) apportent un certain nombre d'éléments.

Régime hydrologique naturel du Rhône

En matière de dynamique naturelle, le Rhône était caractérisé, sur la majeure partie du chenal, par un lit en tresses très mobile (Bravard, 2010). Son régime hydrologique au niveau de son embouchure se caractérise par des débits importants tout au long de l'année grâce à la diversité des conditions climatiques. La particularité de ces débits tient en leur puissance et leur régularité qui permettent une fréquence de charriage de plus de 100 jours par an en général (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2), favorisant l'évolution des bras vifs (Figure 5-1). En effet, le débit de la crue décennale à Beaucaire, à 8400 m^3/s, est à peine 5 fois supérieure au débit au module, soit 1700 m^3/s. La Figure 5-1, issue de l'EGR, permet de comparer le module de chaque secteur aux débits dépassés 10 jours par an, ainsi qu'au débit de début d'entraînement et au débit de la crue décennale (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2). L'étude indique ainsi que les débits d'entraînement (calculés à partir des paramètres granulométriques et des pentes répertoriées dans l'Annexe 28) sont globalement faibles dans le Haut Rhône et élevés à l'aval de Lyon :

- 500 m^3/s de Génissiat à Brégnier-Cordon, alors que le module est compris entre 336 et 416 m^3/s et la crue biennale entre 990 et 1400 m^3/s. Cette faible valeur du débit d'entraînement est due à de forte pente comprise entre 1,5 et 0,62 ‰, correspondant aux gorges du Haut-Rhône, où alternent ombilics et verrous (chapitre 2) ;
- 1300 m^3/s à Sault-Brénaz, où le module est de 459 m^3/s et la crue biennale de 1500 m^3/s. Cette forte valeur du débit est due à une chute de la pente à 0,22 ‰ en moyenne liée au remblaiement des ombilics glaciaires (chapitre 2), provoquant alors une quasi interruption naturelle du transit sédimentaire ;

- 750 m^3/s à Miribel-Jonage, où le module est de 600 m^3/s et la crue biennale de 2100 m^3/s. Cette diminution du débit d'entraînement résulte d'une augmentation de la pente à 0,8 ‰, et des terrains composés de calcaires et de marnes sableuses (dépôts fluvio-glaciaires) (chapitre 2) ;
- 1500-2000 m^3/s entre Pierre-Bénite et Vallabrègues, débits d'entraînement globalement constants sur cette section, où le module est compris entre 1030 et 1500 m^3/s et la crue biennale entre 3100 et 4300 m^3/s. Les fortes valeurs de débits seuils sont dues à la réduction de la pente à 0,45 ‰ jusqu'à Saint-Vallier, qui, du fait de l'orogénèse alpine, augmente à 0,82 ‰ jusqu'à Montélimar avec la granulométrie du fond (section la plus grossière du linéaire), où les affluents drainent des sédiments grossiers (chapitre 2). Seules exceptions : Caderousse et Avignon ont un débit plus faible (1400 m^3/s) du fait d'une diminution de la granulométrie (apport détritiques des affluents de rive gauche) ;
- 600 m^3/s au Palier d'Arles, où le module est de 1700 m^3/s et la crue biennale de 5800 : une valeur de débit d'entraînement faible malgré la forte réduction de pente, due principalement à la présence de sables facilement mobilisables.

Capacité naturelle de transport

Dans le Haut Rhône (de Génissiat à Brégnier-Cordon), à Miribel-Jonage et ainsi qu'à l'aval de Donzère-Mondragon (jusqu'au Palier d'Arles), le module est très proche du débit de début d'entraînement, expliquant pourquoi la fréquence de charriage est plus élevée dans ces secteurs (Figure 5-1, haut). A contrario, l'écart entre le module et le débit seuil est d'autant plus important dans les secteurs de Sault-Brénaz et entre Pierre-Bénite et Montélimar que la fréquence de charriage est faible. Néanmoins, la fréquence de charriage augmente lorsque les débits dépassés 10 j/an dépassent les débits seuils, notamment à l'aval de Lyon où ils permettent d'assurer le transport en étant deux à trois fois plus importants que le module (Figure 5-1, haut), de même que les crues décennales qui sont quatre à cinq fois plus fortes que le module (Figure 5-1, bas). A l'état naturel, les débits de début d'entraînement sont plus faibles que les débits dépassés 10 j/an, et la fréquence de charriage montre que le transit des graviers est très fréquent sur tous les secteurs pendant globalement plus de 50 j/an et en moyenne 100 j/an, à l'exception du secteur de Sault-Brénaz où la forte réduction de la pente diminue rapidement la capacité de transport.

Concernant les zones qui nous intéressent plus particulièrement, la fréquence de charriage est de l'ordre de 50 j/an dans le secteur de Pierre-Bénite et Vaugris, de 110 j/an à Montélimar, de 135 j/an à Donzère-Mondragon et de 183 j/an à Caderousse (Figure 5-1).

Globalement, les crues majeures jouent un rôle important dans la morphologie du chenal, mais l'écart entre le débit de la crue décennale (susceptible d'être dépassé 1 jour tous les 10 ans) et le débit dépassé 10 j/an est faible avec en moyenne un rapport de 2, et la fréquence des débits d'entraînement est dans un rapport de 100 (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2). Ce qui signifie qu'en volume cumulé, le débit dépassé 10 j/an est 50 fois plus efficace que la crue décennale. C'est en période de hautes eaux jusqu'à la crue annuelle que le transit des graviers est assuré à près de 98% (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A1). Il est évident qu'à partir d'un tel constat, une modification des débits, donc du régime des hautes eaux, aurait un impact significatif sur le transport solide. La transparence des barrages en période de crue, qui n'est observée que pour des crues majeures (cf. chapitre 2), ne permettrait pas de maintenir la dynamique sédimentaire dans la situation actuelle (avec le curage des confluences et l'absence de réinjections). Il est toutefois important de noter que la granulométrie retenue dans l'EGR peut être différente de celle mesurée dans la présente étude.

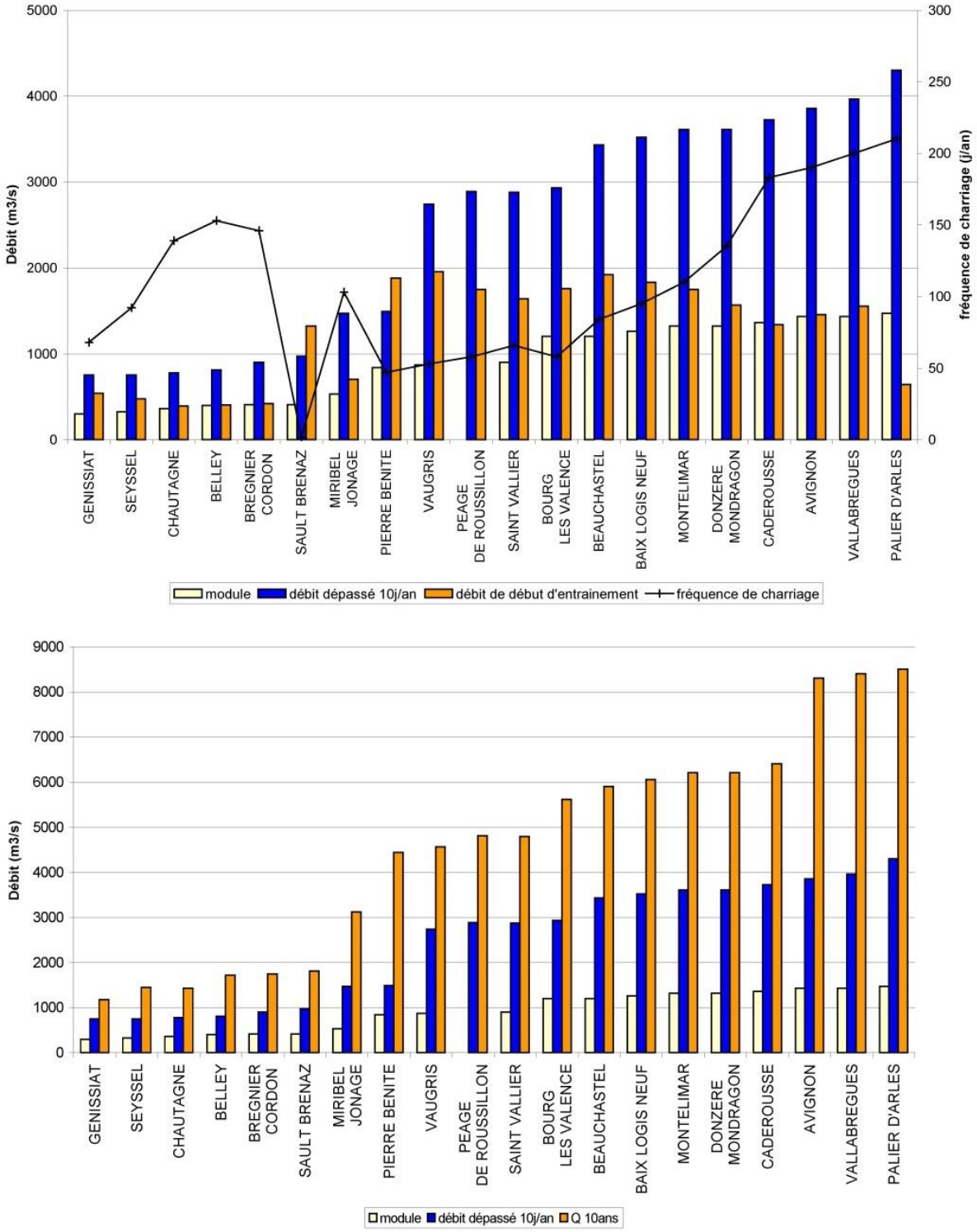


Figure 5-1 : Evolution des débits caractéristiques du Rhône. (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2)

Puissance brute et puissance spécifique

La puissance brute du linéaire du Rhône avant aménagement (début des endiguements) a été évaluée par Bravard (2010) à partir de la pente du fond de 1860 pour des débits de crue biennale (Figure 5-2). La puissance constitue une variable de contrôle importante qui s'impose au cours d'eau. Elle correspond au produit de la pente, du débit et de la masse volumique de l'eau. Dans son étude, Bravard (2010) a déduit que la puissance était constante entre Lyon et Tain, incluant donc Pierre-

Bénite et Vaugris, et que les apports de l'Ardèche n'augmentaient pas de manière significative la valeur de la puissance, précisant que la pente était une variable très influente. Puis, il en a déduit la puissance spécifique du Rhône (Figure 5-3), c'est-à-dire normalisée par la largeur du lit en débit de crue. De nombreuses études (notamment Brookes, 1988 ; Wasson et al., 1998) ont largement démontré que la capacité d'ajustement d'un cours d'eau est en grande partie fonction de sa puissance spécifique (Malavoi et Bravard 2010). Bravard (2010) met en évidence l'augmentation de la puissance spécifique à l'aval de la confluence de l'Ain jusqu'à un pic au niveau du PK 25, dans la retenue de Vaugris, ainsi qu'un pic au niveau de Saint-Vallier (Figure 5-3). La puissance spécifique diminue à Beauchastel, avec néanmoins des valeurs fortes à l'amont du barrage de Montélimar et à l'aval de Donzère. La puissance spécifique diminue fortement autour de la confluence de l'Ardèche, à l'exception d'un pic au niveau de l'Ardèche (Figure 5-3). L'augmentation des valeurs de fréquence de charriage à l'aval de Lyon (Figure 5-1, haut) s'explique donc par une puissance spécifique élevée, permettant d'avoir un module proche du débit de début d'entraînement et ce, malgré une granulométrie grossière.

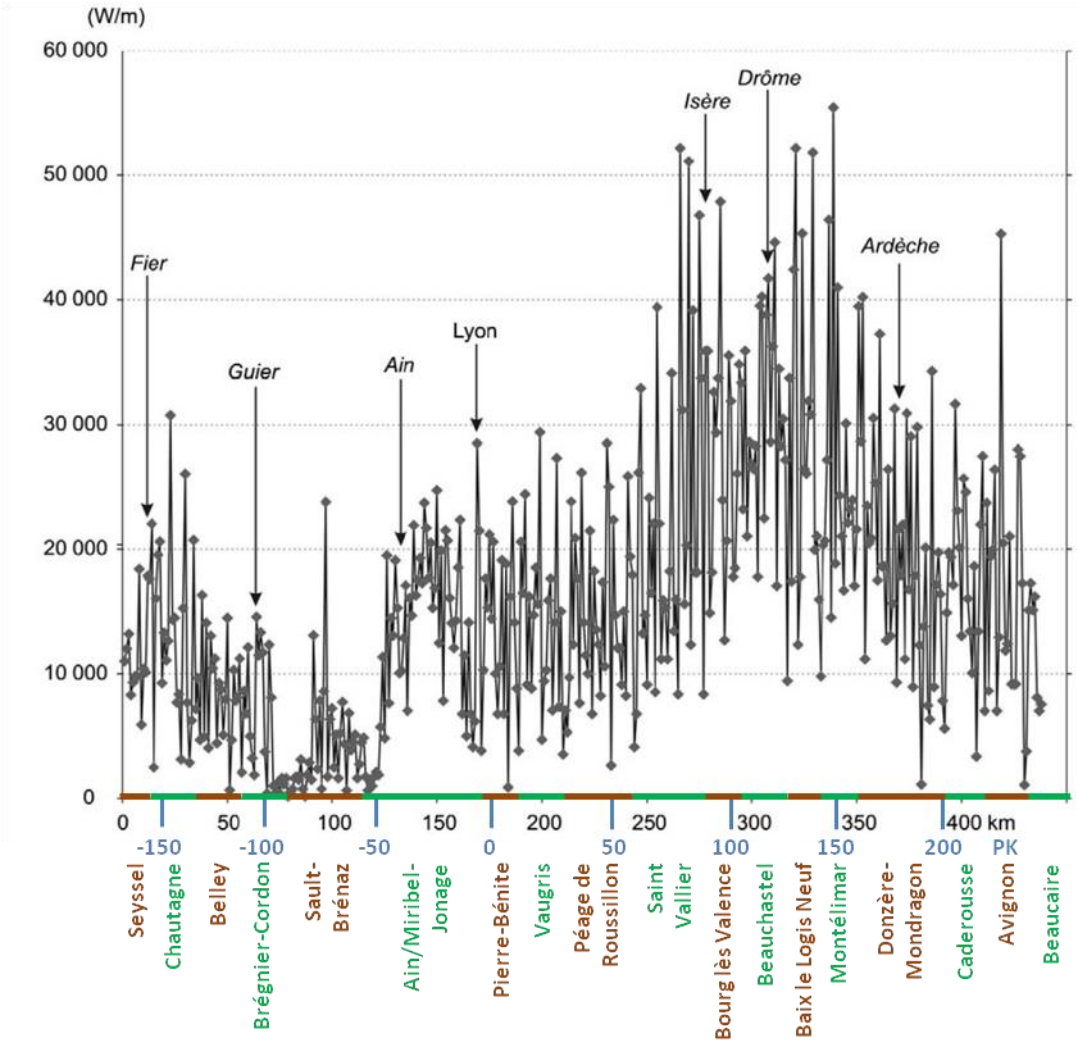


Figure 5-2 : Variations de la puissance brute du Rhône, calculée à partir de la pente de 1860. Les secteurs ont été ajoutés en marron et vert (modifié, d'après Bravard, 2010)

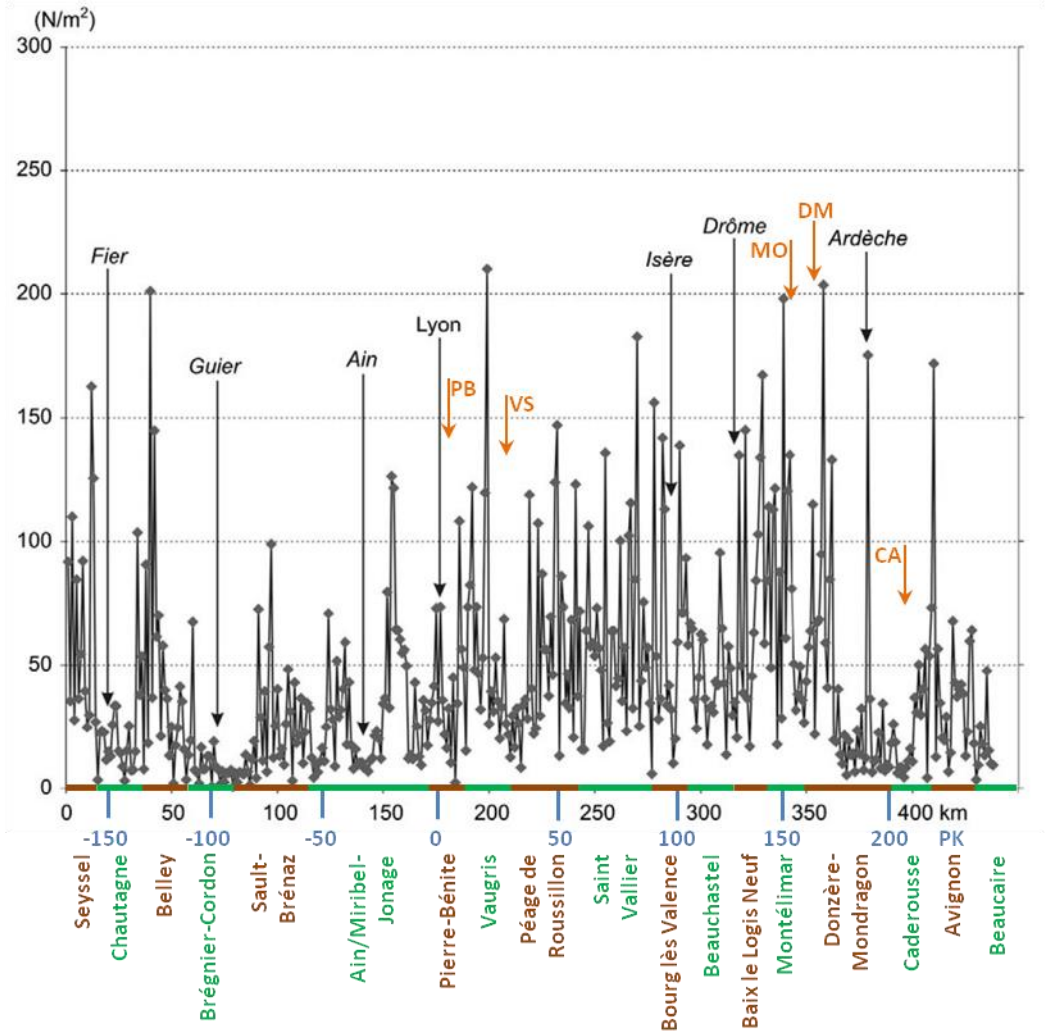


Figure 5-3 : Variations de la puissance spécifique du Rhône, calculée à partir de la pente de 1860. Les secteurs ont été ajoutés en marron et vert et les barrages en orange : PB=Pierre-Bénite, VS=Vaugris, MO=Montélimar, DM=Donzère-Mondragon et CA=Caderousse (modifié, d'après Bravard, 2010).

Quantification du débit solide

A partir de la formule de Lefort (1991), le même auteur a établi, pour l'Etude Globale Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A1), une nouvelle équation afin de déterminer le débit solide. Elle permet de déterminer la valeur du transport par charriage, selon une large gamme de pentes adaptée à celles du Rhône (de 0,2 à 1‰). Elle introduit aussi un terme correctif tenant compte de la largeur relative du lit par rapport au diamètre des sédiments dans le calcul du début d'entraînement :

$$\frac{Q_s}{Q} = 1{,}63\left(\frac{D_{90}}{D_{30}}\right)^{0{,}14} \times \left(\frac{i}{s-1}\right)^{1{,}5} \times \left[1-\left(\frac{Q_o}{Q}\right)^{1{,}2}\right] \times \left[1+1{,}1\log_{10}\left(\frac{Q}{Q_o}\right)\right]$$

$$Q_o = 0{,}433\sqrt{g.D_m^5} \times (s-1)^{1{,}9} \times i^{-1{,}7} \times (1-1{,}2i)^2 \times \left(\frac{D_{90}}{D_{30}}\right)^{0{,}2} \times \left(\frac{1}{1+55\frac{D_m}{B}}\right)$$

Avec Q_s le débit solide (en m^3/s), Q le débit liquide (en m^3/s), Q_o le débit de début d'entraînement (en m^3/s), i la pente (en m/m), s la densité des matériaux (sans unité, rapport entre la masse volumique du

matériau et celle de l'eau), D_{30} et D_{90} les diamètres dépassés par respectivement 30 et 90% des matériaux (en m), D_m le diamètre moyen des alluvions (en m), B la largeur du lit actif (en m).

L'inconvénient de ce terme correcteur est que plus la largeur du chenal est grande, et plus il tend vers 1, ce qui est le cas pour le Rhône. En effet, considérons un diamètre moyen de 40 mm (représentatif de la taille des sédiments dans le Rhône), le terme se rapproche de 1 à partir du moment où la largeur du chenal atteint 100 m, alors que la largeur moyenne du chenal est d'environ 200 m. Cette correction semble n'avoir aucune utilité dans les calculs de transport solide du fleuve. L'autre inconvénient de cette formule est qu'elle ne tient pas compte du phénomène de pavage (étendue granulométrique) ce qui implique une forte surestimation des débits de début d'entraînement.

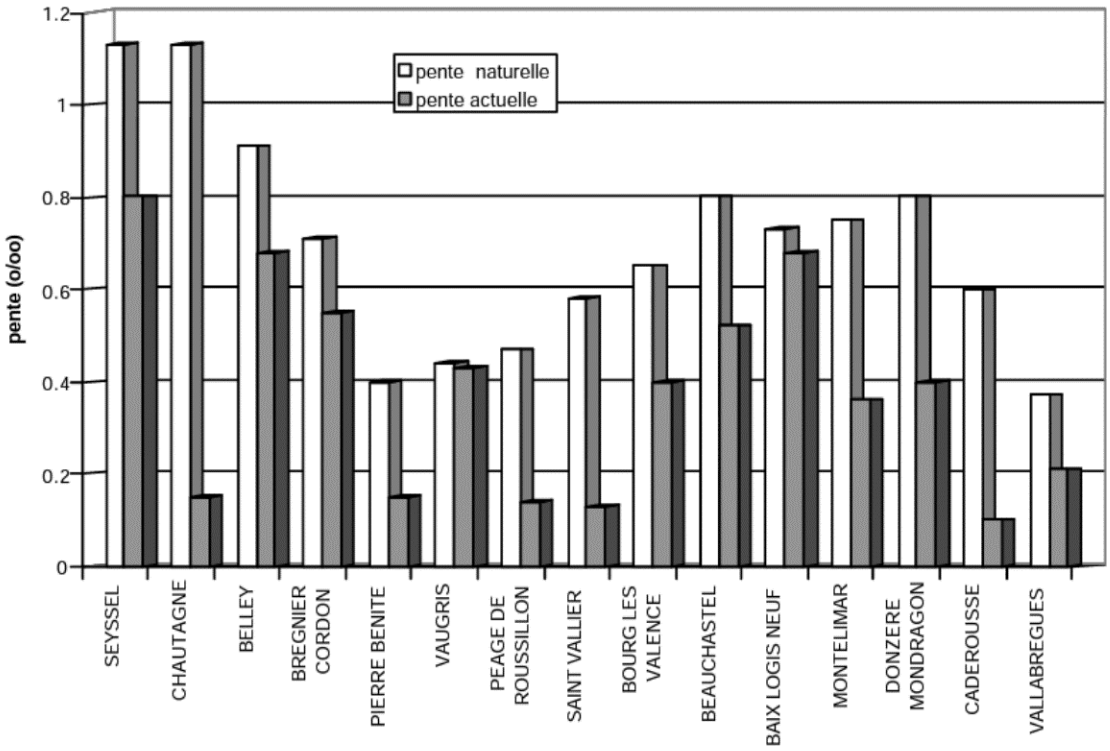


Figure 5-4 : Régime des pentes (‰) dans les retenues de Seyssel à Vallabrègues, Sault-Brénaz et Jons exclus (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4)

Conséquences des aménagements CNR sur le régime hydrologique et la capacité de transport

Suite à la construction des ouvrages hydroélectriques et à l'implantation des barrages visant à maintenir un niveau d'eau constant à l'amont, la pente de la ligne d'eau a, globalement et inégalement, diminué dans les retenues, zones de moindre hydrodynamisme, avec une réduction moyenne de 0,3 ‰, c'est-à-dire de près de moitié (Figure 5-4). Cette diminution est d'autant plus marquée que le débit est faible. Plus l'écart entre la pente naturelle et la pente actuelle est grand, et plus le débit doit être important pour retrouver la pente d'écoulement d'origine. Notons que l'écart le plus spectaculaire entre la pente naturelle et la pente actuelle est celui observé dans la retenue de Chautagne, avec une réduction de 87 % (on passe de 1,15 ‰ à 0,15 ‰), entraînant un charriage nul. En revanche, c'est à Vaugris et Baix-le Logis Neuf que les écarts sont les plus faibles, avec respectivement une diminution de 2 % et de 5 % de la pente après aménagement. Ce sont les deux seuls barrages qui peuvent assurer la transparence du débit du fait de la proximité avec la pente naturelle de la ligne d'eau. Pour les autres cas, les ouvrages ne deviennent transparents aux

écoulements que lorsqu'une crue majeure, généralement supérieure à une crue centennale, permet à la pente hydraulique d'approcher la pente naturelle avant aménagement et de rendre la perte de charge nulle. La réduction de la pente motrice dans les retenues diminue considérablement la capacité de transport par charriage. La diminution de 25 % de la pente conduirait à une réduction du transit de graviers par cinq de manière générale (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4). Si la pente naturelle est divisée par deux, alors le débit de début d'entraînement se voit multiplier par trois, correspondant alors à un débit de crue décennale. La diminution de la pente dans les retenues intervient pour les débits de hautes eaux qui contribuaient au transport solide avant les aménagements et reste sensible pour les fortes crues (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2). D'après l'EGR, les gravillons inférieurs à 10 mm seraient capables de franchir la plupart des retenues, mais le transit resterait malgré tout inférieur à 10 % du transit naturel (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4). Seules les retenues de Vaugris et de Baix-le Logis-Neuf, les plus transparentes, pourraient assurer un transit résiduel plus important (si l'on s'affranchit de l'action des fosses d'extraction).

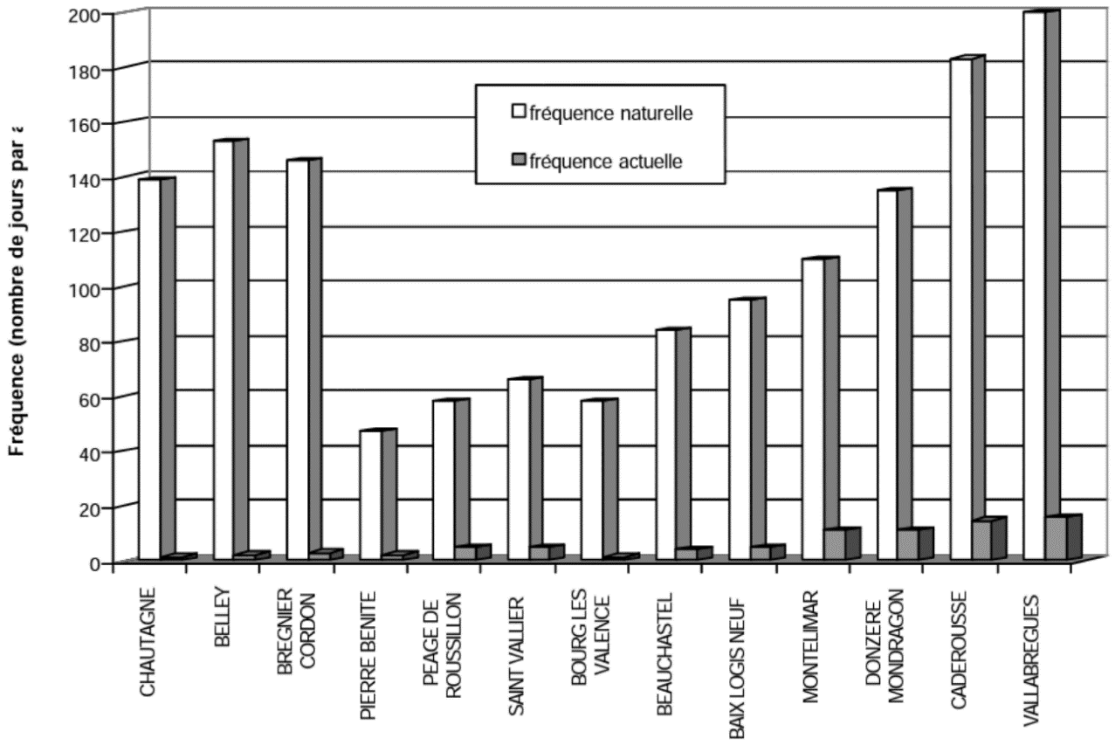


Figure 5-5 : Fréquence du transport des graviers (j/an) dans les vieux Rhône entre Chautagne et Vallabrègues, Sault-Brénaz et Jons exclus (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4)

Le régime des débits dans les vieux Rhône est perturbé par la réduction des débits morphogènes, occasionné par la dérivation du barrage amont vers le canal usinier. La diminution de la pente de la ligne d'eau, provoqué par la retenue du barrage aval, perturbe aussi les conditions d'écoulement dans la zone en aval des vieux Rhône, voire dans la totalité du vieux Rhône lorsque la retenue atteint le barrage amont. La fréquence de transport des graviers a considérablement chuté suite à l'implantation des barrages (Figure 5-5), de près de 95 % en moyenne (de 90 % à Montélimar à 99 % à Chautagne). Avant aménagement, le transit était assuré 113 jours par an en moyenne sur l'ensemble des vieux Rhône. Cette moyenne a chuté à une fréquence de 6 jours par an en moyenne, soit une diminution de 107 j/an. Pour cette gamme de fréquence annuelle, les débits actuels des vieux Rhône sont morphologiquement inefficaces (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4). L'EGR indique qu'un pavage de surface, causé par la diminution des apports solides de l'amont (stockés notamment dans les retenues),

se formerait dans le fond du chenal, augmentant alors le seuil de mise en mouvement, ce qui diminuerait la capacité de transport du Rhône et le volume annuel charrié (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2).

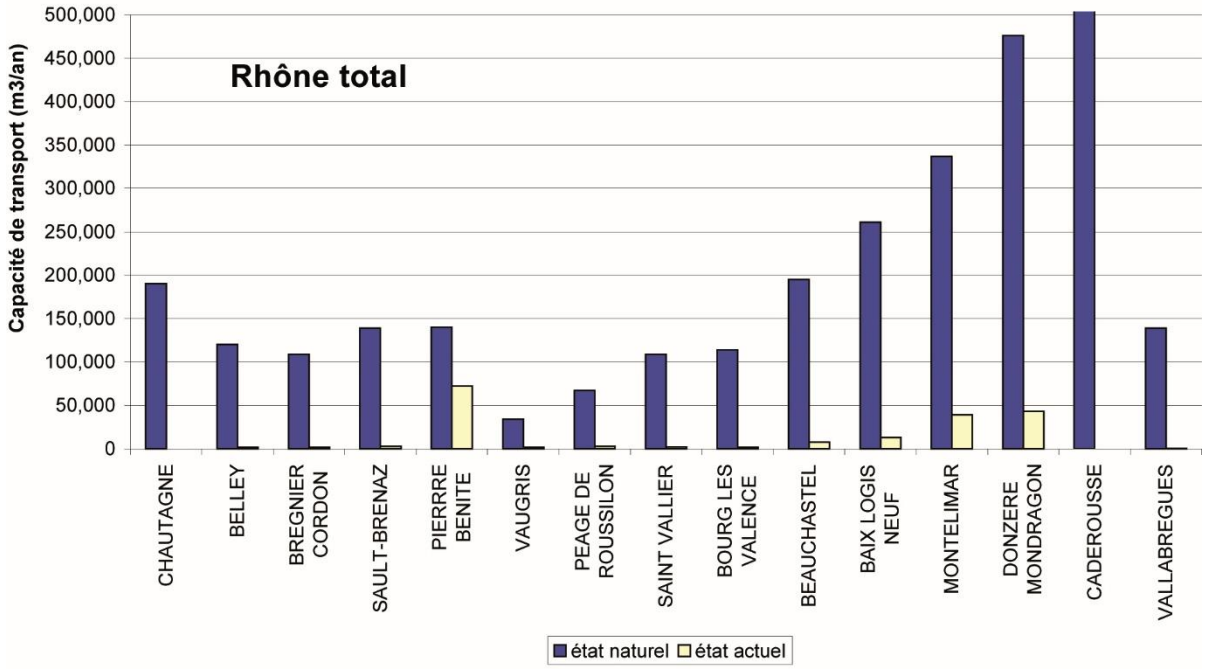
Estimations du transit sédimentaire suite aux aménagements CNR

La quantification du transport solide dans les Rhône totaux et les vieux Rhône a été réalisée avant et après aménagements (Figure 5-6, SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2), et les résultats sur l'ensemble du linéaire ont été regroupés sur l'Annexe 28 (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4). La capacité de transport a drastiquement chuté suite à l'aménagement du fleuve sur l'ensemble des biefs.

On passe d'une capacité annuelle de transport dans le Haut-Rhône de l'ordre de 140 000 m^3 à 1550 m^3 en moyenne pour les retenues et de 125 000 m^3 à 1220 m^3 pour les vieux Rhône, soit 1% des apports d'origine.

Le secteur de Pierre-Bénite montre la plus faible diminution de la capacité de transport suite aux aménagements, mais aussi le débit solide actuel le plus important après Génissiat : dans le Rhône total on passe de 140 000 m^3/an à 72 000 m^3/an, et dans le vieux Rhône de 37 000 m^3/an à 25 000 m^3/an, soit respectivement une réduction de 50% et 67% (Annexe 28). La retenue de Pierre-Bénite débute à la confluence de la Saône et montre un volume annuel charrié plus faible pour les deux périodes. Le transport solide est estimé à 50 000 m^3/an avant aménagements, et à 55 m^3/an après, ce qui représente 0,1% des apports d'origine. Le Rhône total de Vaugris montre le volume solide annuel transporté le plus faible de tous les autres Rhône totaux (Figure 5-6), de l'ordre de 33 000 m^3/an à l'état naturel et 1700 m^3/an à l'état actuel.

Les volumes charriés avant aménagement augmentent entre Péage de Roussillon (RT=70 000 m^3/an, VR=100 000 m^3/an) et Bourg-lès Valence (RT et VR=114 000 m^3/an). La situation post-aménagement ramène ces débits solides à entre 4 et 1 % du débit à l'état naturel (Annexe 28). Mais la diminution la plus forte reste celle du Bas-Rhône, à l'aval de l'Isère entre Beauchastel et Caderousse, secteur de Vallabrègues exclu. A l'état naturel, la capacité de transport se situe autour de 200 000 m^3/an pour le secteur de Beauchastel et monte jusqu'à 500 000 m^3/an à Caderousse (Figure 5-6). En revanche, le volume charrié calculé à l'état actuel est considérablement réduit, il constitue, respectivement dans le Rhône total et le vieux Rhône, 4 et 1 % du débit solide avant aménagement à Beauchastel, 5 et 1% à Baix-le-Logis Neuf, 11 et 5 % à Montélimar, 9 et 3,5 % à Donzère-Mondragon, 0,1 et 1 % à Caderousse. Le transport dans le secteur de Vallabrègues (ou Beaucaire), subit une diminution nette par rapport aux secteurs juste à l'amont. A l'état naturel, le Rhône total charrie près de 140 000 m^3/an (en réalité 135 000 m^3/an à l'amont de la Durance et 139 500 m^3/an à l'aval, Annexe 28) et le vieux Rhône 40 000 m^3/an (Figure 5-6). Ces biefs transportent aujourd'hui 0,2 % du débit solide d'origine à l'aval de la Durance (0 % à l'amont), et 10 % au niveau du vieux Rhône (Annexe 28). Le transport solide au niveau du palier d'Arles, plus précisément à l'amont du Petit Rhône, est toujours actif : le volume charrié est de près de 200 000 m^3/an avant aménagement et de 46 000 m^3/an après (Annexe 28).



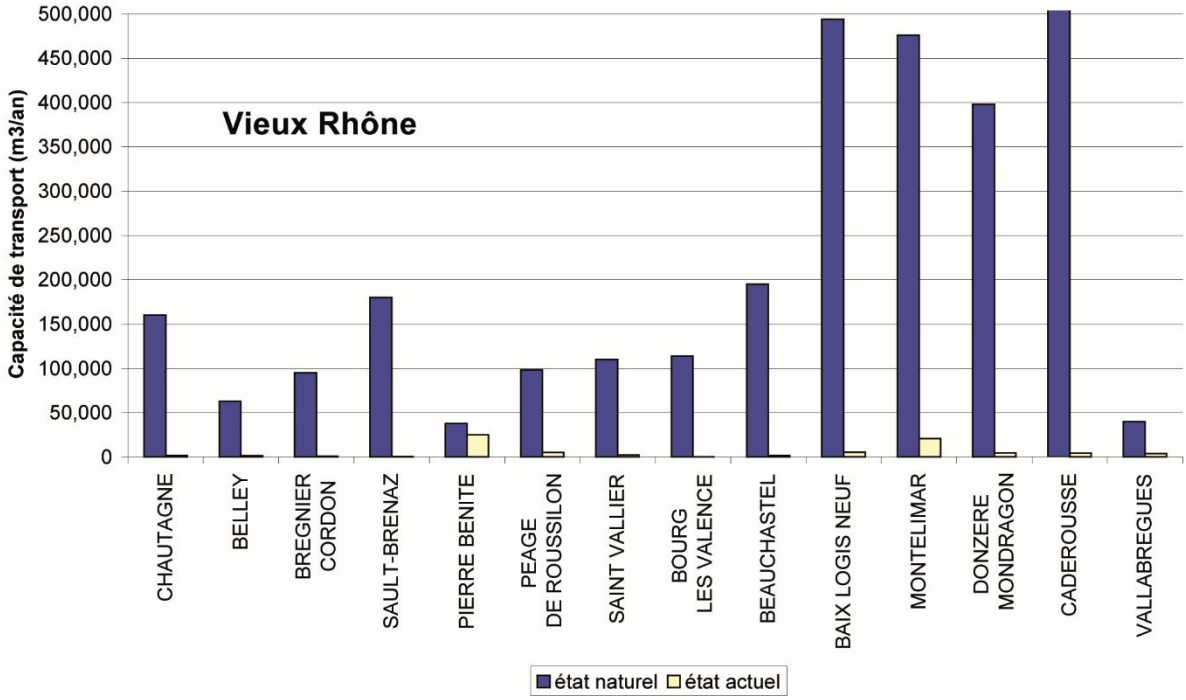


Figure 5-6 : Capacité de transport solide par charriage dans les Rhône totaux et les vieux Rhône avant (bleu) et après (blanc) les aménagements Girardon et CNR, SOREAH-EGR (2000-V3D1A2)

Il convient de considérer ces résultats avec précaution. Au moment de l'étude, la caractérisation granulométrique n'avait pas été réalisée de façon très précise. Les paramètres granulométriques utilisés pour les calculs de débit solide ne proviennent pas d'une méthode d'échantillonnage homogène mais sont issus soit des prélèvements dans la masse des alluvions réalisés lors de terrassements pour les aménagements CNR (parfois à plusieurs mètres de profondeur), soit des matériaux dragués principalement dans les retenues. Par conséquent, les données disponibles sous-estimeraient la granulométrie réelle des sédiments de surface, qui influe très fortement sur la

dynamique active du fleuve, notamment lorsqu'il est question de pavage. Les données granulométriques utilisées dans l'EGR pour calculer le transit sédimentaire sont parfois très éloignées de celles calculées dans la présente étude (chapitre 4) comme le montre le Tableau 5-3.

Secteur	Bief	Données retenues dans l'EGR		Nos résultats
		Dm masse (mm)	Dm surface (mm)	D50 (mm)
Génissiat	Retenue	55	77	5
Seyssel	Retenue	45	63	35
Chautagne	Retenue	40	56	17
	Vieux Rhône	40	56	31
Belley	Retenue	35	49	14
	Vieux Rhône	30	42	34
Bregnier-Cordon	Retenue	30	42	69
	Vieux Rhône	27	37,8	24
Sault-Brenaz	Retenue	15	21	12 / 0,01
	Vieux Rhône	15	21	32
Miribel-Jonage	Retenue	40	56	33
	Vieux Rhône			27
Pierre-Bénite	Retenue	40	56	37
	Vieux Rhône	40	56	45
Vaugris	Retenue	40	56	58
Péage de Roussillon	Retenue	40	56	32
	Vieux Rhône	40	56	44
Saint-Vallier	Retenue	45	63	49
	Vieux Rhône	45	63	52
Bourg-lès Valence	Retenue	50	70	57
	Vieux Rhône	50	70	27
Beauchastel	Retenue	55	77	58
	Vieux Rhône	55	77	
Baix-le Logis Neuf	Retenue	55	77	50
	Vieux Rhône	55	77	100
Montélimar	Retenue	55	77	59
	Vieux Rhône	55	77	84
Donzère-Mondragon	Retenue	55	77	91
	Vieux Rhône	50	63	50
Caderousse	Retenue	40	56	63
	Vieux Rhône	40	56	65
Avignon	Retenue	35	49	64
	Vieux Rhône	35	49	24
Vallabrègues	Retenue	35	49	22
	Vieux Rhône	35	49	38

Tableau 5-1 : Comparaison entre les données granulométriques de la masse et de la surface utilisées dans l'EGR (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4) pour calculer le transit naturel et celles calculées dans la présente étude (chapitre 4)

De plus, comme nous le verrons dans la suite de l'étude (paragraphe 2.2, p.267), la formule de Lefort (1991), à partir de laquelle les débits solides ont été estimés, semble peu efficace avec un domaine de validité faible sur les mesures de terrain (Recking et al., 2010). Enfin, il s'agit là d'une analyse comparée entre l'état dit naturel, c'est-à-dire un fleuve non anthropisé, et l'état actuel, subséquent à plusieurs phases d'aménagement. On ne peut pas considérer l'impact des barrages comme seul responsable de la perturbation de la capacité du transport solide. Il serait plus juste de considérer le cumul des aménagements humains successifs. Les modifications liées aux constructions

antérieures aux usines hydroélectriques, comme la forte incision du lit et le déficit des apports sédimentaires latéraux provoqués par la chenalisation, ou encore la réduction des matériaux disponibles suite aux extractions massives, n'ont pas été clairement évaluées. Les estimations de débits solides de l'Etude Globale Rhône sont donc à prendre avec précaution.

1.2. Analyse de la mobilité verticale du lit suite aux crues de 2001-2003

Dans le chapitre 3, les variations altimétriques du profil en long à la suite des trois grands épisodes de crues contemporaines qui ont touché les secteurs en aval de Lyon ont été étudiées et quantifiées. Ces fortes crues se sont succédé sur trois ans : la crue de mars 2001 (Q10 à Q20), provoquée par de fortes précipitations et par la fonte nivale sous l'effet de températures très douces, la crue généralisée de novembre 2002 (Q20 à Q50), due à une forte pluviosité sur l'Est du pays, ainsi que la crue aval d'automne de septembre 2002 (Q50) et la crue de décembre 2003 (Q10 à Q100), consécutives à de fortes précipitations de type cévenol (Tableau 5-2). L'observation a été réalisée entre deux profils post et pré-crues espacés de 4 à 10 ans.

	Qmax instantané aux stations (m^3/s)							
Crues	**Ternay**	***Retour***	**Valence**	***Retour***	**Viviers**	***Retour***	**Beaucaire**	***Retour***
03/2001	4780	*Q20*	6020	*Q10*	6270	*Q10*		
09/2002							10500	*Q50*
11/2002	4650	*Q20*	6600	*Q20*	7550	*Q50*	10200	*Q50*
12/2003			5500	*Q10*	7900	*Q50*	11500	*Q100*

Tableau 5-2 : Débit maximal instantané et période de retour pour les crues de 2001 à 2003 aux différentes stations hydrologiques entre Lyon et la mer (Ternay au PK 15,2, Valence au PK 109,7, Viviers au PK 166,5, Beaucaire au PK 269,6)

Le chapitre 4 a permis de mettre en évidence une organisation complexe des processus hydro-sédimentaires du patron granulométrique du Rhône, marquée par l'absence d'affinement granulométrique vers l'aval et par les discontinuités engendrées par les aménagements hydroélectriques. La répartition granulométrique s'est révélée plus grossière dans les vieux Rhône que dans les Rhône totaux. Le stockage des fines a même été souligné dans certaines retenues où les processus hydrodynamiques ont favorisé la sédimentation. Les vieux Rhône en amont de Lyon ne semblent pas pavés, contrairement à certains vieux Rhône en aval de Lyon et qui présentent des indices de pavage importants, notamment à Pierre-Bénite et à Donzère-Mondragon.

Les observations réalisées dans le chapitre 3 sur les variations altimétriques récentes ont été comparées à l'organisation du patron granulométrique dans le chenal actuel décrit dans le chapitre 4. Le but est de déterminer comment s'organisent les sédiments par rapport à la mobilité verticale, et notamment si la mobilité du fond est due à un simple transfert de fines stockées dans les réservoirs vers l'aval ou s'il est encore possible de mobiliser la charge grossière. Le lit est-il pavé au point d'être définitivement figé ?

Le cumul du différentiel altimétrique des profils avant et après les crues de 2001 à 2003 a été comparé à des variables pouvant permettre d'interpréter les modifications du chenal : la largeur du lit mineur, la fréquence de débit de chaque crue, les données granulométriques (D_{50}) collectées sur tout le continuum et moyennées par bief, et les indices de pavage mesurés dans les vieux Rhône (Figure 5-7). Seuls les fonds composés de fines n'ont pas été moyennés avec le reste des D_{50} du bief puisque leur transfert ne constitue pas une modification de la morphologie du chenal. Les périodes de retour ont été

évaluées aux stations de Ternay (PK 15), Valence (PK 110), Viviers (PK 166) et Beaucaire (PK 270) pour les crues de 2001, 2002 et 2003 (Tableau 5-2). Le graphique des cumuls d'incision est qu'il permet de souligner la tendance de l'évolution verticale et la direction de la pente.

Ces trois grandes crues, ou du moins leur impact cumulé, ont modifié le profil en long avec notamment la mise en évidence d'incisions et d'exhaussements locaux dans certains Rhône et vieux Rhône.

La partie aval du Rhône voit une incision continue importante qui semble due à des débits de crue de 2002-2003 plus intenses, plus rares (Figure 5-7). Viennent se surajouter à ces évènements les dragages localisés, qui ont aussi pu entraîner l'abaissement du profil par endroits durant cette période. Le chenal a réagi malgré un diamètre médian des particules parfois important (essentiellement des graviers grossiers aux galets, de 30 à 120 mm) et un pavage marqué (entre 3 et 8) dans les secteurs de Pierre-Bénite, Vaugris, Saint-Vallier, Beauchastel à Donzère-Mondragon, Beaucaire et le grand Rhône. Ces secteurs sont considérés comme encore actifs d'après la Figure 5-6 et l'Annexe 28 (paragraphe 1.1, p.236). Les zones où la granulométrie est la plus fine (limons et sables, en vert sur la Figure 5-7), situées à l'amont direct des barrages de Beauchastel, Baix-le Logis Neuf, Montélimar et Beaucaire, ainsi que plus significativement dans le secteur aval du grand Rhône, montrent une incision après les crues, correspondant au transfert sableux. Les exhaussements observés dans les retenues correspondent à des granulométries plus grossières. Le vieux Rhône de Péage de Roussillon, l'amont de la retenue de Saint-Vallier, la retenue de Bourg-lès-Valence et l'amont du Rhône total de Beauchastel sont des secteurs relativement stables (en considérant l'ensemble de la section) qui présentent des granulométries grossières. A l'aval du barrage de Pierre-Bénite, de Vaugris, et entre l'amont du barrage de Saint Vallier et le Doux, le profil enregistre une forte incision alors que la granulométrie est grossière et le débit de moindre intensité qu'à l'aval. La réduction de la largeur du chenal couplée aux évènements de crue pourrait être en partie à l'origine de cette forte incision. Il convient toutefois de calculer les forces tractrices pour pouvoir interpréter ces observations. A l'amont des barrages de Vaugris, Donzère-Mondragon et Caderousse, l'exhaussement du profil peut être lié aux apports des affluents à l'amont (respectivement la Saône et la Drôme).

Le lit actuel n'est donc pas totalement figé et une succession de crues est encore susceptible de remobiliser la charge graveleuse du fond. En résumé, la remobilisation de la charge de fond par les crues successives est due soit :

- au transport des fines depuis leur lieu de stockage vers l'aval, soit
- au caractère hydraulique des crues rares permettant de remobiliser le fond graveleux, soit
- aux apports sédimentaires des affluents.

Tandis que les zones stables ou de stockage sédimentaire peuvent être dues soit :

- à la présence de matériel grossier difficile à remobiliser, soit
- à la diminution de la pente dans la partie convexe, soit
- au transfert des sédiments depuis la retenue vers l'aval.

L'étude altimétrique décrit un fond localement mobile et la description granulométrique indique un lit pavé, ce qui prouve que la confrontation entre la granulométrie du fond et les variations topographiques ne suffit pas pour expliquer le transport de la charge de fond. D'autres paramètres entrent en jeu tel que la pente, la géométrie du cours d'eau, etc… C'est pourquoi il est intéressant de faire appel à un modèle hydraulique qui permette d'être plus précis pour formuler des interprétations grâce à la prise en compte des paramètres physiques et de quantifier le transport solide.

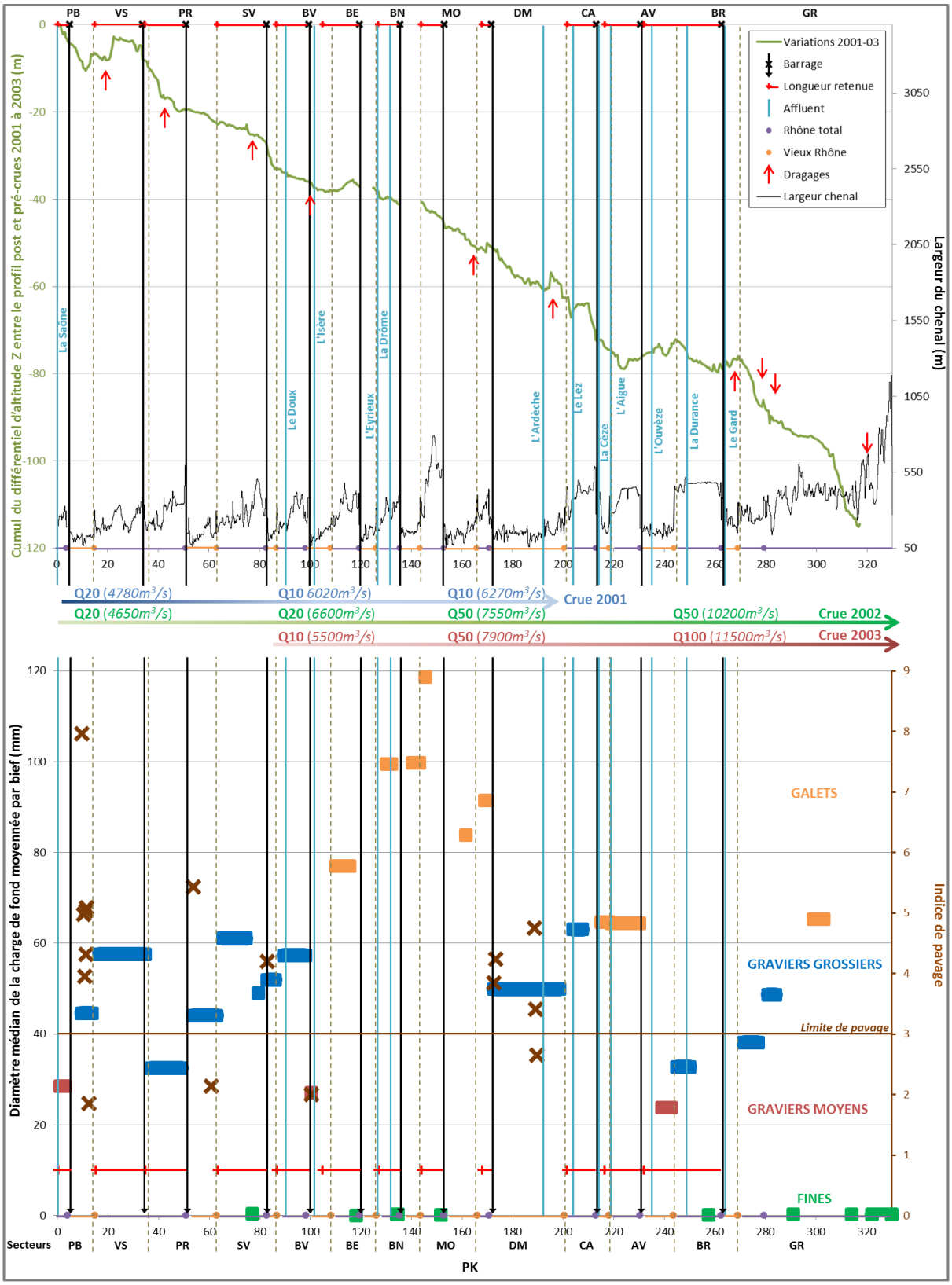


Figure 5-7 : Cumul du différentiel altimétrique entre les profils après et avant les crues de 2001 à 2003 (Q10 à Q100) comparé à la largeur du chenal (en m), à la période de retour des crues, aux diamètres médians (D_{50} en mm) des sédiments prélevés dans le fond du lit (sur les points hauts du thalweg) et moyennés par bief (excepté la fraction fine) et aux indices de pavages mesurés dans les vieux Rhône.

1.3. Modélisation du transport solide à Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon

1.3.1. Enjeux de l'étude

La caractérisation du transport solide a été centrée sur les secteurs étendus de Pierre-Bénite (jusqu'au barrage de Vaugris) et Donzère-Mondragon (du Rhône total de Montélimar au barrage de Caderousse). Ils ont la particularité de montrer un abaissement du lit suite aux évènements critiques de 2001 à 2003 même s'ils présentent une granulométrie particulièrement grossière et des indices de pavage particulièrement élevés. Le D_{50} moyen par bief à Pierre-Bénite est de 28,5 mm pour le Rhône total et de 44,5 mm pour le vieux Rhône, à Montélimar de 59,5 mm (RT) et de 84 mm (VR), à Donzère-Mondragon de 91,5 mm (RT) et de 50 mm (VR) et à Caderousse de 63 mm pour le Rhône total. Chacun des vieux Rhône possède un indice de pavage compris entre 3,95 et 7,96 pour Pierre-Bénite (excluant un faible indice de 1,85 à l'aval du bief qui correspond à la limite de la zone de retenue), et entre 3,4 et 4,74 pour Donzère-Mondragon (excluant aussi un faible indice de 2,65 à l'aval du bief, limite de la retenue). L'étude du transport solide dans ces secteurs vise à enrichir la réflexion sur les stratégies de redynamisation du lit présentant un fort pavage, à favoriser le développement des milieux pionniers plus riches, ou à suivre des opérations de réhabilitation des lônes des vieux Rhône dans le cadre du Plan Rhône à une étape post et pré-restauration. En effet, jusqu'à présent la restauration des bras morts du Rhône a consisté en des actions de restauration active visant à recréer des formes :

1- Riquier (*in prep*) a démontré que les modifications post-restauration de la géométrie du lit principal du Rhône peuvent fortement raccourcir la durée de vie du stade aquatique des chenaux restaurés.

2- Certains auteurs ont démontré que les chenaux latéraux actifs, c'est-à-dire connectés de manière permanente à l'amont et à l'aval, peuvent piéger une part significative du transport solide grossier (Constantine et al., 2010 ; Dieras et al., 2013 ; Dieras, 2013).

Ainsi, il est important d'estimer le degré de stabilité ou non de la géométrie du chenal principal, estimation restant toutefois fortement liée à la capacité d'érosion des berges, au regard du transport solide résiduel et du potentiel de mobilisation lors des crues de la charge de fond dans ces vieux Rhône.

Pierre-Bénite constitue un secteur où des actions de restauration ont été entreprises en 2000. Les opérations à Montélimar et Donzère-Mondragon viennent de débuter par une augmentation du débit réservé équivalant à 5% du module (2014).

Vieux Rhône de Pierre-Bénite

Le vieux Rhône de Pierre-Bénite constitue une section court-circuitée qui s'étend sur 10 km à l'aval de Lyon en zone urbaine. Il n'existe que deux seuils naturels (ou radiers) dans le chenal, dont un réactivé, ce qui constitue une faible alternance de faciès, et par conséquent, une hétérogénéité relative des habitats. En 1999 débute la restauration de trois lônes (Figure 5-8) afin de favoriser une diversité de fonctionnement inter et intra-lône : Ciselande est reconnectée de façon permanente avec le Rhône, Jaricot est élargie pour laisser passer les crues et reconnectée à l'aval, et Table ronde a été curée. Avant 2000, le débit réservé dans le vieux Rhône oscillait entre 10 m^3/s de septembre à mars et

20 m^3/s d'avril à août. En 2000, le débit minimum de Pierre-Bénite est passé à 100 m^3/s sur toute l'année.

Le vieux Rhône de Pierre-Bénite a la particularité de montrer les effets positifs les plus conséquents suite à l'augmentation du débit réservé, et donc des vitesses, en favorisant le développement de poissons (hotu, barbeau fluviatile, ablette, vandois…) et d'invertébrés d'eau courante (Lamouroux et al., 2006 ; Mérigoux et al., 2009). Les opérations de restauration ont permis le retour des espèces typiques des bras courants à Ciselande, l'augmentation des espèces typiques des apports phréatiques à Jaricot et des milieux eutrophes et stagnant à Table Ronde (Amoros et al., 2005). La question de la durabilité de ces opérations peut se poser du fait de l'évolution de la géométrie du lit du Rhône au droit de l'entrée de la lône de Ciselande, du comblement rapide de la lône de Table Ronde suite à la formation d'un bouchon alluvial à l'aval qui la déconnecte du chenal principal, ou encore de l'abaissement de la ligne d'eau du vieux Rhône entre 2002 et 2011 (Riquier, *in prep*).

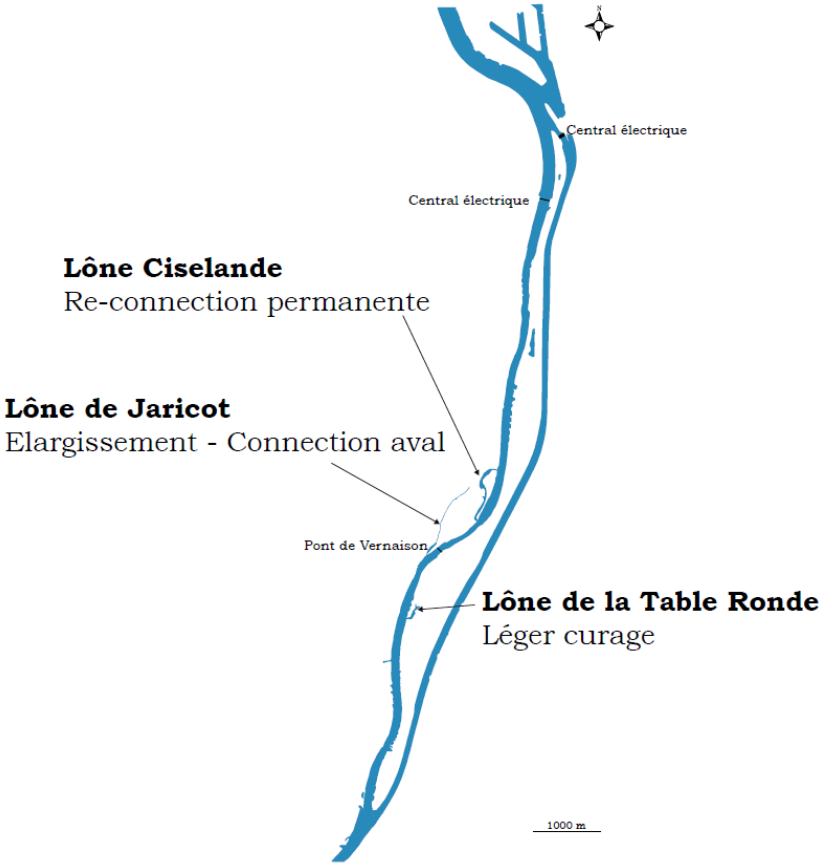


Figure 5-8 : Localisation des trois sites restaurés dans le vieux Rhône de Pierre-Bénite (Ciselande, Jaricot et Table Ronde) (Lamouroux et al., 2012)

Vieux Rhône de Montélimar

Le vieux Rhône de Montélimar constitue un tronçon court-circuité d'environ 13 km de long et comporte de nombreux radiers dans le chenal, avec une diversité de lônes relativement faible (Figure 5-9). Le débit réservé devrait prochainement passer de 15-60 m^3/s suivant le débit du Rhône à 75 m^3/s, toute l'année selon la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques de 2006 (LEMA– mise en application au 1er Janvier 2014 sur l'ensemble des RCC du Rhône).

Les simulations réalisées par N. Lamouroux et son équipe soulignent que l'augmentation du débit permettrait un gain d'habitats qui serait néanmoins plus modéré qu'à Donzère-Mondragon du fait de la morphologie moins contrastée du site, du niveau de débit avant augmentation et des peuplements en place puisqu'il possède la densité et la richesse taxonomique en macro-invertébrés les plus faibles des secteurs du Bas-Rhône avant restauration (Lamouroux et al., 2012). Ce vieux Rhône présente malgré tout des atouts en matière de restauration, comme sa longueur, la présence de zones courantes peu profondes favorables aux espèces de poissons juvéniles d'eau courante (hotu, ablette), ainsi que des zones profondes qui créent des abris pour certaines populations. Les lônes non plus ne présentent pas de fort potentiel biologique, même si la situation pourrait s'améliorer suite à la restauration et au passage des crues (lône de la Roussette, Figure 5-9).

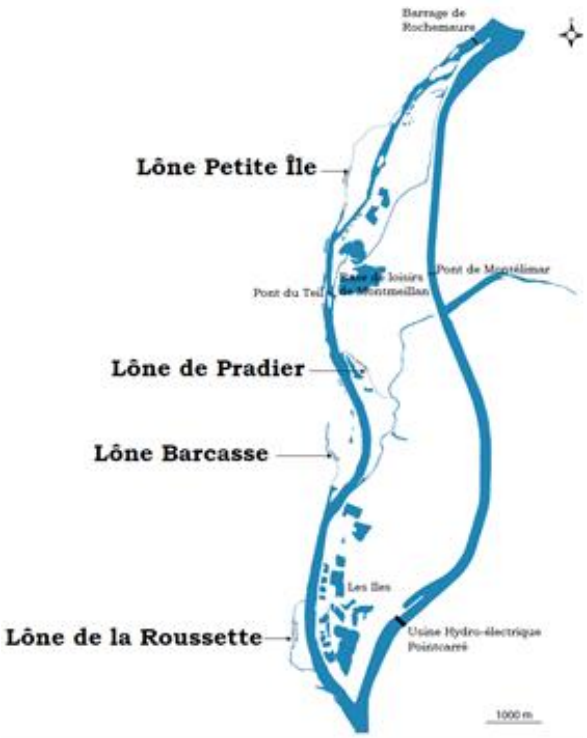


Figure 5-9 : Le vieux Rhône de Montélimar et les lônes en projet de restauration (Lamouroux et al., 2012)

Vieux Rhône de Donzère-Mondragon

Le vieux Rhône de Donzère-Mondragon constitue une section court-circuitée de 29 km, la plus longue du Rhône, et comporte un nombre relativement important de lônes encore en eau (Figure 5-10). La première étape de la réhabilitation devrait consister au passage d'un débit minimum de 60 m^3/s dans le vieux Rhône à 75,4 m^3/s toute l'année (LEMA, 2006). Ce vieux Rhône devrait être le premier secteur où une restauration combine actions passives (démantèlement des ouvrages Girardon) et actives (curage/dragage, reconnexion de lônes) pour améliorer les conditions d'habitats à la fois dans le chenal principal et dans les zones rivulaires. Ces opérations encore au stade du projet devraient débuter d'ici 2016.

La particularité de ce vieux Rhône est qu'il possède un fort potentiel morphologique, avec une longueur et une proportion de seuils plus importantes que dans les autres secteurs. Il possède également un fort potentiel biologique avec la plus forte diversité de peuplements de poissons du Bas-Rhône abritant des espèces d'eau vive, d'eau courante et migratrices, notamment l'apron du Rhône,

une espèce endémique du bassin du Rhône en voie de disparition et inscrite sur la liste rouge mondiale des espèces menacées de l'Union internationale pour la conservation de la nature (Fruget, 2003). L'avantage d'une restauration des milieux d'eaux courantes (lotiques), est qu'elle permettrait de rétablir des zones de croissance des poissons rhéophiles (qui évoluent dans des zones de courant) et de limiter la propagation de macrophytes invasives favorisée dans les milieux d'eaux à circulation lente (lentiques). La conservation de zones typiques des milieux stagnants renforcerait la biodiversité du secteur (coléoptères, gastéropodes…) (Fruget et Dessaix, 2002).

Figure 5-10 : Le vieux Rhône de Donzère-Mondragon et les lônes en projet de restauration (Lamouroux et al., 2012)

Les bras morts constituent des zones de croissance, de développement et de refuge pour différentes espèces aquatiques (poissons, vertébrés, invertébrés, végétation…). Cette étude a pour but de maintenir et d'améliorer leur diversité et, pour ce faire, (1) d'apporter des éléments de connaissance pour définir des espaces pérennes capables d'abriter une forte biodiversité et (2) d'améliorer les stratégies de redynamisation sédimentaire (réactivation des faciès et maintien des formes fluviales) afin de revaloriser les habitats aquatiques dont le développement est contraint en zones fortement pavées.

1.3.2. Etat des lieux de l'évolution verticale du lit suite aux crues de 2001-03

Dans le chapitre 3, nous avons montré que les zones comprises entre la confluence de la Saône et le barrage de Vaugris et entre le Rhône total de Montélimar et le barrage de Caderousse étaient globalement incisées suite aux crues de 2001 à 2003 (de la Q10 à la Q100), et montraient quelques zones en exhaussement, qui semblaient correspondre aux dépôts soit dans les retenues (Vaugris, Donzère-Mondragon) soit du matériel transporté par les affluents (vieux Rhône de Donzère 4 km à l'aval de l'Ardèche, Rhône total de Caderousse à l'aval du Lez). Le chapitre 4 nous a aussi permis de montrer que ces secteurs possédaient une granulométrie particulièrement grossière (entre le gravier grossier et le galet en moyenne) et un lit pavé (indice de pavage de 3 à 8 pour Pierre-Bénite et entre 3 et 5 pour Donzère-Mondragon). La granulométrie du lit est donc très hétérogène et présente des secteurs pavés, mais avec un profil en long qui, visiblement, varie suite aux grandes crues. A partir de ce constat, nous avons formulé l'hypothèse que la mobilisation de la charge de fond grossière et la destruction de la couche de pavage nécessitent l'action de crues puissantes.

L'évolution du profil en long avant et après les crues de 2001 à 2003 dans les zones précédemment évoquées a été retracée afin de rendre compte de la mobilité verticale du chenal suite à de tels évènements.

Secteur de Pierre-Bénite (de la confluence de la Saône au barrage de Vaugris)

Ce secteur étendu n'a été touché que par les crues de mars 2001 et de novembre 2002 (Q20) (Tableau 5-2).

La charge de fond entre la confluence de la Saône et le barrage de Vaugris est constituée majoritairement de graviers et parfois de galets (vieux Rhône et amont du Rhône total de Vaugris), et ne présente pas de fines dans les retenues (Figure 5-11). Entre 1999 et 2004, le lit s'est abaissé de 0,4 m en moyenne dans la retenue de Pierre-Bénite, excepté au PK 3 où il s'est exhaussé de 0,5 m. Cet abaissement survient suite aux crues de 2001 et de 2002. Le vieux Rhône de Pierre-Bénite montre aussi un enfoncement du lit suite aux crues jusqu'au PK 11,5 (Figure 5-11) : le profil s'est incisé de 0,45 m en moyenne entre 1999 et avril 2001, soit un mois après la crue vicennale. Des incisions, cette fois-ci plus localisées, sont observées entre 2001 et 2006, soit près de quatre ans après la crue de novembre 2002. L'incision moyenne est de 0,15 m, avec quelques zones exhaussées. Seule la mouille, au niveau du PK 7,5, n'a quasiment pas évolué. Le seuil ou radier naturel entre le PK 9,5 et le PK 10, qui tient un rôle particulier du fait qu'il contrôle la ligne d'eau du tronçon amont et la mise en eau de la lône de Ciselande, s'incise de 0,25 m suite à la crue de 2001 mais reste stable entre 2001 et 2006. Celui-ci est composé de graviers et de galets, ce qui expliquerait sa faible remobilisation par les crues. Le profil en long entre le PK 12 et le PK 15 s'est successivement exhaussé de 0,1 m entre 1999 et 2001 puis de 0,5 m entre 2001 et 2006. Cet exhaussement évoque une migration du profil en long vers l'aval (Figure 5-11).

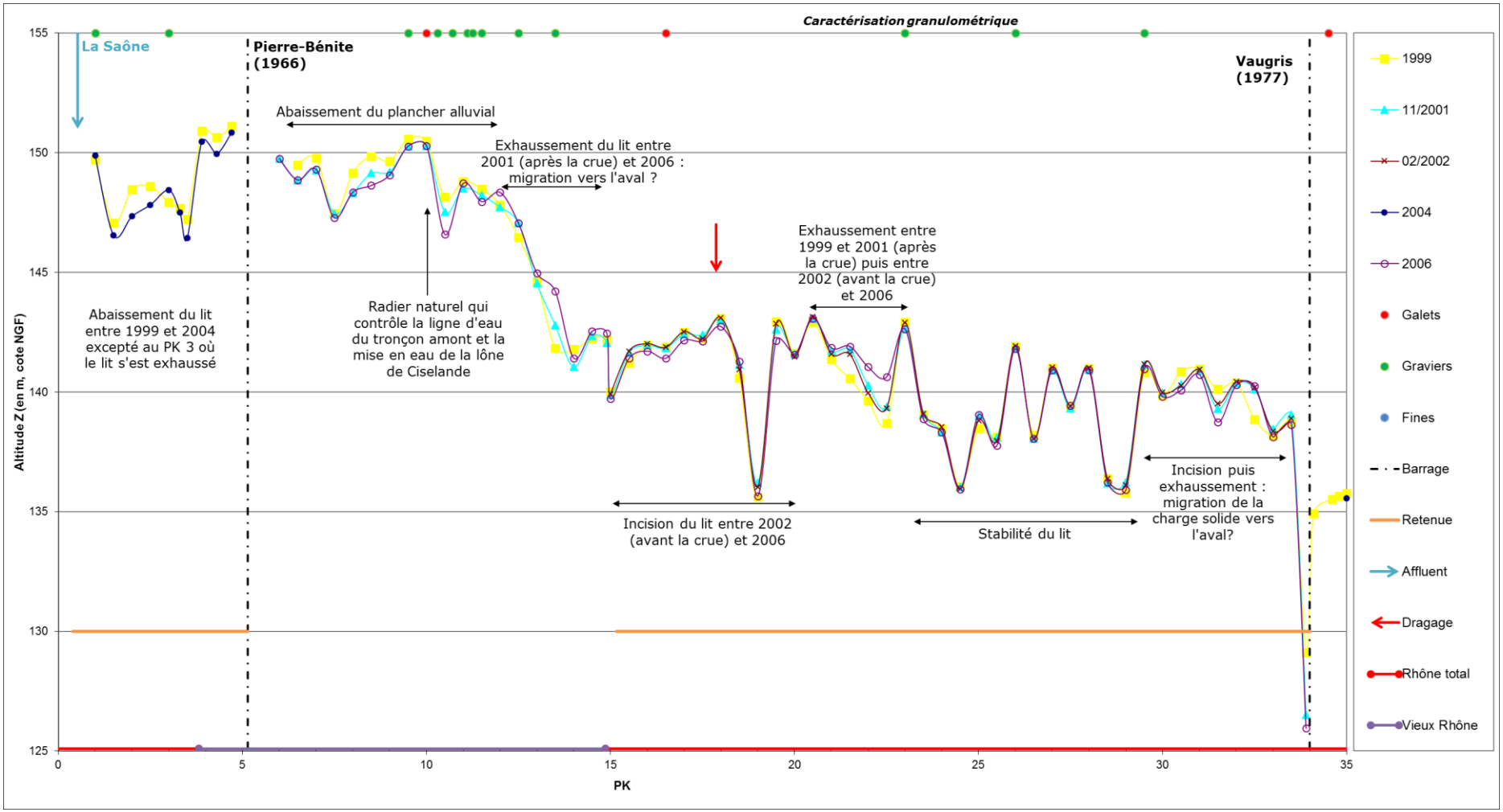


Figure 5-11 : Variations verticales du profil en long du chenal du Rhône avant et après les crues de 2001 à 2003, de la confluence de la Saône au barrage de Vaugris

L'abaissement du plancher alluvial est aussi constaté à l'amont du Rhône total de Vaugris entre le PK 15 et le PK 20 (Figure 5-11). L'incision est quasi nulle entre 1999 et 2002, après la crue de 2001, mais devient plus évidente entre 2002 et 2006, après la crue de 2002, avec un abaissement moyen de 0,25 m. Puis la tendance s'inverse entre le PK 20,5 et le PK 23 : le profil s'exhausse successivement de 0,46 m entre 1999 et 2001, suite à la crue de 2001, puis de 0,44 m entre 2002 et 2006, après la crue de 2002. Le lit s'est par ailleurs faiblement abaissé entre 2001 (après la crue de l'année) et 2002 (avant la crue), de 0,05 m en moyenne. Cette mouille pourrait constituer une fosse de remplissage où viendraient se stocker les graviers de l'amont mobilisés en période de crues. Entre le PK 23 et le PK 29,5, le lit, composé de graviers, reste stable malgré les crues successives. Entre le PK 29,5 et le PK 32, le profil s'incise de 0,15 m entre 1999 et 2001 et de 0,3 m entre 2002 et 2006. Puis, entre 1999 et 2001, il s'exhausse de 0,6 m jusqu'au PK 33. Au niveau du barrage de Vaugris le profil s'incise de 2,6 m entre 1999 et 2001 et de 0,55 m entre 2001 et 2006.

La crue de 2001 estimée à 4780 m^3/s (Q20) semble globalement avoir eu plus d'impact sur la mobilisation de la charge de fond, notamment sur la partie amont du tronçon étudié (entre le PK 1 et le PK 11,5) et à l'aval (entre le PK 32 et le barrage de Vaugris), que celle de 2002, légèrement moins puissante (4650 m^3/s, Q20 aussi). Les variations verticales du lit dans ce secteur étendu peuvent donc être observées suite à une crue vicennale.

Secteur de Donzère-Mondragon (du Rhône total de Montélimar au barrage de Caderousse)

Les crues de mars 2001 (Q10), de novembre 2002 (Q50) et de décembre 2003 (Q50) ont affecté ce secteur étendu (Tableau 5-2).

La faible quantité de prélèvements réalisés sur le secteur de Montélimar décrit une granulométrie grossière, avec majoritairement des galets dans le Rhône total et le vieux Rhône, ainsi que des sédiments fins stockés dans la retenue (Figure 5-12). Entre 1997 et 2005, l'amont du profil du Rhône total de Montélimar, entre le PK 144 et le PK 149,5 (zone à galets), montre des alternances d'incision et d'exhaussement, avec une tendance majoritairement à l'incision. La retenue, entre le PK 149,5 et le barrage de Montélimar, composée de fines, s'incise de 0,4 m en moyenne après les crues. Cette incision témoigne uniquement d'un transfert de la charge sableuse déposée sur un lit grossier, elle ne reflète en aucun cas un changement de la géométrie du fond. L'amont du vieux Rhône (jusqu'au PK 161) présente aussi des alternances entre incision et exhaussement entre 1999 et 2007. Au niveau du PK 154, du PK 158 et du PK 160, le lit s'abaisse respectivement de 0,4 m, de 1 m et de 0,3 m entre 1999 et 2003, soit suite aux crues de 2001 et 2002. Puis il s'exhausse respectivement de 0,4 m, 1,45 m et 0,15 m entre 2003 et 2007, soit 4 ans après la crue de 2003 (Figure 5-12). Même si la granulométrie n'a pu être mesurée à l'amont du vieux Rhône de Montélimar du fait du faible tirant d'eau et de la difficulté à accéder à des bancs non végétalisés, nous considérerons cette section comme étant grossière, d'une part par continuité avec la partie aval composée de galets, et d'autre part d'après les données bibliographique de l'EGR décrivant aussi un lit à galets (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4). Le lit à l'aval du vieux Rhône de Montélimar (après le PK 161) s'incise de 0,2 m en moyenne entre 1999 et 2007, soit après les trois crues, avec néanmoins deux exhaussements localisés aux PK 162 et 164,5.

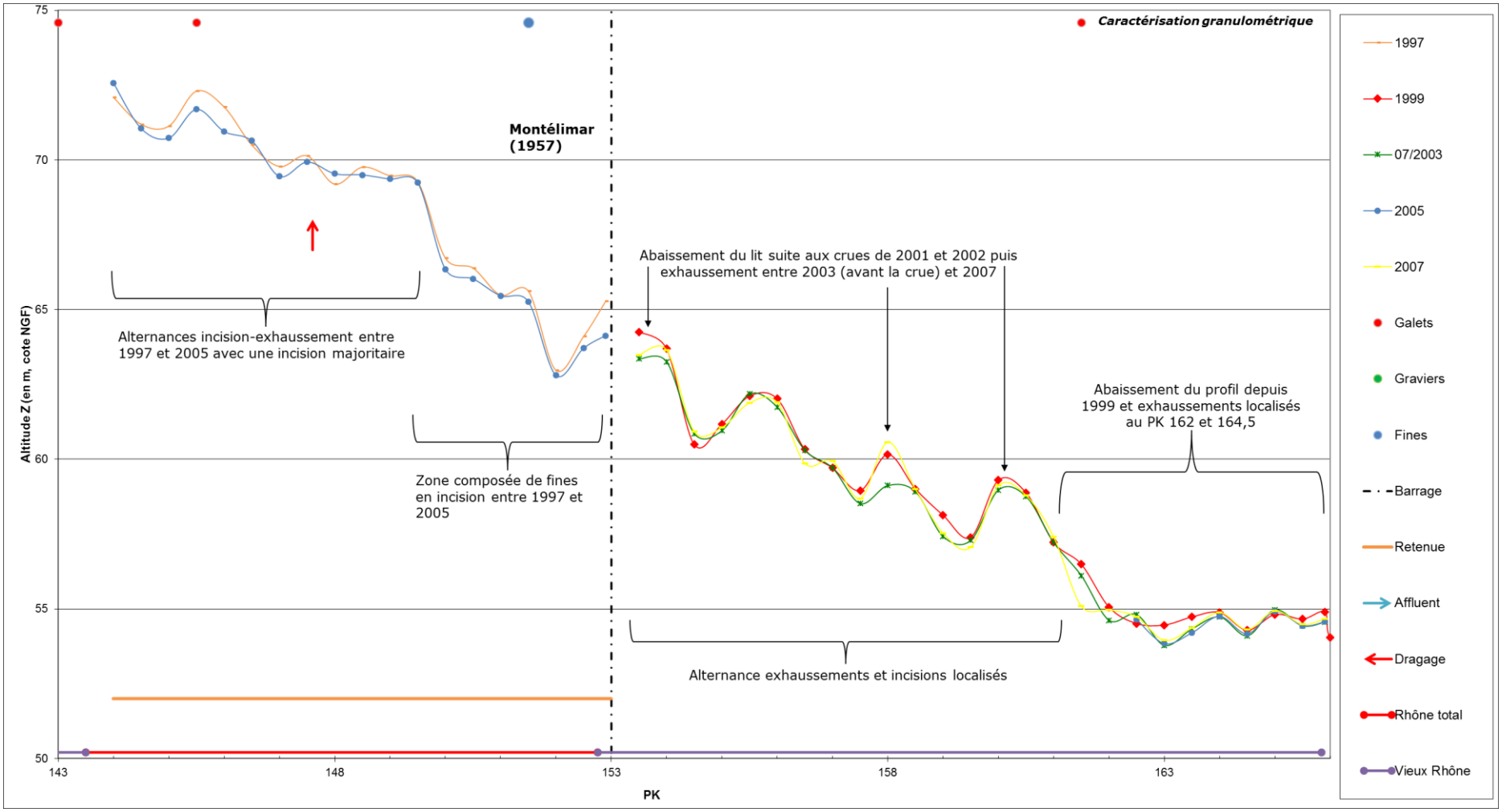


Figure 5-12 : Variations verticales du profil en long du chenal du Rhône avant et après les crues de 2001 à 2003, sur le secteur de Montélimar

Entre l'amont du Rhône total de Donzère-Mondragon et le barrage de Caderousse (Figure 5-13), le lit possède une charge grossière allant des graviers (majoritairement dans le vieux Rhône de Donzère et dans la retenue de Caderousse) aux galets (dans le Rhône total de Donzère et à la limite vieux Rhône de Donzère et Rhône total de Caderousse). Entre 2000 et 2004, soit après les 3 grandes crues, le Rhône total de Donzère montre deux zones s'incisant en moyenne de 0,28 m (PK 168,4 et PK 170,5) et une zone s'exhaussant de 2,17 m (PK 170) localisée dans la retenue. Entre 1998 et 2003, i.e. suite aux crues de 2001 et 2002, le lit du vieux Rhône de Donzère s'abaisse en moyenne de 0,3 m. Nous noterons la présence d'une zone (entre le PK 181,5 et 185,5) enregistrant des variations verticales visiblement plus faible, à l'exception d'une zone en incision autour du PK 184 (-0,5 m en moyenne). Entre 2003 et 2007, soit 4 ans après la crue de 2003, le lit enregistre majoritairement des exhaussements localisés (de 0,42 m en moyenne), ainsi que quelques incisions (de 0,2 m en moyenne). La zone autour du PK 174,5 montre une incision moyenne de 0,5 m suite aux crues de 2001 et 2002, puis de 0,73 suite à celle de 2003 (Figure 5-13). Entre 2000 et 2007 (soit à la suite des trois grandes crues), de fortes variations verticales sont relevées à l'aval de la confluence de l'Ardèche (environ 2 km), entre le PK 194,5 et le PK 206, avec des exhaussements locaux moyens de 0,63 m, et des incisions locales moyennes de 0,87 m. Ces alternances peuvent parfois atteindre +/- 3 m (exhaussement max au PK 195, incisions max aux PK 199,5 et PK 202,5). Entre le PK 206 et 210, au milieu de la retenue de Caderousse, le profil en long est relativement stable. Entre le PK 210 et le barrage de Caderousse, on enregistre une incision moyenne de 1 m, avec des maxima de 1,6 m et de 2,15 m (respectivement au PK 210,5 et à l'amont direct du barrage).

Ce secteur étendu (Figure 5-12 et Figure 5-13), possédant une granulométrie grossière à l'exception de l'aval de la retenue de Montélimar, montre globalement une mobilité de la charge de fond suite à des épisodes de crues de période de retour supérieure à 10 ans (2001), voire supérieure à 50 ans (2002 et 2003). L'absence de profil entre la crue de 2001 et celle de 2002 ne permet pas d'isoler l'impact précis de chaque évènement. La variation verticale du lit à galets et graviers grossiers de ce secteur étendu est donc possible pour des crues supérieures à 6270 m^3/s (Q10), voire supérieures ou égales à 7550 - 7900 m^3/s (Q50).

L'analyse de la mobilité des profils en long suite à des épisodes de crues majeures permet de renseigner sur la réactivité plus ou moins immédiate du chenal à un débit considéré, si les données permettent d'encadrer l'évènement, ou à une gamme de débits. La précision de cette étude reste donc relative et ne permet ni la quantification des variations verticales d'une crue isolée dans l'absolu, ni à un débit donné (Q2, Q5…). La modélisation devient alors un outil nécessaire à la quantification de la sensibilité du lit et ce, à n'importe quel débit simulé, et à l'estimation de la charge en transit.

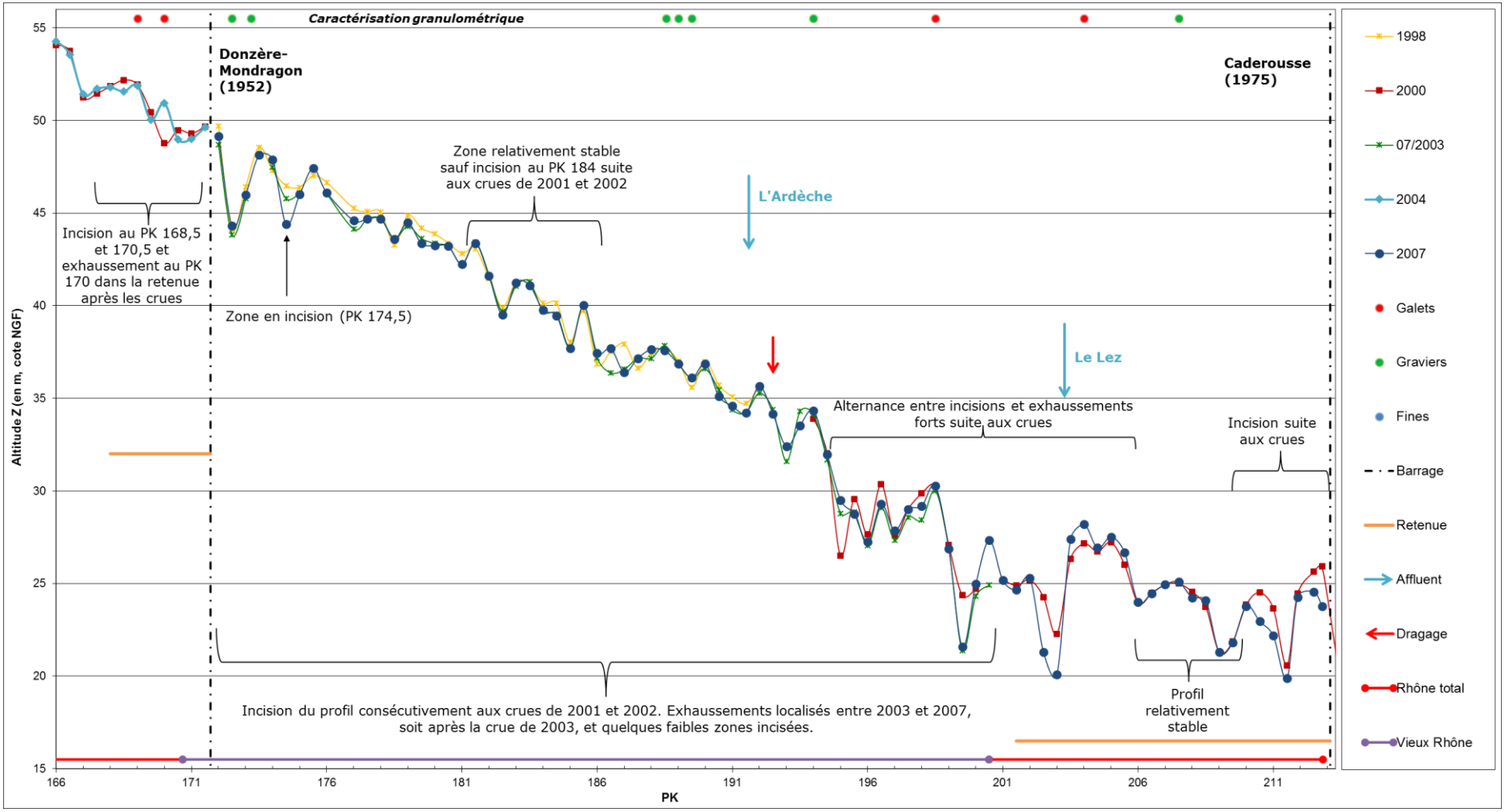


Figure 5-13 : Variations verticales du profil en long du chenal du Rhône avant et après les crues de 2001 à 2003, du Rhône total de Donzère-Mondragon au barrage de Caderousse

2. Modélisation du transport solide

2.1. Caractérisation du seuil de mise en mouvement des particules

2.1.1. Formulation de Manning-Strickler et estimation de la rugosité

Dans le cas d'un écoulement uniforme, les forces appliquées à la masse fluide comprise entre deux sections espacées d'une certaine distance sont en équilibre. C'est dans ce cadre que s'applique la **formule de Chézy** :

$$V = C\sqrt{R.i}$$

Avec V la vitesse moyenne d'écoulement (en $m^2.s^{-1}$), C le coefficient de friction de Chézy, i la pente (constante par hypothèse) du tronçon de cours d'eau (pente moyenne du fond) et R le **rayon hydraulique** (en m) avec :

$$R = \frac{S}{P}$$

Où S représente l'aire de la section mouillée (en m^2) et P le périmètre mouillé (en m).

Le coefficient de Chézy C dépend de la nature des parois et du rayon hydraulique. Pour estimer ce coefficient, la **formule empirique de Manning-Strickler** est la plus utilisée :

$$C = K.R^{1/6}$$

Avec K le coefficient de rugosité, appelé coefficient de Strickler (en $m^{1/3}.s^{-1}$). Il est supposé constant et caractéristique du frottement à l'interface eau-sol du cours d'eau. Le coefficient K diminue quand la rugosité du lit augmente. Ainsi, ce coefficient dépend de la rugosité des parois du chenal, mais contrairement au coefficient de Chézy, il dépend très peu du tirant d'eau. Les coefficients de rugosité sont définis pour chaque tronçon par des valeurs moyennes dans le lit mineur et le lit moyen, dont la rugosité peut être différente du lit mineur. Ces coefficients varient selon la composition du milieu (Figure 5-14), en fonction de la présence de faciès qui conditionnent la rugosité du fond (plat, seuils, mouilles) ou de la configuration des berges (sédiments fins, végétation alluviale, aménagements).

En partant de la formule de Chézy et de la valeur du coefficient de Chézy C, on obtient la **formule de Manning-Strickler** :

$$Q = K.S.R^{2/3}\sqrt{i}$$

Où Q est le **débit** ($m^3.s^{-1}$), tel que :

$$Q = S.V$$

Et V, la **vitesse moyenne d'écoulement**, peut être ainsi définie par :

$$V = K.R^{2/3}.\sqrt{i}$$

Dans le cas d'un cours d'eau large et de forme rectangulaire, le rayon hydraulique R devient sensiblement égal à la hauteur d'eau H.

Nature des parois	Valeur de K en $m^{1/3}/s$
Béton lisse	75-90
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	<10

Figure 5-14 : Exemples d'ordres de grandeurs du coefficient de Strickler en fonction des surfaces rencontrées (Degoutte, 2006)

La rugosité se définit ainsi par l'irrégularité des fonds (contrôle hydraulique) et la rugosité individuelle des grains (contrôle sédimentologique), appelée rugosité de peau ou Strickler de peau (K_S). Le coefficient de Strickler est généralement inférieur au Strickler de peau. Il existe plusieurs formules pour estimer le **Strickler de peau** ou la rugosité de peau. Nous utiliserons la formule de Meyer-Peter et Müller (1948) qui est adaptée aux milieux où la granulométrie est étendue :

$$K_S = \frac{26}{D90^{1/6}}$$

Cette formule connait néanmoins quelques limites. Elle a tendance à surestimer les valeurs dans le cas de milieux sableux et elle n'est valable que pour des tronçons globalement homogènes (en pente et en granulométrie).

2.1.2. Calcul des forces tractrices

Les sédiments sont susceptibles d'être mis en mouvement sous l'action de forces hydrodynamiques appliquées par l'écoulement et compte tenu de leur propre poids. L'eau exerce naturellement une poussée perpendiculaire aux parois du chenal sur une section donnée dS lorsqu'elle est au repos (Figure 5-15) :

$$dP = p.dS$$

Où p représente la pression hydrostatique en un point y donné tel que : $p = \rho_w . y$, avec ρ_w la masse volumique de l'eau (1000 kg.m^{-3}). Lorsqu'un écoulement permanent est uniforme, l'eau exerce une force de frottement sur les parois du chenal notée (Figure 5-15) :

$$dF = \tau . dS$$

Où τ est la force tractrice (en N.m^{-2}) qui se définit comme étant la force de frottement (F) par unité de surface (S), et que l'on nomme aussi contrainte tangentielle à la paroi ou contrainte de cisaillement. En d'autres termes, la **force tractrice** correspond à la force disponible pour permettre le transport de sédiments. Elle est définie d'après les paramètres d'écoulement tel que :

$$\tau = \frac{\rho_w . g . V^2}{K^2 . H^{1/3}}$$

Avec H la hauteur d'eau (m) et g l'accélération de la pesanteur (9,81 m.s^{-2}.).

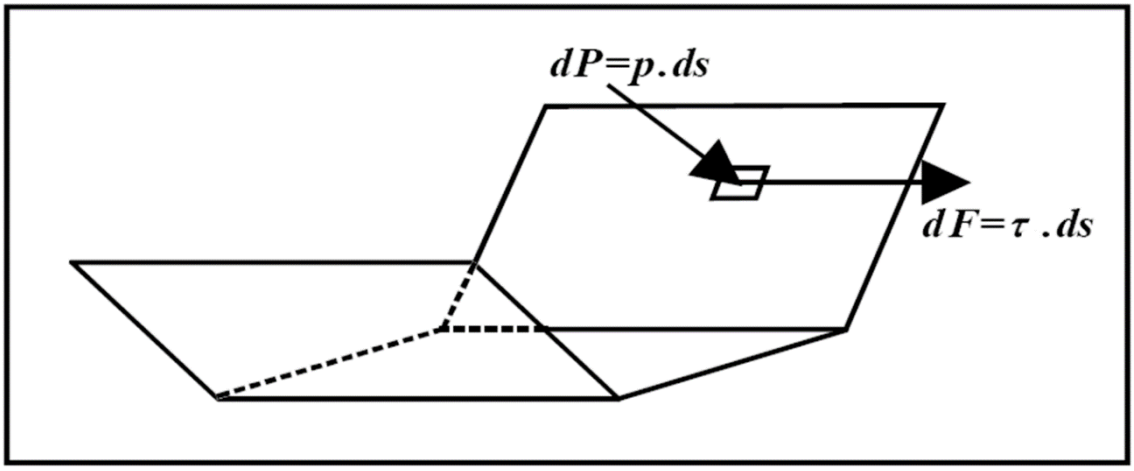


Figure 5-15 : Forces perpendiculaire (dP) et tangentielle (dF) appliquées par l'eau sur les parois du chenal (Degoutte, 2006)

Pour caractériser la mise en mouvement potentielle d'une particule non cohésive de diamètre D et de masse volumique ρ_s donnés il est donc nécessaire de considérer l'ensemble des forces qui s'exercent sur elle.

2.1.3. Détermination du nombre de Shields

Le transport solide a lieu lorsque la contrainte qui s'exerce sur le lit est capable de mettre en mouvement les sédiments, ce qui signifie que si les vitesses du fluide sont trop faibles, les particules ne sont pas mises en mouvement. Il existe donc un seuil en-deçà duquel les grains ne sont pas transportés. Shields (1936) a étudié la mise en mouvement de particules sableuses de tailles quasi-identiques dans un canal expérimental rectangulaire à fond plat et en a déduit le nombre de Shields θ correspondant au paramètre adimensionnel qui contrôle la stabilité des particules. Il correspond au rapport des forces de mise en mouvement (contrainte de fond) aux forces stabilisatrices (poids des matériaux dans l'eau) qui s'exercent sur le grain de diamètre D au fond du lit dans le cas d'un écoulement permanent.

Le **nombre de Shields** s'exprime donc sous la forme de la contrainte de cisaillement adimensionnée par le poids apparent des grains par unité de surface :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w) g . D}$$

Avec ρ_s la masse volumique du solide (en kg.m^{-3}) de la particule de diamètre D (en m). Afin de positionner ces valeurs de Shields par rapport à un seuil de mise en mouvement, il est nécessaire de calculer le nombre de Shields critique (θ_C), grâce à la courbe de Shields. Le nombre de Shields critique (θ_C) correspond à la valeur-seuil adimensionnelle du paramètre de Shields θ à partir de laquelle les particules d'un diamètre D donné sont mises en mouvement. Ainsi, si $\theta < \theta_C$, les particules restent immobiles, si $\theta > \theta_C$, les particules sont mises en mouvement. La difficulté réside dans la détermination de ce paramètre (que nous verrons plus en détails dans le paragraphe suivant). Le Shields critique dépend des conditions hydrauliques du fond du lit, de la taille des particules et de l'agencement des particules. Shields (1936) a montré que la relation entre le nombre de Shields et le **nombre de Reynolds particulaire** (Re^*) permettait de déterminer l'entraînement des particules. Le nombre de Reynolds décrit le frottement et la friction qui s'exercent sur les sédiments d'un diamètre D donné. Il est principalement contrôlé par la taille des sédiments et la pente :

$$Re^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_w}} . \frac{D}{\nu}$$

Où ν est la viscosité cinématique de l'eau (1.10^{-6} m^2/s). Shields (1936) a déduit la valeur du Shields critique à 0,06. Yalin (1977) a reformulé les résultats de Shields en fonction du **diamètre sédimentologique** (d^*) dans le but d'établir une relation faisant uniquement intervenir des grandeurs caractéristiques des grains et du fluide qui ne dépendent pas de la vitesse d'écoulement. Appliquée en sédimentologie ou en hydrologie, la relation de Yalin (1977) est alors plus fonctionnelle que celle de Shields (1936), qui fait intervenir la force tractrice τ à la fois en abscisse et en ordonnée. Le diagramme de Shields-Yalin (Figure 5-16) permet de prédire la mise en mouvement d'une particule en fonction de sa taille. Il représente la courbe critique séparant la stabilité des grains du mouvement particulaire.

$$d^* = D \left(g . \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w . \nu^2} \right)^{1/3}$$

Le coefficient de Strickler est souvent surestimé en raison des incertitudes des mesures réalisées sur la géométrie et la granulométrie du lit et parce qu'elle ne tient pas compte de la rugosité des grains. Par conséquent, le nombre de Shields est bien souvent surestimé. Quelques corrections peuvent donc être apportées au nombre de Shields afin de pallier à cette difficulté.

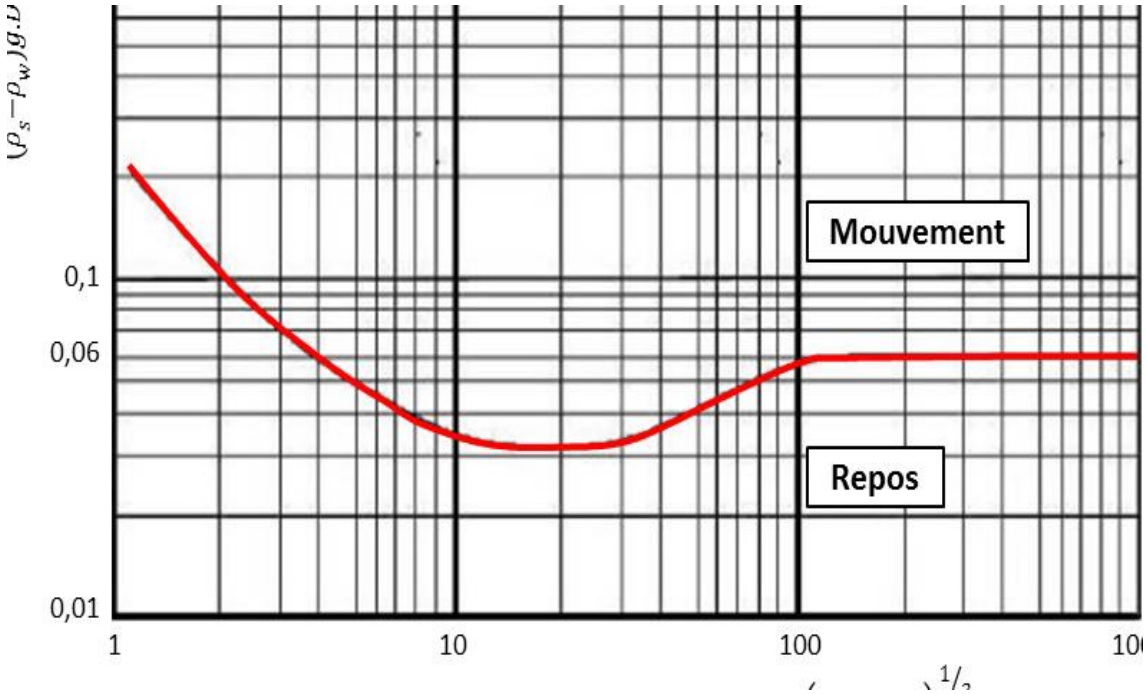


Figure 5-16 : Diagramme de Shields-Yalin représentant la mise en mouvement des particules uniformes : évolution du paramètre de Shields (adimensionnel) en fonction du diamètre sédimentologique (en m). Modifié d'après Degoutte (2006) et Grosprêtre (2011)

Shields de peau

Le Shields de peau n'utilise pas la rugosité de peau. Il tient néanmoins compte du **coefficient de frottement** f :

$$f = 2\left(\frac{\kappa}{1 + log\left(\frac{D_{90}}{15h}\right)}\right)^2$$

Avec κ la constante de Von Karman telle que $\kappa = 0{,}41$ et h la **hauteur d'eau normale** définie par :

$$h = \left(\frac{Q}{BK\sqrt{i}}\right)^{3/5}$$

Avec B la largeur du chenal, K le coefficient de Strickler et i la pente. Le **Shields de peau** θ_s s'exprime en fonction de la vitesse de l'écoulement V et de la granulométrie D_{50} :

$$\theta_s = \frac{0{,}5fV^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) gD_{50}}$$

Shields efficace

L'équation de Meyer-Peter et Müller (1948) intègre une correction de la contrainte à partir du ratio entre le coefficient de Strickler K (rugosité totale du lit) et le Strickler de peau K_S (rugosité des grains).

Le nombre de Shields calculé correspond au **Shields efficace** θ_{eff} :

$$\theta_{eff} = \theta \left(\frac{K}{K_s}\right)^{1,5}$$

Le nombre de Shields retenu tient compte de ces corrections. Nous le nommerons **Shields rectifié** (θ_R). Il correspond à la valeur maximale entre le Shields de peau et le Shields efficace :

$$\theta_R = \max(\theta_s; \theta_{eff})$$

2.1.4. Choix du Shields critique

Buffington & Montgomery (1997) ont étudié des données de début de charriage (expérimentales et de terrain) sur 80 ans pour des rivières à charge graveleuse. Ils ont tout d'abord souligné la difficulté de caractériser le seuil de mise en mouvement de la charge de fond en évoquant parfois de larges gammes de valeurs seuils définies selon certains auteurs. Ils ont ensuite montré que ces données suivaient globalement la forme de la courbe de Shields mais étaient malgré tout assez dispersées, entre 0,052 et 0,086 pour des écoulements turbulents rugueux (nombre de Reynolds $Re*$ élevé) et entre 0,03 et 0,073 pour une rugosité faible. Cette étude pose la question de la pertinence de l'unicité du seuil de début de transport solide. Aussi définirons-nous une gamme de Shields critique en utilisant plusieurs équations de la littérature. Face à un nombre important de formules tenant chacune compte de paramètres différents (pente, étendue granulométrique…) et établies à l'aide de données de laboratoire ou de terrain, le choix s'est porté sur les formules les plus représentatives du contexte Rhodanien, mêlant les deux conditions expérimentales. Les équations validées pour des lits sableux ou de torrents de montagne sont exclues. En outre, les formules variant avec la vitesse d'écoulement ou la hauteur d'eau n'ont pas été retenues, telle celle de Parker et al. (2003), qui utilise le nombre de Reynolds, dépendant de la force tractrice τ, et qui varie donc avec le débit.

L'étude du transport solide nécessite de déterminer la distribution granulométrique la plus représentative des conditions de rugosité permettant de calculer un Shields critique valide. Cette question est primordiale puisque l'ajustement des modèles de débits solides nécessite la caractérisation des conditions critiques de mise en mouvement (Grosprêtre, 2011). En outre, la question qui revient souvent dans la littérature est la pertinence de l'utilisation du D_{84} pour certains auteurs plutôt que du D_{50}. Dans la réalité, les deux options se défendent.

Considérer le transport de la charge de fond revient généralement, selon certains auteurs, à se focaliser sur la granulométrie de subsurface plutôt que sur les données de surface (Milhous, 1973 ; Parker et al., 1982 ; Parker et Klingeman, 1982). Seulement, la mobilité du lit dépend plus du potentiel de départ des particules de surface que celui des particules de subsurface (Milhous, 1973 ; Bathurst et al., 1987 ; Buffington et Montgomery, 1997 ; Batalla et Martin-Vide, 2001), si l'on considère le rôle du pavage du fond (Bravard et Petit, 1997 ; Whiting et King, 2003 ; Rollet, 2007). D'après Wilcock et Southard (1988) et Wilcock (1993), le transport d'une masse de sédiments hétérogènes, dans le cas d'une mobilité équivalente d'entraînement (mise en mouvement de toutes les tailles de particules pour une même force tractrice), dépend de sa taille moyenne. En somme, la définition d'une taille de référence permettrait de déterminer une force tractrice critique entraînant la mise en mouvement de l'ensemble des fractions granulométriques du fond. A partir du moment où la granulométrie du lit n'a pas une

étendue significativement forte, il devient possible d'estimer le transport global à partir du diagramme de Shields (1936) appliqué au D_{50} de subsurface (Wilcock, 1992 ; Wilcock et al., 2009).

A l'inverse, la variabilité des Shields critiques associés aux D_{50} a montré une forte dispersion par rapport aux valeurs estimées à partir du diagramme de Shields-Yalin (Buffington et Montgomery, 1997 ; Sarker et al., 2006 ; Patel et al., 2009). Ce phénomène s'explique par le fait que les valeurs de Shields critiques estimées pour les diamètres médians de subsurface sont systématiquement plus élevées que les valeurs basées sur les particules de surface, conséquence du processus de pavage (Buffington et Montgomery, 1997). Ainsi, selon certains auteurs, les diamètres des particules les plus grossières tels que le D_{84} ou le D_{90} sont les plus représentatifs de la rugosité d'un lit à fond graveleux naturel car ce percentile représente une large partie de la granulométrie, comme si elle était bien classée (Limerinos, 1970; Gomez, 1993; Lenzi et al., 2006). Lorsque les conditions de rugosité ne sont pas uniformes dans la masse, la progression de la couche rugueuse est alors essentiellement contrôlée par les plus gros éléments imbriqués dans le lit (White, 1940 ; Nowell and Church, 1979), ce qui revient à dire que la mesure des diamètres des particules les plus grosses est plus appropriée pour estimer le rayon hydraulique dans les écoulements turbulents (Recking et al., 2008).

En définitive, sept formules de Shields critique utilisant le D_{50} et trois le D_{84}, adaptées à des fonds graveleux, ont été choisies pour avoir un éventail de seuils de mise en mouvement tenant compte de l'influence de l'étendue granulométrique et/ou de la pente. Cette étendue de valeurs critiques permettra de déterminer un nombre de Shields critique minimal et maximal, avec une zone d'incertitude comprise entre les deux valeurs extrêmes en considérant les D_{50} d'une part, représentatifs de la granulométrie de la masse, i.e. en subsurface, et les D_{84} d'autre part, représentatifs de la granulométrie de surface et potentiellement du pavage. Ces formules sont décrites dans les deux paragraphes suivants.

2.1.4.1. Seuils critiques de transport solide associés aux D_{50}

Valeurs Shields critiques constantes

A l'origine, le seuil de mise en mouvement, tel qu'établi par **Shields (1936)**, devient quasi constant pour une valeur proche de 0,06 dans le cas de lits à graviers (> 4 mm) montrant un écoulement turbulent rugueux (Re^*>500).

Plusieurs études ont depuis contredit cette formulation, et de nombreux auteurs ont élargi l'utilisation des paramètres physiques pour élaborer des équations du Shields critique au plus près des conditions de mesure.

Le Shields critique déterminé par **Neill (1968)** présente une valeur de 0,03 sur des lits expérimentaux uniformes grossiers (sablo-graveleux) (d'après Carson et Griffiths, 1987 ; Grosprêtre, 2011). **Parker (1979)** et **Parker et al (2007)** confirment une valeur de 0,03 pour le Shields critique dans des conditions de débits de pleins bords dans des lits à graviers à faible gradient, définies à partir de la géométrie hydraulique. De plus, lorsque le nombre de Reynolds est élevé (fortes turbulences), l'équation du paramètre critique de Parker et al. (2003) tend vers 0,03. Cette valeur a été bien identifiée par **Meyer-Peter et Müller (1948),** qui établissent une gamme de Shields critiques compris entre 0,03 et 0,05, et préconisent une valeur de 0,03 dans le cas du début de mise en mouvement des particules. **Recking (2009)** remet en doute cette valeur de 0,03, considérée comme plus adaptée aux fonds sableux et aux pentes faibles, et recommande un paramètre critique de 0,045 pour des lits à graviers.

Formule de Soulsby et Whitehouse (1997)

Adaptée en milieux côtiers et marins où l'action des vagues et des écoulements favorise le dépassement du seuil critique, la formulation du seuil critique de Soulsby et Whitehouse (1997) a été ajustée à la traditionnelle courbe de Shields (1936) dessinée à la main pour le seuil de la contrainte de cisaillement. Une correction a été appliquée afin que la courbe soit plus adaptée aux données expérimentales pour la mise en mouvement des particules fines. Cette formule a été testée sur une large gamme de données, non seulement pour le cas des écoulements fluviaux mais aussi de vagues/houle et d'écoulements et houle combinés. L'autre particularité est qu'elle prolonge le raisonnement sur la pente d'un lit horizontal sur les trois dimensions en prenant en compte l'effet des pentes longitudinales et latérales sur le seuil de la contrainte de cisaillement. En définitif, cette formule permet de prédire le seuil de mise en mouvement des sables et des graviers en milieu côtier influencé par la houle/les vagues et l'écoulement fluvial et ce, à n'importe quelle pente. L'usage de cette formule doit être fait avec précaution, car bien qu'adaptée aux graviers, elle semble trouver ses limites lorsqu'il s'agit de matériaux beaucoup plus grossiers.

$$\theta_{C50} = \frac{0{,}24}{d^*} + 0{,}055 \times \left(1 - e^{-0{,}02d^*}\right)$$

Formule de Mueller et al. (2005)

Mueller et al. (2005) ont démontré que la distribution granulométrique influait sur les conditions de mise en mouvement. Ils ont établi une formule à partir de données de 45 cours d'eau à graviers, dans des conditions de débits compris entre 1 et 2600 m^3/s, de pentes entre 0,0003 et 0,05, des D_{50} de surface allant de 27 à 210 mm et des D_{84} compris entre 74 et 1008 mm :

$$\theta_{C50} = 0{,}0086 \left(\frac{D_{50}}{D_{90}}\right)^{-1{,}57}$$

Formule de Recking et al. (2008)

La valeur du Shields critique est considérée par une large partie de la communauté scientifique comme constante pour les écoulements turbulents rugueux, même si les résultats démontrent une variation de ce paramètre avec la pente (Recking, 2008). Cette formule, établie à partir de données de laboratoire et de terrain, et validée pour des pentes comprises entre 0,1 et 9 % et un D_{50} de 2,3-12,5 mm (qui reste malgré tout faible par rapport à la granulométrie du Rhône), a l'avantage d'être proche des conditions de début de mise en mouvement :

$$\theta_{C50} = 0{,}13 \times i^{0{,}24}$$

2.1.4.2. Seuils critiques de transport solide associés aux D_{84}

Formule de Parker et Klingeman (1982)

Partant du principe que la distribution granulométrique de subsurface est la plus représentative de la charge de fond en transit, Parker et Klingeman (1982) ont été les premiers à établir une relation de la forme $\theta_{Ci} = \theta_{C50} \left(\frac{D_i}{D_{50}}\right)^b$, qui s'est démocratisée par la suite.

Les valeurs du Shields critique associé au diamètre médian θ_{C50} et du paramètre b ont été déterminées à partir des données de terrain et pour un D_{50} de surface de 54 mm :

$$\theta_{C84} = 0{,}035 \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{-0{,}94}$$

Formule de Church et Hassan (2002)

Cette équation a été établie à partir d'une rivière à graviers dont la distribution granulométrique est sensiblement bimodale et le lit relativement stable. Ici, la formule utilise un θ_{C50} de 0,044 lorsqu'on considère un D_{50} de surface. En effet, nous avions voulu échantillonner le lit du Rhône dans la masse, mais en réalité, la distribution granulométrique mesurée correspond davantage à celle de la surface que de la subsurface puisque nous ne maîtrisons pas la profondeur d'enfoncement de la drague dans le lit et que nous avons réalisé en parallèle plusieurs comptages de surface selon la méthode Wolman (1954). Les paramètres de cette équation ont été validés à partir de données de terrain considérant un D_{50} de surface de 68 mm, un D_{50} de subsurface de 20 mm et une pente de 0.013 (m/m) :

$$\theta_{C84} = 0{,}044 \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{-0{,}75}$$

Formule de Recking (2009)

La distribution granulométrique n'est pas le seul facteur limitant pour calculer la valeur du Shields critique, la pente constitue un paramètre non négligeable. Ce modèle, établi sur des données de terrain et de laboratoire dont les D_{50} sont compris entre 0,5 et 130 mm et les pentes varient entre 0,0005 et 0,36, s'efforce de mettre en lien le Shields critique avec les effets de la pente et l'étendue granulométrique :

$$\theta_{C84} = (1{,}32i + 0{,}037) \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{-0{,}93}$$

2.2. Estimation des débits solides

Le transport solide a un rôle morphogène important, il correspond au charriage des sédiments grossiers par les cours d'eaux principalement lors des crues. Il est possible de quantifier la capacité de transport du cours d'eau en calculant le débit solide unitaire q_s, c'est-à-dire le débit solide volumique de charriage par unité de largeur (en $m^2.s^{-1}$), qui doit-être rapporté à la largeur active du chenal Ba (en m) pour estimer le débit solide sur une section Q_s (en $m^3.s^{-1}$) :

$$Q_s = q_s \times Ba$$

Ce flux peut être estimé à partir d'une des nombreuses formules de transport, établies pour la plupart pour des conditions hydrauliques particulières. L'avantage de ces équations est que leur résolution nécessite finalement peu de connaissances du matériau étudié. Comme pour le choix des Shields critiques dans le paragraphe précédent, les formules retenues sont celles dont le domaine de validité se rapproche le plus des conditions du Rhône, déterminées à partir de données de laboratoire et de terrain. Ces formules ont été sélectionnées sur la base du travail de nombreux auteurs, qui les ont recensées et ont comparé leurs caractéristiques (Degoutte, 2006 ; Recking, 2010 ; Recking et al., 2010 ; Malavoi et

al., 2011). Les autres formules uniquement citées et non utilisées dans la suite de l'analyse ne seront pas davantage détaillées.

Ces formules peuvent tenir compte de la contrainte, c'est-à-dire du dépassement du Shields critique, en partant du principe que le transport solide est un phénomène à seuil (Recking et al., 2010 ; Malavoi et al., 2011). La formule de **Meyer-Peter et Müller (1948)**, établie en laboratoire, donne la capacité de transport solide par charriage par rapport à une valeur de Shields critique de 0,047, pour des sédiments de taille uniforme, des D_{50} compris entre 0,4 et 29 mm, un écoulement uniforme et une pente comprise entre 0,4 et 2,4%. Cette formule permet le calcul du transport des graviers sur des lits totalement à graviers, donc uniquement adapté au charriage (Figure 5-17) :

$$q_s = 8\sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \times \left(\left(\frac{K}{K_s}\right)^{3/2} .\theta - 0{,}047\right)^{3/2}$$

$$s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

Cette équation intègre, au sein de la contrainte, la correction de la rugosité (coefficient de Strickler) vue plus haut, qui implique le rapport entre la rugosité de l'écoulement et celle du grain.

Parker (1979) établit une formule validée à partir de données de laboratoire et de terrain, applicable aux lits à graviers et utilisant un Shields critique de 0,03. L'avantage de cette condition limite est qu'elle permet de calculer le transport de la charge de fond d'un lit qui reste malgré tout stable :

$$q_s = 11{,}2\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}\,\frac{(\theta - 0{,}03)^{4{,}5}}{\theta^3}$$

Ces deux dernières équations ont largement été utilisées, leur application est facilitée par le fait qu'elles ne s'appuient que sur quelques caractéristiques granulométriques et l'emploi d'un Shields critique constant qui ne demande donc pas d'itération (Recking, 2010). De nombreuses autres formules tiennent compte de cette contrainte mais ne conviennent pas au Rhône. C'est le cas pour la formulation de Smart et Jaeggi (1983), de Recking et al. (2008) ou de Mizuyama (1977), établies à partir de données de laboratoire et adaptées aux rivières de montagne ou aux pentes fortes (respectivement 3-20 %, 0,1-20 %, valeurs inconnues) et pour des granulométries comprises respectivement entre 2 et 10,5 mm, entre 0,4 et 44 mm et une granulométrie inconnue. De même, les formules d'Engelund et Hansen (1967), d'Ackers et White (1973), de Van Rijn (1984) ou de Camenen et Larson (2005), ont été établies aussi en laboratoire mais pour des lits sableux (Figure 5-17) et de faibles pentes, la dernière étant adaptée aux milieux côtiers.

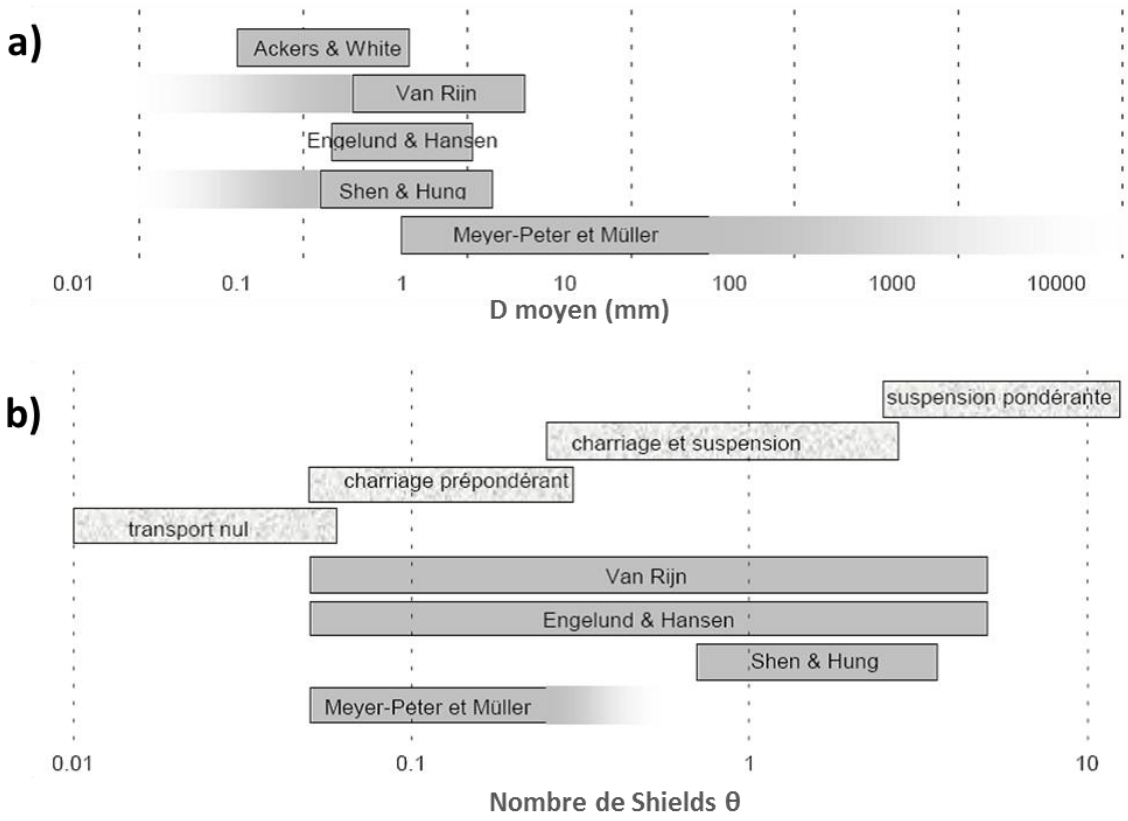


Figure 5-17 : Comparaison des domaines de validité des différentes formules de transport en fonction de (a) la granulométrie moyenne des sédiments et de (b) la contrainte (paramètre de Shields θ). D'après Belleudy (2001)

D'autres formules de transport solide ont été établies en calculant le débit solide directement à partir du débit liquide total (Q) ou unitaire (q) afin d'éviter le calcul de la contrainte (Recking et al., 2010 ; Malavoi et al., 2011). Nous retiendrons la formule de **Schoklitsch (1962)**, ajustée à partir de données à la fois de terrain et de laboratoire pour des pentes inférieures à 1%. D'après Bathurst (2007), ce calcul a été établi à l'origine pour le D_{40} de la couche de subsurface mais est généralement utilisé avec le D_{50} pour évaluer le transport en surface (Recking et al., 2010 ; Malavoi et al., 2011). Nous garderons la valeur de D_{50} puisque les prélèvements dans le lit du Rhône réalisés à la drague ont permis d'échantillonner à la fois en surface et subsurface.

$$q_s = \frac{2{,}5}{(\rho_s/\rho)}(q - q_{cr})i^{3/2}$$

Avec q le débit liquide unitaire ($m^2.s^{-1}$) et q_{cr} le débit unitaire critique tel que :

$$q_{cr} = 0{,}26\frac{D_{50}^{3/2}}{i^{7/6}}(s-1)^{5/3}$$

Les formules de Rickenmann (1991), SOGREAH (1991) et Lefort (2007) font aussi appel au débit mais leur domaine de validité (pente et diamètre des grains) ne convient pas aux données du Rhône avec un diamètre trop faible (0,4 à 10 mm) pour la première, et des pentes trop fortes pour les deux dernières (comprises entre 0,25 et 20%).

Il existe d'autres modèles de transport basés sur la puissance de l'écoulement qui complexifient les calculs par l'utilisation de paramètres hydrauliques, par exemple la formule de Bagnold (1980), de

Yang (1984) et de Brown (1950), qui a établi son équation à partir du lissage de l'abaque d'Einstein (1950). Elles reposent toutes sur des données de laboratoire. Cependant, elles ne seront pas utilisées dans cette analyse puisque leur domaine de validité n'est pas adapté à notre site d'étude, dont le D_{50} est globalement compris entre 0,3 et 29 mm.

Toutes ces formules ont des limites d'utilisation, identifiées par Recking et al. (2010), telles qu'une pente inférieure à 1%, un D_{50} inférieur à 20 mm et un ratio de contrainte θ/θ_c supérieur à 2. Afin de remédier à ces limites, Recking (2010) a élaboré un nouveau modèle. Dans un premier temps il a tenu compte de la complexité du transport pour le cas d'une granulométrie étendue, ainsi que du pavage de surface et du tri vertical en utilisant la mobilité du D_{84} de surface comme repère des faibles taux de transport. Le Shields critique utilisé dans cette équation (Recking, 2009), associé au D_{84} et donc au nombre de Shields θ_{84}, tient compte de la variation de la granulométrie avec celle de la pente :

$$\theta_{C84} = (1{,}32i + 0{,}037)\left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{-0{,}93}$$

La formule de transport solide de Recking (2010) comporte une condition limite L :

$$L = 12{,}53\theta_{C84}^{1{,}605} \times \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{4{,}445\sqrt{i}}$$

Soit une formule qui diffère selon la valeur du nombre de Shields pour D_{84} :

$$Si\ \theta_{84} < L : \qquad q_s = 0.0005\left(\frac{\theta_{84}}{\theta_{C84}}\right)^{6{,}5} \times \sqrt{g(s-1)D_{84}^3}\left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{-18\sqrt{i}}$$

$$Si\ \theta_{84} > L : \qquad q_s = 14\theta_{84}^{2{,}45} \times \sqrt{g(s-1)D_{84}^3}$$

L'inconvénient des modèles basés sur la contrainte est qu'ils nécessitent de déterminer précisément le rayon hydraulique R (ou hauteur d'eau, utilisée pour calculer le nombre de Shields), qui résulte de la résistance du lit à l'écoulement, à un débit et une pente donnés. Le risque tient à la surestimation de la contrainte du fond et ainsi du débit solide. Si ce paramètre comporte des incertitudes, il est possible d'appliquer la correction de Hey (1979), qui nécessite un calcul itératif. Néanmoins, on peut admettre que la caractérisation des paramètres hydrauliques faite à partir de la modélisation de l'écoulement est valide à condition de respecter la géométrie de la section étudiée et de simuler des lignes d'eau par l'intermédiaire d'un algorithme stable. Le modèle hydraulique MAGE, utilisé dans la suite de l'étude et considéré comme stable, nous exempte de la correction de Hey (1979).

Il est important de garder un regard critique sur la multitude d'équations à partir desquelles le charriage peut être prédit et quantifié. Ces équations, établies à partir de données de terrain ou de laboratoire (canal expérimental), ont souvent fait l'objet de corrections concernant le rapport entre le nombre de Shields et sa valeur critique, en tenant compte de la rugosité, de la pente ou encore de l'étendue granulométrique. Pour valider son modèle, Recking (2010) a comparé le débit solide unitaire calculé à celui mesuré sur des données de terrain (6319 valeurs provenant de 84 tronçons de cours d'eau) et de laboratoire (1317 données issues d'expérimentation en canal artificiel). La Figure 5-18 compare les débits calculés et mesurés à partir de données de terrain. Elle montre que l'équation de Schoklitsch (1962) surestime le transport, que celle de Parker (1979) donne des résultats très étalés et que la formule de Meyer-Peter et Müller (1948) oscille autour d'un équilibre avec quelques sur- et sous-estimations. Les débits solides calculés avec la formule de Recking (2010) sont quasi équivalents

aux débits solides mesurés sur le terrain. Cette dernière semble plus robuste que les trois autres du fait qu'elle ne montre pas de valeurs de prédiction nulles lorsqu'un transport est mesuré.

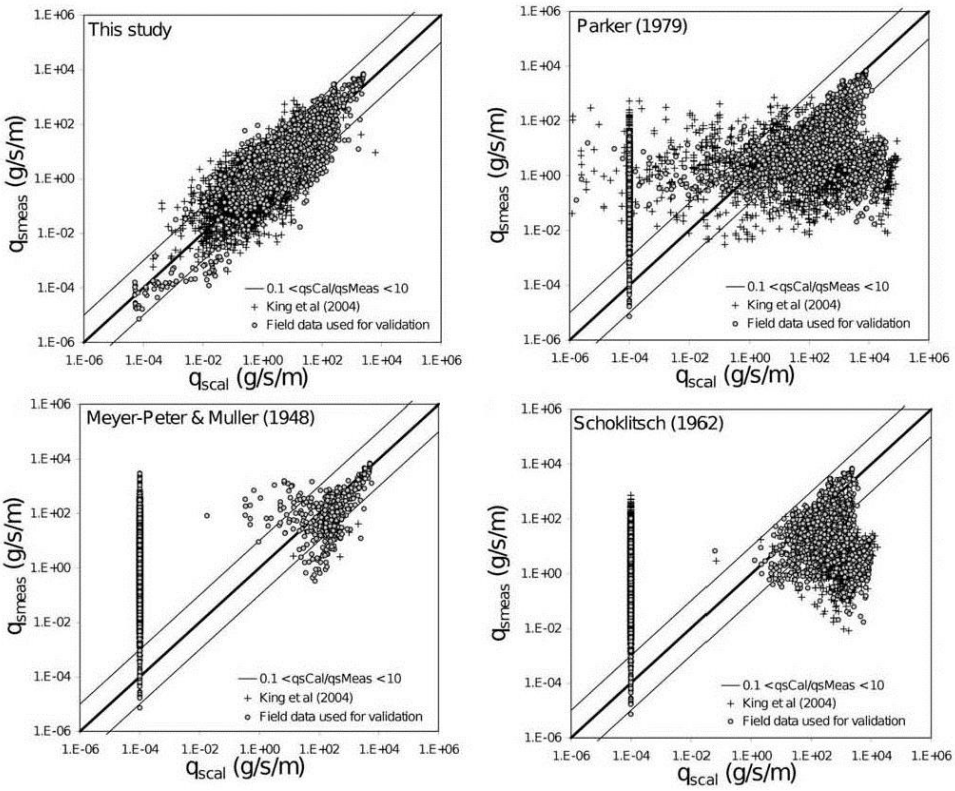


Figure 5-18 : Comparaison entre le charriage calculé et mesuré pour la totalité des données de terrain (6319 valeurs) à partir de la formulation de Recking (2010) (This study), de Parker (1979), de Meyer-Peter et Müller (1948) et de Schoklitsch (1962). Les valeurs tracées parallèlement à l'axe des ordonnées correspondent à des prédictions nulles (calculées) pour un transport solide mesuré non nul. Les lignes parallèles à la tangente d'égalité entre les valeurs calculées et mesurées correspondent à un écart à cette tangente de : $0.1 < r = qs_{calculé}/qs_{mesuré} < 10$ (Recking, 2010)

C'est ce que confirme la Figure 5-19-a, qui compare tous les résultats obtenus à partir de différentes équations de transport solide sur les données de terrain. Elle met en évidence une forte amélioration de la formulation de Recking (2010) sur les prédictions de charriage par rapport à 15 formules sélectionnées par Recking et al. (2010), qui avaient un intérêt historique ou local : Ackers et White (1973), Bagnold (1980), Einstein (1950) et Brown (1950), Engelund et Hansen (1967), Lefort (2007), Mizuyama (1977), Meyer-Peter et Müller ou MPM (1948), Parker (1979), Recking et al. (2008), Rickenmann (1990), Schoklitsch (1962), Smart et Jaeggi (1983), Van Rijin (1984), Yang (1984) et Lefort (1991). C'est à partir de cette formulation que les débits solides du Rhône ont été estimés dans l'Etude Globale Rhône. Par ailleurs, notons que l'équation de Lefort (1991) obtient un très mauvais résultat sur les mesures de terrain (validité à 8-25%), tandis que celle de Recking (2010) a été la plus largement validée avec un score de 35-82% (Figure 5-19-a). Recking et al. (2010) rappellent que pour les formules les plus anciennes principalement, les conditions d'établissement et domaine de validité sont parfois méconnus ou imprécis. D'autres tests (Figure 5-20) ont permis de montrer que l'équation de Recking (2010) était nettement plus robuste que les autres formules dans la mesure où elle n'était pas limitée par rapport à la pente (S), au diamètre (D) et à la contrainte, c'est-à-dire au dépassement du seuil critique (θ/θc). Là aussi, l'efficacité de la formule de Lefort (1991) ne semble pas confirmée au regard de l'ensemble des modèles. Des tests ont aussi été réalisés sur les mesures de laboratoire (Figure 5-19-b) et ont montré que les résultats obtenus à partir du modèle de Recking (2010) étaient

proches des autres résultats des modèles de la littérature cités précédemment (y compris celui de Lefort, 1991). L'équation de transport de Recking (2010) paraît être la plus adaptée pour estimer le débit solide. Néanmoins, l'application des modèles classiques de prédiction de Meyer-Peter et Müller (1948), de Parker (1979) et de Schoklitsch (1962) sur les données du Rhône permettra de comparer les résultats obtenus et de définir une marge d'incertitude.

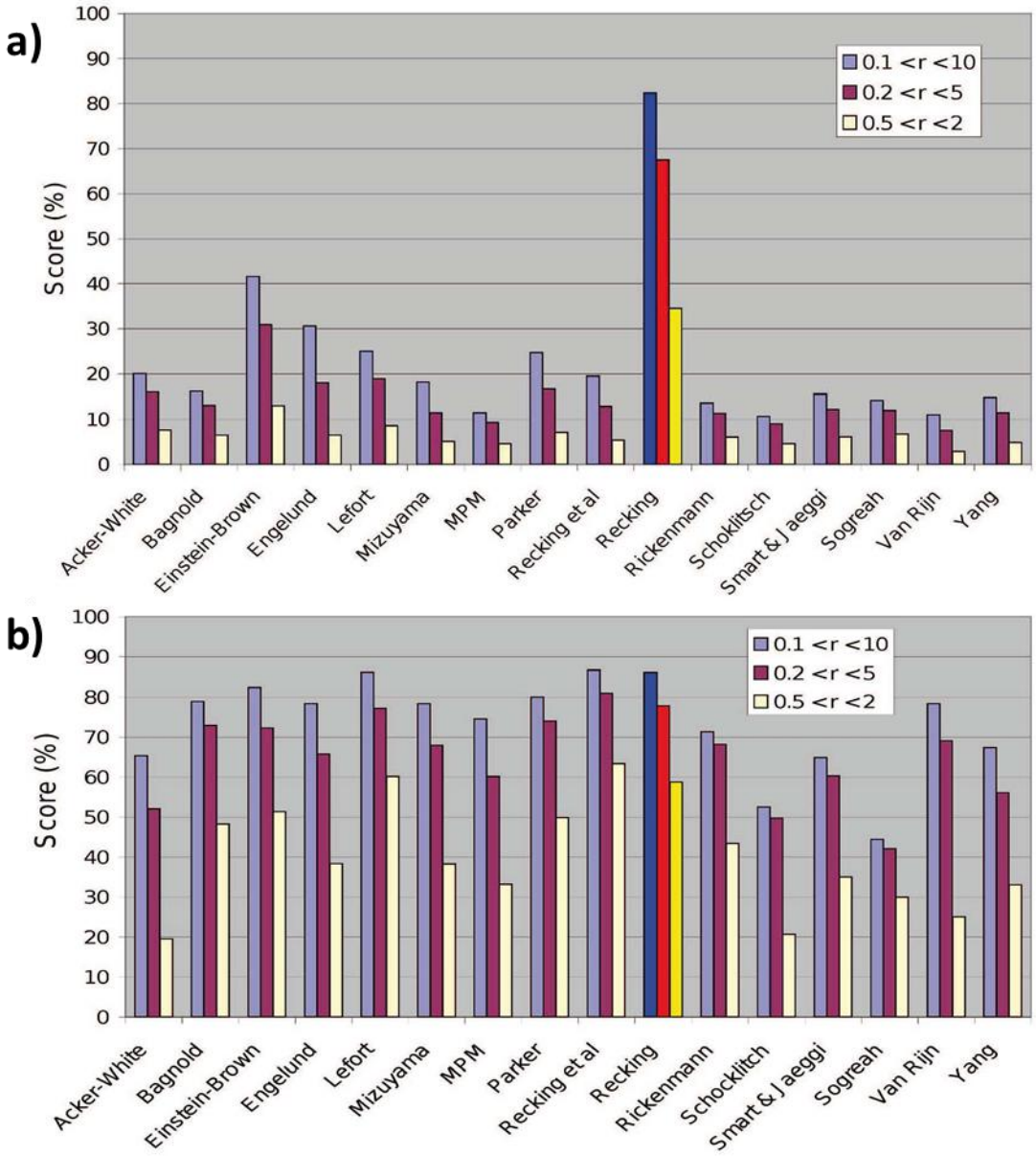


Figure 5-19 : Résultats valides (score) du calcul du transport solide ($r = qs_{calculé}/qs_{mesuré}$) sur les mesures instantanées de terrain (a) et sur les mesures de laboratoire (b) à partir de la formule de Recking (2010) en couleurs vives et 15 autres formules connues dans la littérature, dans l'ordre : Ackers et White (1973), Bagnold (1980), Einstein (1950) et Brown (1950), Engelund et Hansen (1967), Lefort (2007), Mizuyama (1977), Meyer-Peter et Müller ou MPM (1948), Parker (1979), Recking et al. (2008), Rickenmann (1990), Schoklitsch (1962), Smart et Jaeggi (1983), Lefort-SOGREAH (1991), Van Rijin (1984), Yang (1984). (Recking et al., 2010).

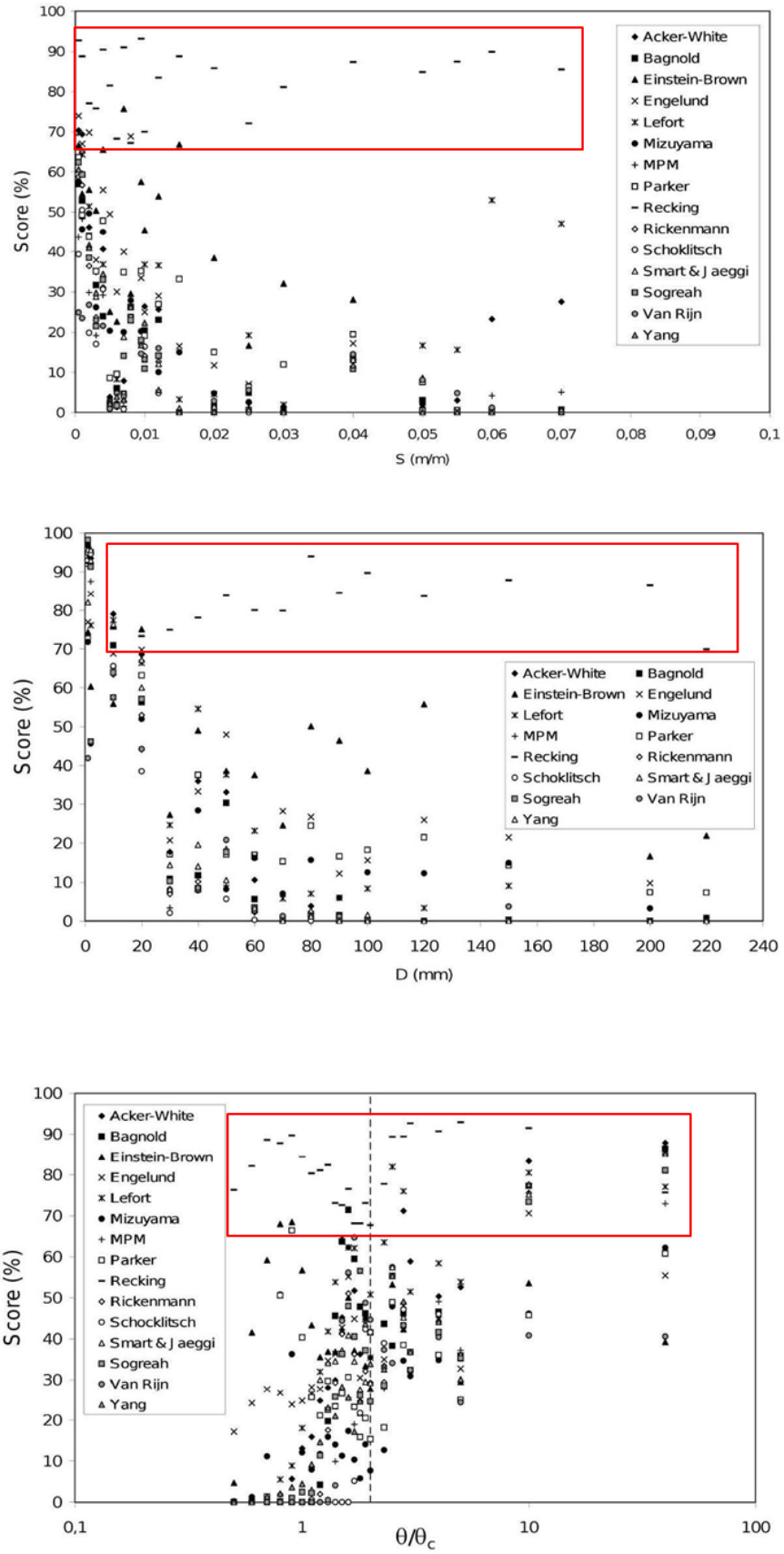


Figure 5-20 : Efficacité (résultats valides = score) de la formule de Recking (2010) (tirets dans les cadres rouges) et des autres équations, testées dans l'intervalle $0.1 < r < 10$, en fonction de la pente (S), du diamètre (D) et de la contrainte ($\theta/\theta c$). (Recking et al., 2010)

2.3. Matériels et méthodes

2.3.1. Données disponibles

L'étude du transport solide a été centrée sur les secteurs de Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon. Elle porte sur les débits de crues de période de retour de 2, 5, 10 et 100 ans et constitue les premiers jalons d'une étude plus ambitieuse permettant d'étudier le transport solide potentiel sur tout le cours du Rhône.

La BDT Rhône de l'IGN a permis de fournir les données de géométrie, celles-ci étant à la fois bathymétriques sous forme de profils en travers (correspondant au lit et à une partie des berges) et topographiques issues du Lidar (correspondant à l'extension vers le lit majeur).

Cette analyse fait aussi appel aux données granulométriques du lit, largement présentées dans le chapitre 4. Il n'est pas évident de définir la granulométrie dans un tronçon dit « homogène », car il règne en réalité des discontinuités sédimentaires. Par exemple, dans le cas du vieux Rhône de Pierre-Bénite, on peut passer d'un diamètre granulométrique médian de 74 mm à 17 mm en moins de 3 km sans évolution continue de la taille des grains entre ces points. Dans la retenue de Montélimar, le D_{50} passe de 119 mm à 0,16 mm en l'espace de 6 km (stockage des fines, témoignant de l'influence de la retenue sur les conditions hydro-sédimentaires). Etendre ces valeurs jusqu'à la moitié de la distance séparant deux prélèvements n'est pas cohérent hydro-morphologiquement : en l'absence de données granulométriques entre deux points (décroissance ? variation ?) et en raison de l'importante hétérogénéité que révèlent les échantillons du fond du Rhône (forte variabilité intra-échantillon), il ne semble pas logique d'interpoler les données granulométriques. De plus, les prélèvements n'ont pas été réalisés en un point donné mais couvrent une étendue de dragage d'une centaine de mètres au kilomètre.

La solution qui semble restituer le mieux la réalité est de considérer un D_{50} (et un D_{84}) médian par bief, c'est-à-dire en tenant compte du découpage vieux Rhône/Rhône total et de la présence des barrages, qui provoquent une rupture dans la continuité sédimentaire. Ce procédé permet d'estimer le spectre des valeurs du paramètre de Shields en représentant au mieux les D_{50} mesurés dans le bief et pour chaque valeur de débit. Chaque graphique, présentant les résultats de la modélisation, replace spatialement les valeurs réelles de D_{50} (et de D_{84}) pour mettre en évidence la variabilité locale à l'échelle du bief.

Biefs	D_{16} med (mm)	D_{50} med (mm)	D_{84} med (mm)	D_{90} med (mm)	Pente (m/m)
RT PB	17,50	21,63	61,73	73,40	4,00E-04
VR PB	16,80	46,23	75,47	84,00	1,50E-03
RT VS	41,53	59,80	85,50	93,63	3,60E-04
RT MO	32,52	59,41	79,89	83,59	1,23E-04
VR MO	54,18	83,78	112,39	118,01	4,73E-04
RT DM	69,50	91,42	117,52	123,58	7,68E-05
VR DM	22,11	47,92	77,66	85,67	5,12E-04
RT CA	43,22	63,03	109,78	139,44	5,37E-05

Tableau 5-3 : Données granulométriques et valeurs de pentes utilisées pour les calculs de transport solide

L'ensemble des données granulométriques médianes et des valeurs de pentes ont été regroupées dans le Tableau 5-3 pour les Rhône totaux (RT) et vieux Rhône (VR) de Pierre-Bénite (PB), Vaugris (VS), Montélimar (MO), Donzère-Mondragon (DM) et Caderousse (CA).

2.3.2. Le modèle hydraulique 1D MAGE

L'évaluation de la capacité de transport solide actuelle du Rhône nécessite l'utilisation de paramètres physiques précis et adaptés, comme évoqué dans les paragraphes précédents. Comme les paramètres hydrauliques sont difficiles à mesurer précisément sur le terrain, notamment en période de crue, les modèles numériques (ou physiques, plus précis mais plus coûteux en temps et financièrement) sont appropriés pour reproduire au mieux la réalité du terrain. La simulation numérique est alors réalisée à l'aide du modèle à surface libre MAGE, développé par l'IRSTEA de Lyon. MAGE est un modèle hydraulique 1D d'écoulement en rivière en régime transitoire, programmé en Fortran (norme 2008). Il est utilisé sur l'environnement de modélisation hydraulique PamHyre et se compose d'un solveur (le code MAGE) et d'une interface graphique qui permet de :

- construire un modèle numérique par la saisie des données et la définition des paramètres de calcul,
- d'interpoler les profils en travers nécessaires pour construire le maillage,
- de lancer le solveur et d'afficher les résultats sous différentes formes (Faure, 2013).

Le Guern (2013) a réalisé, lors de son stage au CEREGE, les premiers traitements à partir du modèle afin de calculer des lignes d'eau. Les données n'avaient pu être simulées qu'à partir de chroniques de débits hors crue car le modèle n'était pas en mesure de reproduire le débordement. Lorsque c'était le cas, il dressait comme des « murs verticaux » le long du chenal, prolongeant la hauteur des berges avec celle de la ligne d'eau jusqu'à l'infini, ce qui empêchait le débordement et entraînait la surestimation du niveau de l'eau. C'est pourquoi Violaine Dugué, ingénieure de recherche à l'IRSTEA, a travaillé à la correction des erreurs du modèle, notamment sur les secteurs de Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon. Néanmoins, le modèle ne laisse toujours pas déborder les sections en prolongeant le lit moyen.

2.3.2.1. Géométrie du modèle : le maillage

Le modèle du Rhône dans MAGE comporte le réseau du chenal depuis la frontière franco-suisse jusqu'au delta. Le réseau est composé de biefs, séparés par des nœuds, sur lesquels des profils bathymétriques et topographiques ont été définis. Le modèle tient compte de la géométrie réelle du lit, définie par des profils en travers, et utilise une modélisation géométrique en lit composé, c'est-à-dire mineur, moyen (majeur actif) et majeur de stockage, comprenant le calcul de la répartition des débits (Faure, 2013). Le maillage du modèle correspond à l'ensemble des points de calcul utilisés par MAGE. A la différence des réseaux simples et ramifiés, le réseau du Rhône est maillé (Figure 5-21) : il est composé de confluents et de défluents, ponctué par de nombreux barrages qui dirigent préférentiellement les écoulements dans le canal destiné à alimenter l'usine hydroélectrique. Les reliefs aussi peuvent être maillés : il est possible de définir des casiers et d'inclure les échanges entre les zones d'écoulement et de stockage, de représenter les îles qui agissent comme des défluents, ou encore les deltas qui présentent des conditions aval multiples (Faure, 2013). Ces possibilités présentent l'avantage d'augmenter considérablement la précision de la modélisation. MAGE permet ainsi la modélisation des secteurs court-circuités contrôlés par les barrages, des déversements en dehors du lit moyen ou vers un système de casiers, ou encore d'un secteur à conditions aval multiples comme le

delta. Le maillage, qui constitue la géométrie du chenal, a été calé grâce à l'interpolation des profils en travers issus de la BDT-Rhône selon un espacement défini par le modélisateur (Figure 5-22). V. Dugué a néanmoins apporté quelques corrections au maillage avant la simulation.

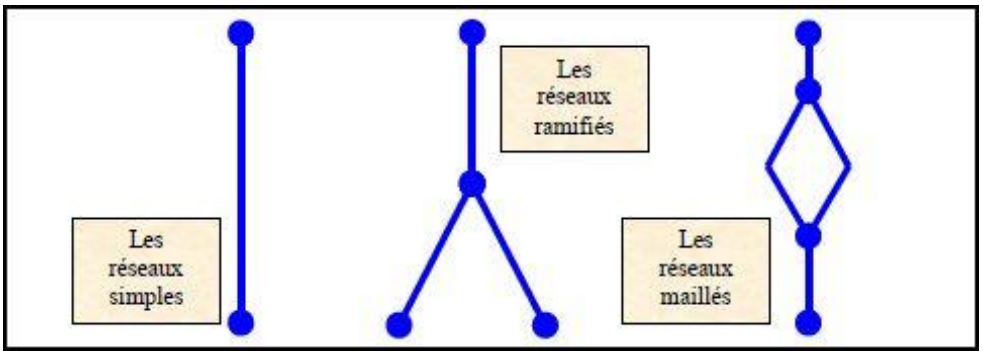


Figure 5-21 : Les trois types de réseaux modélisables par MAGE (Faure, 2013)

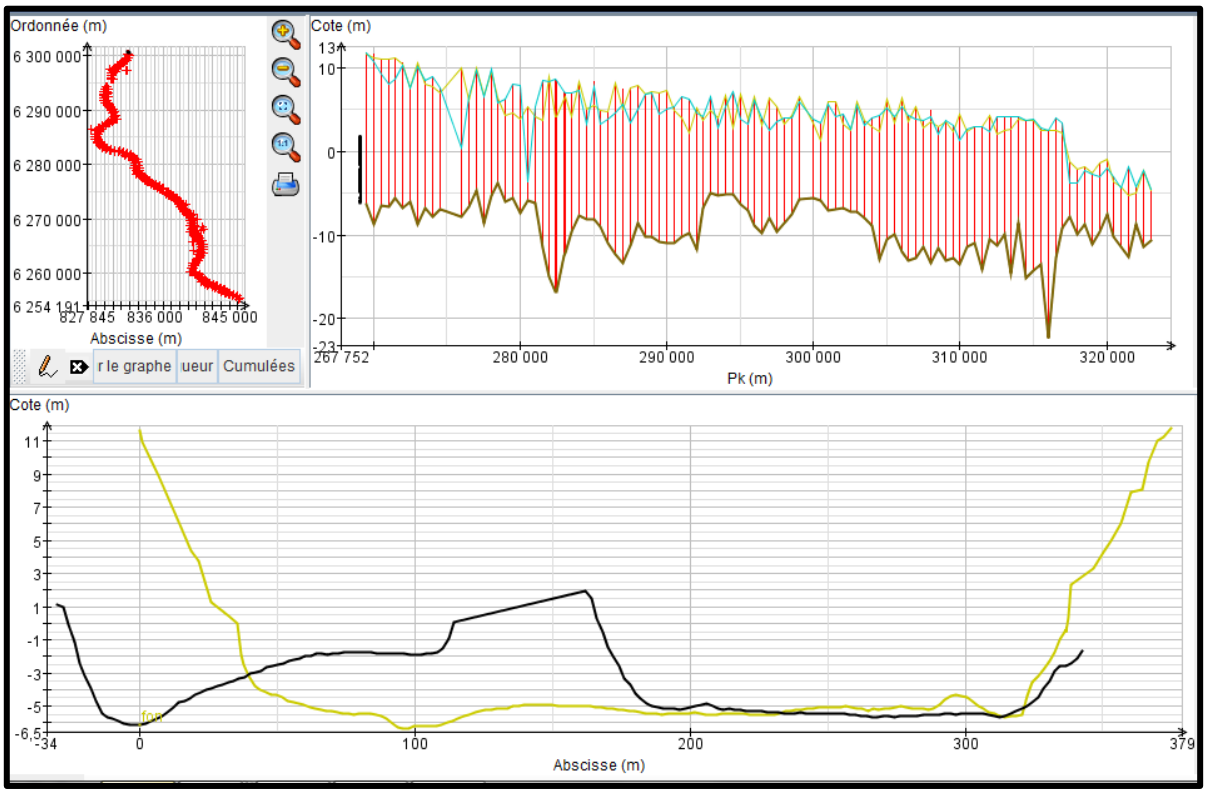


Figure 5-22 : Capture d'écran de l'interface du modèle MAGE : en haut à gauche, une vue en plan du bief avec ses coordonnées x et y en Lambert 93 ; en haut à droite, le profil en long du bief avec la ligne de fond, les lignes des berges et les profils géométriques du bief (rouge) ; en bas, la vue en coupe d'un des profils sélectionnés (noir=profil visualisé, jaune=profil au pk suivant). Le Guern (2013)

La modélisation du tronçon de Pierre-Bénite (PB) s'étend entre la confluence de la Saône et l'aval du barrage de Vaugris (VS) (Figure 5-23). Chaque bief est séparé par deux nœuds : le bief 1 [PRH-POR] correspond au Rhône total de PB, le bief 2 [POR-PIB] à la retenue de PB, le bief 3 [PIB-TRN] au vieux Rhône de PB, le bief 4 [PIB-TRN] au canal de PB, le bief 5 [TRN-VAU] au Rhône total de VS, le bief 6 [VAU-CHA] au Rhône total Péage de Roussillon. Les profils bathymétriques de la BDT-Rhône sont espacés de 500 m (Tableau 5-4) et l'interpolation entre les transects s'est faite tous les

50 m environ. Un casier d'une surface de 48,21 ha a été modélisé au Port de Lyon, ses parois étant considérées verticales.

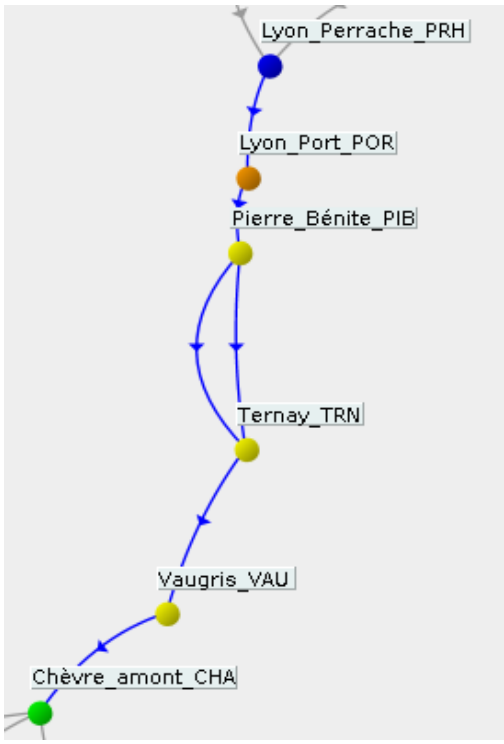


Figure 5-23 : Tronçon modélisé du secteur de Pierre-Bénite, entre le PK 0,4, confluence Saône/Rhône à Lyon, et le PK 33,8, aval du barrage de Vaugris/amont de la lône de la Chèvre. V. Dugué

La modélisation du tronçon de Donzère-Mondragon (DM) est comprise entre le début du Rhône total de Montélimar (MO) et le barrage de Sauveterre (Figure 5-24). Douze biefs ont été modélisés : le bief 1 [CCR-MTL] représentant le Rhône total de MO, le bief 2 [MTL-CH9] le vieux Rhône de MO, le bief 3 [MTL-CH9] le canal de MO, le bief 4 [CH9-DZR] le Rhône total de DM, le bief 5 [DZR-PSE] le vieux Rhône de DM jusqu'à l'Ardèche, le bief 6 [PSE-MDG] le vieux Rhône depuis l'Ardèche, le bief 7 [DZR-MDG] le canal de DM, le bief 8 [MDG-KDR] le Rhône total de Caderousse (CA), le bief 9 [KDR-RQM] le vieux Rhône de CA, le bief 10 [KDR-RQM] le canal de CA, le bief 11 [RQM-SVT] le Rhône total d'Avignon, le bief 12 [ARD-PSE] l'Ardèche. Les profils bathymétriques de la BDT-Rhône sont espacés de 500 m (Tableau 5-4) et l'interpolation entre les transects s'est faite tous les 100 m environ. Un modèle indépendant de l'Ardèche a été ajouté : 10 km de bief jusqu'au seuil de St Martin, où l'espacement des profils en travers est de 200 m en moyenne, et l'interpolation de 100 m.

L'établissement du maillage de chaque secteur a nécessité l'ajout de profils fictifs au niveau des confluences (affluents, restitutions…) et diffluences (tronçons court-circuités). Les profils en travers mesurés au niveau des barrages-usines sont souvent issus de jeux de données différents. La plupart des profils en travers ont été complétés sur les rives grâce aux données Lidar de la BDT-Rhône.

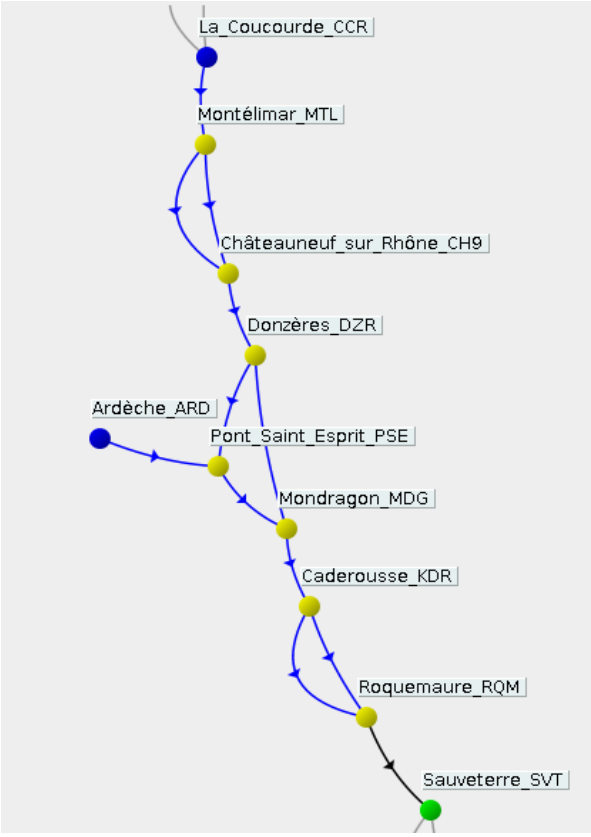


Figure 5-24 : Tronçon modélisé du secteur de Donzère-Mondragon, entre le PK 143,66, début du Rhône total de Montélimar, et le PK 229,8, au barrage de Sauveterre sur l'aménagement d'Avignon. V. Dugué

Cours d'eau	Secteur	Source des données	Année	Type de données	Espacement des profils en travers
Rhône	Confluence Rhône / Saône – Barrage PB	BDT Rhône	2006	Profils bathymétriques	500 m
Rhône	Vieux Rhône / Rhône aménagé de PB	BDT-Rhône	2006	Profils bathymétriques	500 m
Rhône	Ternay – Vaugris	BDT Rhône	2006	Profils bathy	500 m
Rhône	La Coucourde – MO	BDT Rhône	2008	Profils bathy	500 m
Rhône	Vieux Rhône de MO	BDT-Rhône	Amont : 2003	Profils bathy	500 m
Rhône	Rhône aménagé MO	BDT Rhône	2008	Profils bathy	500 m
Rhône	Montélimar - Donzère	BDT Rhône	2006	Profils bathy	500 m
Rhône	Vieux Rhône DM	BDT Rhône	31.07.2003	Profils bathy	500 m
Rhône	Rhône aménagé DM	BDT Rhône	Amont : 2004	Profils bathy	500 m
Rhône	DM – CA	BDT Rhône	2004-07	Profils bathy	500 m
Rhône	Vieux Rhône CA	BDT Rhône	2004	Profils bathy	500 m
Rhône	Rhône aménagé CA	BDT Rhône	2007 / 2000	Profils bathy	500 m
Rhône	Roquemaure – Sauveterre	BDT Rhône	2004	Profils bathy	500 m

Tableau 5-4 : Données topographiques utilisées pour le secteur de Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon

2.3.2.2. Calage du modèle par détermination du coefficient de Strickler

La définition des coefficients de rugosité, issus de la formule de Manning-Strickler, se fait à partir des valeurs moyennes pour le lit mineur (espace occupé par l'écoulement lors des crues fréquentes) et le lit moyen (espace moins fréquemment en eau que le lit mineur et dont la rugosité peut être différente du chenal du lit mineur) de chaque tronçon. Elle nécessite les données de ligne d'eau à différents débits en un point. A partir de la cote de la ligne d'eau pour un débit donné, il est possible de simuler le débit en question et d'en déduire les cotes obtenues sur chaque section. Si les cotes simulées sont différentes des cotes mesurées, c'est que le coefficient de Strickler nécessite d'être ajusté afin de faire correspondre les cotes de la ligne d'eau. Cette opération, communément appelée calage du modèle, se fait manuellement. Les données de lignes d'eau utilisées pour caler le modèle et le valider sur le secteur de Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon sont répertoriées dans le Tableau 5-5. Le modèle n'est pas calé en aval du barrage de Vaugris, et à l'aval du barrage et de l'usine de Caderousse à Donzère-Mondragon. Les lignes d'eau ont été calculées mais n'ont pas été vérifiées. Les résultats ne sont donc pas à prendre en compte sur ces biefs. Au niveau de Donzère-Mondragon, l'Ardèche a des débits très variés sur les différentes lignes d'eau utilisées pour le calage. L'ajout du tronçon de l'Ardèche au modèle permet d'avoir une simulation plus exacte des niveaux d'eau à l'amont de la confluence avec le Rhône et facilite le calage des lignes d'eau. Les résultats des valeurs des coefficients de Strickler ont été répertoriés dans le Tableau 5-6.

Tronçon	PK	Source	Date de la mesure et débits du Rhône
Bief de Pierre-Bénite	0,4 – 4,7 (amont barrage de Pierre-Bénite)	CNR	30/07/09 – 460 m^3/s
			17/08/10 – 1101 m^3/s
			09/12/10 – 2785 m^3/s
			05/01/12 – 2640 m^3/s
Bief de Vaugris avec Vieux Rhône de Pierre-Bénite	5,5 – 33,8 (barrage de Vaugris)	CNR	02/12/09 – 1496 m^3/s
			07/12/10 – 2681 m^3/s
			07/11/13 – 2994 m^3/s
Bief de Montélimar	143,66 – 152,9 (amont barrage de Montélimar) + 164,160 (Rhône aménagé jusqu'à l'amont usine de Chateauneuf)	CNR	11/07/02 – 772 m3/s
			07/03/03 – 1456 m3/s
			05/03/07 – 3660 m3/s
			30/05/07 – 1588 m3/s
			10/12/10 – 3423 m3/s
Bief de Donzère (Vieux Rhône Montélimar)	153,1 (Vieux Rhône aval barrage de Montélimar) – 187,2 (Rhône aménagé usine de Bollène)	CNR	10/08/04 – 755 m3/s
			05/03/07 – 3580 m3/s
			08/12/10 – 3850 m3/s
			06/01/12 – 3730 m3/s
			06/01/14 – 3572 m3/s
Bief de Caderousse (Vieux Rhône de Donzère)	171,6 (Vieux Rhône aval barrage de Donzère – 212,23	CNR	29/10/04 – 4090 m3/s – 750 m3/s
			30/03/06 – 3300 m3/s – 60 m3/s
			11/07/07 – 2641 m3/s – 11 m3/s
			31/07/07 – 1090 m3/s – 5 m3/s
			08/12/10 – 4200 m3/s – 200 m3/s

Tableau 5-5 : Lignes d'eau utilisées pour caler le modèle (en gras) et pour le valider (les autres)

Tronçon	Moyen de calage	PK amont	PK aval	Strickler du lit mineur	Strickler du lit moyen
Confluence Rhône / Saône Aménagement PB	Lignes d'eau de la CNR	0,4	3,820	30	20
Rhône aménagé PB	Littérature	3,820	14,99	40	20
Vieux Rhône PB	Lignes d'eau de la CNR	3,820	10,00	25	15
		10,00	14,99	30	20
Ternay – Barrage de Vaugris	Lignes d'eau de la CNR	14,99	18,50	28	20
		18,50	23,00	40	20
		23,00	33,80	28	20
La Coucourde - Montélimar	Lignes d'eau de la CNR	143,68	148,00	30	20
		148	152,64	37	20
Rhône aménagé MO	Lignes d'eau CNR	152,64	165,90	38	15
Vieux Rhône MO	Lignes d'eau de la CNR	152,64	165,9	32	20
Rhône Chateauneuf - Donzère	Lignes d'eau de la CNR	165,9	170,6	32	20
Rhône aménagé DM	Lignes d'eau de la CNR	170,6	200,5	42	20
Vieux Rhône Donzère	Lignes d'eau de la CNR	170,6	175,0	34	20
		175,0	185,0	34	20
		185,0	191,5	38	20
		191,5	200,5	34	20
Rhône Mondragon – Caderousse	Lignes d'eau de la CNR	200,5	203,0	42	20
		203,0	206,0	40	20
		206,0	212,84	40	20
Ardèche	À préciser	7,990	0,8	30	10
		0,8	0	30	15

Tableau 5-6 : Coefficients de Strickler et cotes des lignes d'eau nécessaires à l'ajustement du modèle pour les secteurs de Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon

2.3.2.3. Conditions aux limites par rapport à l'hydrologie

Les conditions aux limites sont définies par un hydrogramme au nœud amont du modèle Q=f(t) et une relation hauteur-débit, ou loi de tarage Z(t), au nœud aval. La présence d'un affluent, surtout lorsqu'il constitue un ajout dans le modèle, implique aussi les mêmes modalités de définition des conditions aux limites amont et aval. Dans le secteur de Pierre-Bénite, aucun affluent n'a été modélisé, tandis qu'à Donzère-Mondragon, seule l'Ardèche en crue a été modélisée.

Les conditions limites amont ont donc été définies par les débits du Rhône correspondant aux crues aux différentes périodes de retour, mesurés à Ternay pour Pierre-Bénite, à Viviers pour Donzère-Mondragon et au niveau de la confluence pour l'Ardèche (Tableau 5-7).

Période de retour	Q (PB) [m^3/s]	Q (DM) [m^3/s]	Q (Ardèche) [m^3/s]
2 ans	3200	4300	1500
5 ans	3900	5300	1900
10 ans	4500	6100	2300
100 ans	6100	8100	3200

Tableau 5-7 : Débits de crue dans le Rhône total à Pierre-Bénite (PB) et à Donzère-Mondragon (DM).

La définition des conditions limites aval a consisté à fixer une courbe de tarage au niveau du nœud CHA en aval du barrage de Vaugris (lône de la Chèvre) pour Pierre-Bénite, et une autre au niveau du nœud SVT au niveau du barrage de Sauveterre à Avignon pour Donzère-Mondragon.

2.3.2.4. Gestion des débits par rapport aux ouvrages

L'avantage de ce modèle est qu'il inclut les ouvrages et leur règle de fonctionnement dans ses simulations. La séparation des écoulements au niveau des dérivations vieux Rhône-canal est régie par les consignes d'exploitation propre à chaque barrage. Ces ouvrages ont été modélisés comme des déversoirs ou orifices rectangulaires dont la cote de déversement, la largeur déversante et la cote de mise en charge maximale sont ajustables, et où il a fallu ajouter un seuil pour pouvoir déverser au-delà de sa cote de mise en charge maximale (Le Guern, 2013). Selon la loi ***Qmax***, qui permet de modéliser l'ouvrage, tant que le débit injecté dans le modèle reste inférieur au débit maximal turbinable par l'usine du canal, l'ouvrage laisse passer le débit réservé défini dans le vieux Rhône. Mais lorsque le débit maximal est dépassé, l'ouvrage laisse passer le surplus de débit dans le vieux Rhône. Cependant, cette loi ne reflète pas totalement la réalité, notamment en ce qui concerne la forme et les dimensions exactes des ouvrages (Le Guern, 2013). Chaque ouvrage est donc assujetti à des conditions d'exploitation spécifiques (consignes de la CNR) qui ont été créées au sein du modèle et résumées par V. Dugué.

Débit de pilotage Q [m^3/s]	Z [m NGF] au PK = 3,0	Z [m NGF] au PK = 3,82
0-1000	162,24	162,23
1000 → 1400	162,24 → 161,99	162,23 → 161,97
1400 – 2000	161,99	161,97
2000 → 2700	161,99 → 161,59	161,97 → 161,54
2700 – 3000	161,59	161,54
3000 → 3500	161,59 → 162,04	161,54 → 161,98
3500 → 4500	162,04 → 162,84	161,98 → 162,75
4500 → 5500	162,84 → 163,49	162,75 → 163,46
5500 → 6500	163,49 → 164,04	163,46 → 163,98

Tableau 5-8 : Cotes aux PK 3 (Port de Lyon) et 3,82 (diffluence) à un débit donné pour l'aménagement de Pierre-Bénite. Les données en rouges représentent les valeurs pour lesquelles les conditions ne sont plus représentées avec certitude.

<u>Aménagement de Pierre-Bénite :</u> Création d'une consigne au PK = 3,82 (début dérivation) en fonction des conditions énoncées dans le Tableau 5-8. Le débit d'équipement de l'usine est de 1380 m^3/s, débit maximum turbinable à partir duquel l'usine commence à évacuer, et le débit réservé dans le vieux Rhône est de 100 m^3/s, débit minimum maintenu à l'aval du barrage (SOGREAH-EGR, 2000-

V2D1A8). Au-delà d'un débit Q = 5500 m^3/s, les digues n'assurent plus de continuité à l'endiguement (SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A8), les conditions ne sont plus représentées avec certitude, la capacité d'évacuation du barrage devenant probablement insuffisante. L'usine commence à évacuer à partir de ce débit.

Barrage-usine de Vaugris : Création d'une consigne au PK = 33,5 (au niveau du barrage) en fonction des conditions énoncées dans le Tableau 5-9. Le débit d'équipement de l'usine est de 1400 m^3/s, le seuil du barrage permet l'évacuation de la crue millénale du Rhône de 7500 m^3/s sous la cote 150,7 (SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A9).

Débit de pilotage Q [m^3/s]	Z [m NGF] PK = 28,6	Z [m NGF] PK = 33	Z [m NGF] PK = 33,5
0-3300	150,54	-	À adapter selon le débit
3300 → 4600	-	148,54	
> 4600	-	Evolution naturelle	

Tableau 5-9 : Cotes aux PK 28,6 (à Vienne), 33 (amont du barrage) et 33,5 (barrage) à un débit donné pour l'aménagement de Vaugris

Aménagement de Montélimar : Création d'une consigne au PK = 163,5 (au niveau de l'usine) en fonction des conditions énoncées dans le Tableau 5-10. Le débit d'équipement usine est de 1850 m^3/s et le débit réservé du vieux Rhône de 60 m^3/s (SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A16).

Q(retour)	Débit de pilotage Q [m^3/s]	Z [m NGF] au PK = 152,2	Z [m NGF] au PK = 163,5
2 ans	4300	76,47	75,4
5 ans	5300	76,12	74,8
10 ans	6100	76,12	74,8
100 ans	8100	76,12	74,9

Tableau 5-10 : Cotes aux PK 152,2 (barrage), 163,5 (usine) à un débit donné pour l'aménagement de Montélimar

Aménagement de Donzère-Mondragon : Création d'une consigne au PK = 187,2 (au niveau de l'usine) en fonction des conditions énoncées dans le Tableau 5-11. Le débit d'équipement de l'usine est de 1980 m^3/s, et le débit réservé du vieux Rhône de 60 m^3/s (SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A15). Les consignes de l'aménagement de Donzère-Mondragon ne sont plus respectées pour Q100, le débit passant par l'usine reste supérieur au débit équipé (en jaune dans le Tableau 5-11).

Q(retour)	Débit de pilotage Q [m^3/s]	Z [m NGF] au PK = 170,3	Z [m NGF] au PK = 187,2
2 ans	4300	59,1	57,7
5 ans	5300	59,1	57,7
10 ans	6100	59,1	57,7
100 ans	8100		

Tableau 5-11 : Cotes aux PK 170,3 (dérivation), 187,2 (usine) à un débit donné pour l'aménagement de Donzère

Aménagement de Caderousse : Création d'une consigne au PK = 214,5 (usine) en fonction des conditions énoncées dans le Tableau 5-12. Le débit d'équipement usine est de 2280 m^3/s et le débit réservé du vieux Rhône de 5 m^3/s (SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A17).

Q(retour)	Débit de pilotage Q [m³/s]	Z [m NGF] au PK = 203	Z [m NGF] au PK = 214,5
2 ans	4300	36,74	34,02
5 ans	5300	37,5	34,02
10 ans	6100	38,1	34,02
100 ans	8100		

Tableau 5-12 : Cotes aux PK 203 (dérivation) et 214,5 (usine) à un débit donné pour l'aménagement de Caderousse

Les consignes de l'aménagement de Caderousse ne sont plus respectées pour Q100, le débit passant par l'usine reste supérieur au débit équipé (en jaune dans le Tableau 5-12).

2.3.2.5. La simulation des lignes d'eau

Le modèle permet ainsi de simuler des lignes d'eau à des débits donnés par la résolution des équations de Barré de Saint-Venant monodimensionnelles avec la formule de perte de charge de Manning-Strickler (Faure, 2013). Sans rentrer dans les détails de la résolution de formules mathématiques complexes, il est important de retenir qu'il s'agit d'un système d'équations différentielles comportant une équation de continuité, qui correspond à la conservation de la masse, et une équation dynamique, relative à la conservation de l'énergie et incluant les conditions initiales et aux limites.

Equation de continuité : $$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q = q_{apports} - \frac{\partial S_{majeur}}{\partial t} + q_{déversements}$$

Equation dynamique : $$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\beta \frac{Q^2}{S}\right) + gS\frac{\partial Z}{\partial x} = -gS(J + J_S) + kqV$$

Avec : t le temps, S la section mouillée, x l'abscisse en long, Q le débit, q les pertes (en m²/s) ou apports latéraux (par ruissellement, pluie, déversements, échanges avec le lit majeur), β le coefficient de quantité de mouvement, g la gravité, Z la cote de la surface libre, J les pertes de charge linéaires par frottement, J_S les pertes de charge singulières (élargissement ou rétrécissement brusques), V la vitesse moyenne ($V = Q/S$) et k un coefficient égal à 1 si $q < 0$, sinon $k = 0$.

Précisons aussi que MAGE discrétise les équations de Barré de Saint-Venant selon la méthode des différences finies semi-implicites à quatre points selon le schéma de Preissmann (1961) (Faure, 2013). Il s'agit du schéma le plus utilisé pour la discrétisation des équations de Saint-Venant en hydraulique à surface libre. Ce schéma a la particularité de produire un algorithme numériquement stable pour n'importe quel pas de temps (Faure, 2013).

Le modèle opère alors comme suit : pour un débit donné Q, une vitesse moyenne V est calculée à la section S considérée : $Q = S.V$. La ligne d'eau entre deux sections est alors équilibrée par des itérations successives, chacune espacée de 50 m. MAGE permet ainsi de déterminer la vitesse et la hauteur d'eau moyennes à une section donnée, paramètres indispensables au calcul de la force tractrice τ en chaque point. La force tractrice permettra, en association avec les données granulométriques, de déterminer le nombre de Shields et sa valeur critique pour chaque débit simulé dans les secteurs de Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon.

La simulation a été lancée à Q2, Q5, Q10 et Q100 pour les secteurs de Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon. Les données nécessaires pour la modélisation dans MAGE ont été regroupées dans le

Tableau 5-13, notamment les conditions aux limites amont et aval, ainsi que les consignes aux barrages de Pierre-Bénite (PB) et Vaugris (VS) pour le premier secteur, et celles de Montélimar (MO), Donzère-Mondragon (DM) et Caderousse (CA) pour le second.

Enfin, il faut garder en tête que MAGE ne permet qu'une modélisation en une dimension, alors qu'il s'agit d'un système complexe en trois dimensions, où il faut considérer les débordements avec et sans retour au fleuve à l'aval. Ce modèle ne tient pas non plus compte du battement de nappe et des échanges nappe/rivière, où l'un alimente l'autre suivant les périodes et le niveau de chaque compartiment.

	Paramètres	Simulation Q2	Simulation Q5	Simulation Q10	Simulation Q100
Secteur Pierre-Bénite	Q amont (m^3/s)	3200	3900	4500	6100
		Débits atteints au bout de 40j et conservés constant jusqu'à 60j			
	Z aval (m NGF)	143,75	143,75	143,75	143,75
		Valeurs constantes mais peu important pour cette simulation			
	Apport ponctuel	Sans	Sans	Sans	Sans
	Consigne barrage PB (PK 3,82)	Z amont = 161,72 m	Z amont = 161,72 m	Z amont = 162,75 m	Z amont = 163,77 m
	Consigne barrage VS (PK 33,5)	Z amont = 149,11 m	Z amont = 149,11 m	Z amont = 148,40 m	Z amont = 149,93 m
	Durée	Simulation sur 60 jours avec pas de temps de 150 s			
Secteur Donzère-Mondragon	Q amont (m^3/s)	4300	5300	6100	
		Débits atteints au bout de 10j et conservés constant jusqu'à 20j			
	Z aval (m NGF)	26,05	26,05	26,05	
		Valeurs constantes mais peu important pour cette simulation			
	Apport Ardèche	1500 m^3/s	1900 m^3/s	1500 m^3/s	1500 m^3/s
	Consigne barrage MO (PK 163,5)	Z amont = 75,4 m	Z amont = 74,8 m	Z amont = 74,8 m	Z amont = 74,9 m
	Consigne barrage DM (PK 187,2)	Z amont = 57,7 m	Z amont = 57,7 m	Z amont = 57,7 m	Z amont = 57,7 m
	Consigne barrage CA (PK 212,84)	Z amont = 34,02 m	Z amont = 34,02 m	Z amont = 34,02 m	Z amont = 34,02 m
	Durée	Simulation sur 20 jours avec pas de temps de 150 s			

Tableau 5-13 : Données d'entrée utilisées pour faire tourner le modèle. Les consignes n'ont pas été respectées sur les aménagements de Donzère-Mondragon et Caderousse (surlignées en jaune).

2.4. Résultats

L'évaluation du charriage dans ces zones où le débit est régulé par les barrages, en fonction des capacités de turbinage de l'usine hydroélectrique, constitue une étape clé pour quantifier l'impact de cette modification hydraulique sur le lit du vieux Rhône et pour une meilleure compréhension du transit sédimentaire dans le Rhône. L'objectif est ici de quantifier le transport sédimentaire sur deux secteurs du Rhône afin de déterminer (1) si le fond du lit est encore dynamique et (2) quels sont les débits critiques de mise en mouvement des particules du lit susceptibles de modifier la morphologie du chenal. Il s'agit aussi de voir dans quelle mesure l'écrêtement des crues à l'aval des barrages modifie la mise en mouvement des particules dans les vieux Rhône. Les analyses se focalisent sur les secteurs pavés de Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon. Elles permettront de valider ou non, par transposition, les conclusions sur la réactivité de l'ensemble du chenal actuel déduites des variations verticales corrélées à la granulométrie du fond.

2.4.1. Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le secteur de Pierre-Bénite

La mise en mouvement des particules est estimée graphiquement sur le secteur de Pierre-Bénite en fonction du débit de crue (Figure 5-25 et Figure 5-26). Les valeurs de Shields critiques des D_{50} (Figure 5-25) ont été calculées selon les formulations de Soulsby et Whitehouse (1997), Mueller et al. (2005) et Recking et al. (2008). Quant aux valeurs estimées (qui figurent sur le graphique), elles correspondent aux Shields critiques énoncés par Shields (1936) [θ_C = 0,06], Meyer-Peter et Müller (1948) [θ_C = 0,03-0,05], Neill (1968), Parker (1979) et Parker et al. (2007) [θ_C = 0,03], et Recking (2009) [θ_C = 0,045]. Les valeurs de Shields critiques des D_{84} (Figure 5-26) ont été déterminées à partir des équations de Parker et Klingeman (1982), Church et Hassan (2002) et Recking (2009).

Mise en mouvement des particules

Dans le cas de la mobilité des D_{50} (Figure 5-25), les différentes valeurs de Shields critiques sont très étendues, de 0,017 (Mueller et al., 2005) à 0,06 (Shields, 1936). Entre ces deux valeurs extrêmes, nous considérons qu'il subsiste une incertitude quant aux dépassements des limites de Shields. Notons néanmoins que les valeurs les plus fortes de la contrainte limite sont parfois très anciennes et ont été largement rediscutées (Shields, 1936 ; Meyer-Peter et Müller, 1948) ou alors ne sont que moyennement adaptées aux conditions locales (Soulsby et Whitehouse, 1997). La contrainte limite fixée à 0,045 par Recking (2009) décrit un lit quasi immobile, sauf à l'amont du barrage de Pierre-Bénite à Q100. Cette tendance s'inverse entre les valeurs critiques de 0,045 et 0,03 (Neill, 1968 ; Parker, 1979 ; Parker et al., 2007). En effet, le lit est alors mobile sur une grande partie du linéaire à Q100 : dans la retenue de Pierre-Bénite, au niveau du radier du vieux Rhône (autour du PK 10), et dans le Rhône total de Vaugris (Figure 5-25). La mobilité de ces zones, observée suite à une crue vicennale dans l'étude des variations verticales des profils en long (paragraphe 1.3.2, p.253), a été ici mise en évidence à partir de la crue décennale. Les Shields critiques de Recking et al. (2008) et de Mueller et al. (2005) sont plus optimistes puisqu'ils prédisent une mise en mouvement à partir de Q5 et parfois Q2. Dans le cas de la mobilité des D_{84} (Figure 5-26) les valeurs des contraintes critiques (θ_C) sont proches les unes des autres mais restent fortes par rapport aux nombres de Shields (θ_R) : un θ_C compris entre 0,013 et 0,02 pour la retenue de Pierre-Bénite, entre 0,022 et 0,03 pour le vieux Rhône de Pierre-Bénite, et entre 0,025 et 0,034 pour le Rhône total de Vaugris et des θ_R majoritairement inférieurs aux θ_C les plus faibles. La limite de Church et Hassan (2002) est la plus forte et décrit un lit fixe. Celle de Recking (2009) montre une mobilisation locale des particules à Q100 au niveau des retenues et du radier du vieux Rhône. Le Shields critique de Parker et Klingeman (1982) montre même une faible mise en mouvement à partir de Q10 au niveau du radier. Ces résultats confirment la mobilité des retenues et du radier observée dans l'analyse des profils en long à Q20 (paragraphe 1.3.2, p.253).

Les fortes diminutions des valeurs du nombre de Shields sont observées au niveau des mouilles importantes (voire des fosses) ou lorsque la pente se réduit, notamment au PK 7,5 (profils en long quasi immobiles après les crues vicennales, paragraphe 1.3.2, p.253), au PK 15 (exhaussements du profil suite aux crues), au PK 25 (pas d'évolution du profil dans l'analyse) et à l'amont direct du barrage de Vaugris. Paradoxalement, dans l'analyse des variations verticales, le profil en long au niveau du barrage de Vaugris montre une incision après la Q20 (paragraphe 1.3.2, p.253) : soit la charge stockée à l'amont du barrage est sableuse et transférable (non mesuré lors de la campagne mais évoqué pour un D_{10} de 0,4 mm dans SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4), soit le fond est facilement mobilisable en crue malgré le barrage. La mobilisation du lit sur l'ensemble de ce secteur n'est pas

clairement définie mais la mise en mouvement locale des particules au niveau des retenues et du radier du vieux Rhône est en partie démontrée dans la majorité des cas pour la granulométrie de subsurface, i.e. D_{50}, et pour la couche de surface, notamment de pavage, i.e. D_{84}, à Q100.

Estimation des débits solides

La quantification du volume transporté s'est faite à partir des équations de Meyer-Peter et Müller (1948), de Parker (1979), de Schoklitsch (1962) et de Recking (2010). Le calcul du débit solide, représenté graphiquement, permet de rendre compte du volume mis en mouvement à Q2 (Figure 5-27), Q5 (Figure 5-28), Q10 (Figure 5-29) et Q100 (Figure 5-30). Les quantités de sédiments transportés par seconde, par heure et par jour (en considérant le débit constant) sur chaque bief et pour chaque formule de transport solide ont été regroupées dans le Tableau 5-14. Les valeurs totales ont été calculées sur le secteur ainsi que les valeurs moyennes des flux solides estimés pour chaque débit.

Les résultats des calculs selon la formulation de Recking (2010) montrent le volume sédimentaire transporté le plus important à Q2 (Tableau 5-14) et au niveau du radier du vieux Rhône de Pierre-Bénite (Figure 5-27), suivie de Parker (1979) et de Schoklitsch (1962). En moyenne, à Q2 et sur l'ensemble du secteur considéré, le flux solide total serait estimé à 0,25 m^3/s (toutes formules confondues), soit 891 m^3 par heure et 21 381 m^3 par jour à débit constant. Selon la formule de Recking (2010), le débit solide à Q2 serait plus important : 0,57 m^3/s (soit 2065 m^3/h et 49 562 m^3/j). A partir de Q5 et jusqu'à Q100, c'est l'équation de Schoklitsch (1962) qui énonce le volume mobilisé le plus fort (Tableau 5-14). Elle semble surestimer le transport au niveau du vieux Rhône de Pierre-Bénite dans les trois cas mais calcule un débit nul à faible dans les autres biefs alors qu'ils semblent mobiles (Figure 5-28, Figure 5-29, Figure 5-30). La formule de Recking (2009) donne des résultats supérieurs à celle de Parker (1979) pour chaque débit, sauf à l'amont du barrage de Pierre-Bénite et au niveau du radier. A Q100, le débit moyen total est de 10,35 m^3/s, soit 37 258 m^3 par heure et 894 189 m^3 par jour (à débit constant). La formulation de Meyer-Peter et Müller (1948) donne un débit solide nul pour les quatre crues.

Les débits solides calculés à partir des formules de Recking (2009) et de Parker (1979) correspondent aux observations réalisées précédemment sur la capacité de transport ainsi qu'aux variations du profil en long sur ce secteur depuis la construction du barrage (Figure 5-11) et suite aux crues de 2001 à 2003 (Figure 5-7).

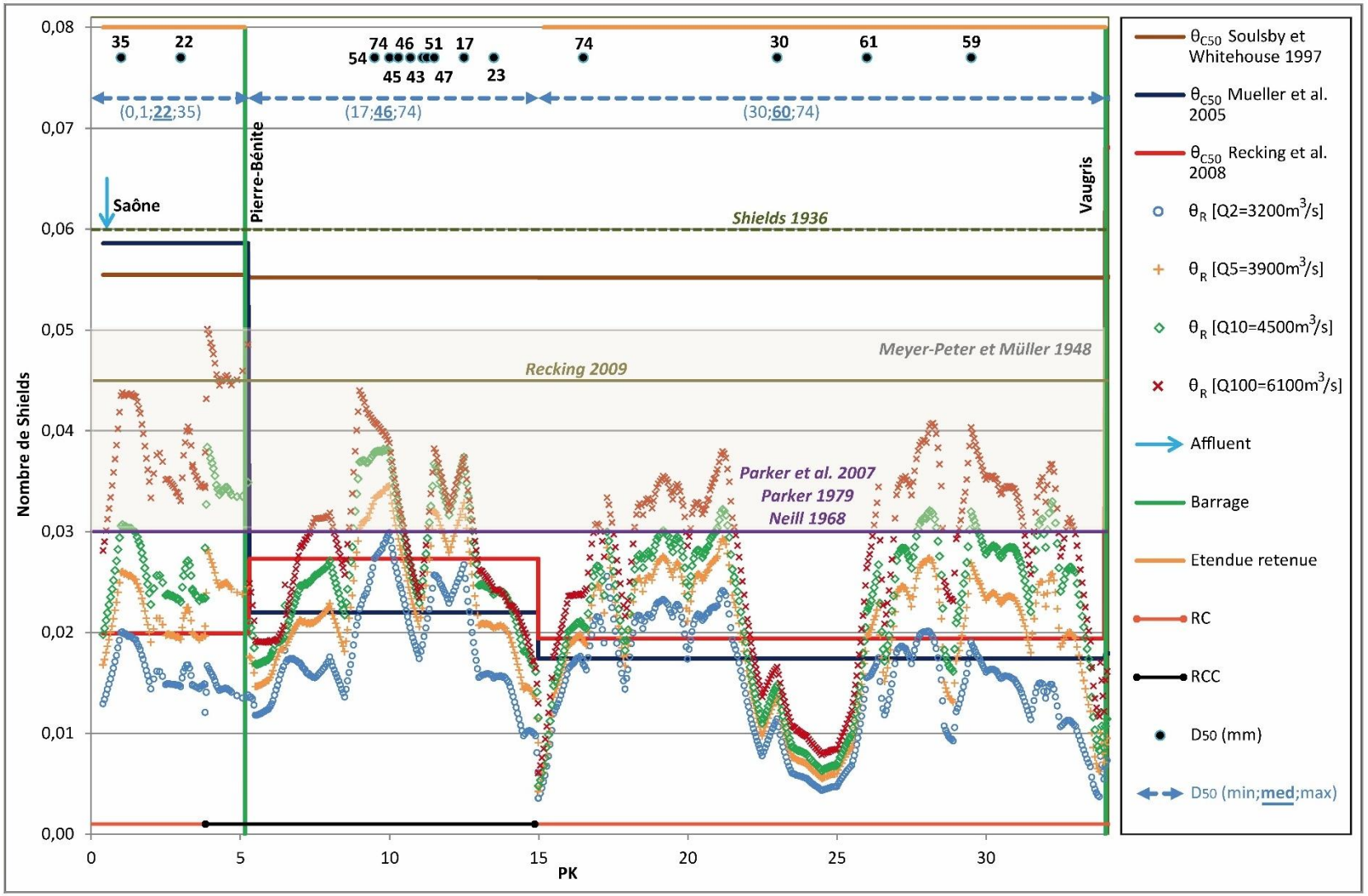


Figure 5-25 : Evolution du nombre de Shields (θ_R) calculé à partir de la médiane des D_{50} du bief à Q2, Q5, Q10 et Q100 par rapport aux Shields critiques (θ_{C50}) calculés et estimés (annotés directement sur la figure) dans le secteur de Pierre-Bénite

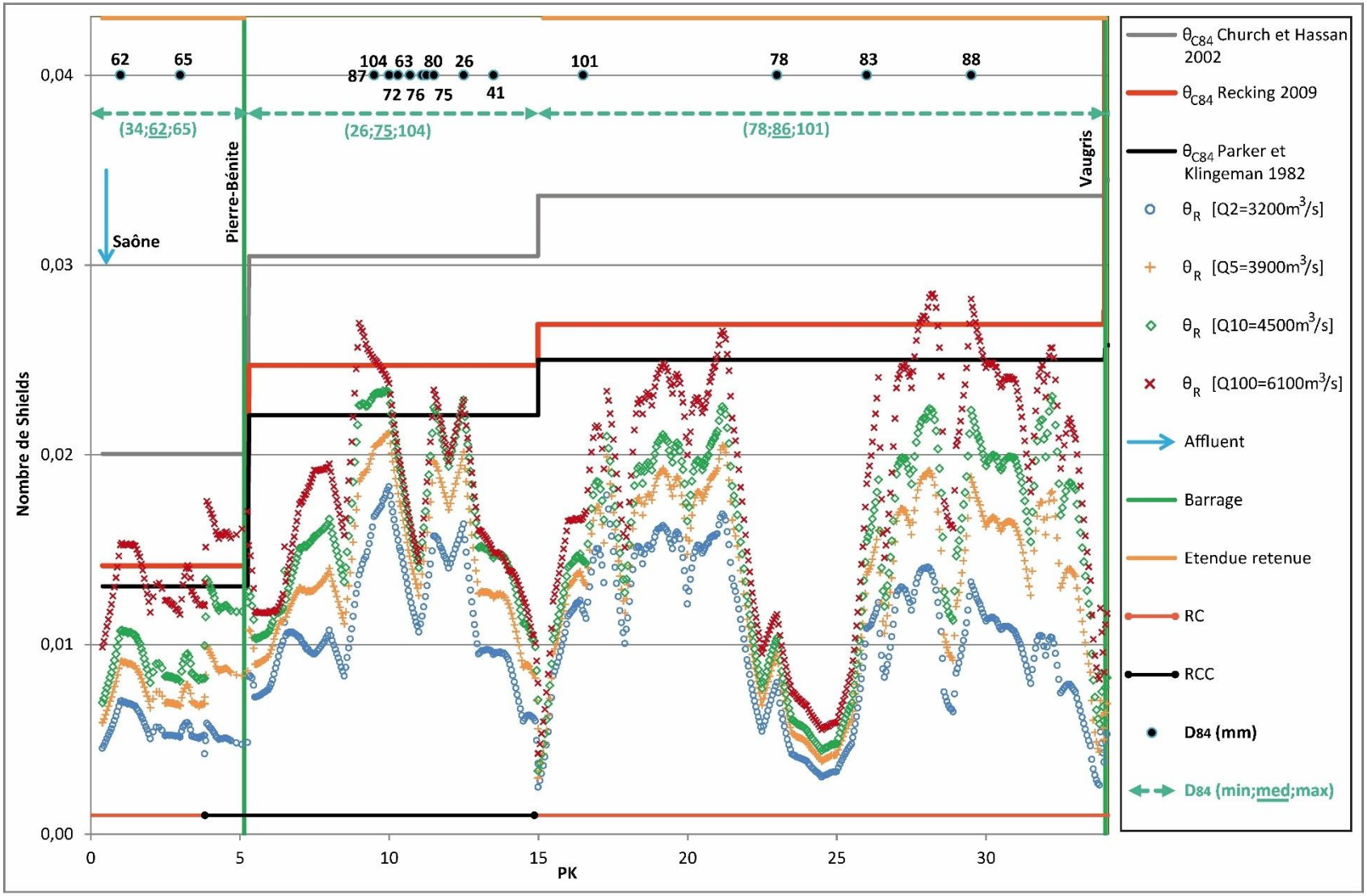


Figure 5-26 : Evolution du nombre de Shields (θ_R) calculé à partir de la médiane des D_{84} du bief à Q2, Q5, Q10 et Q100 par rapport aux Shields critiques (θ_{C84}) calculés et estimés (annotés directement sur la figure) dans le secteur de Pierre-Bénite

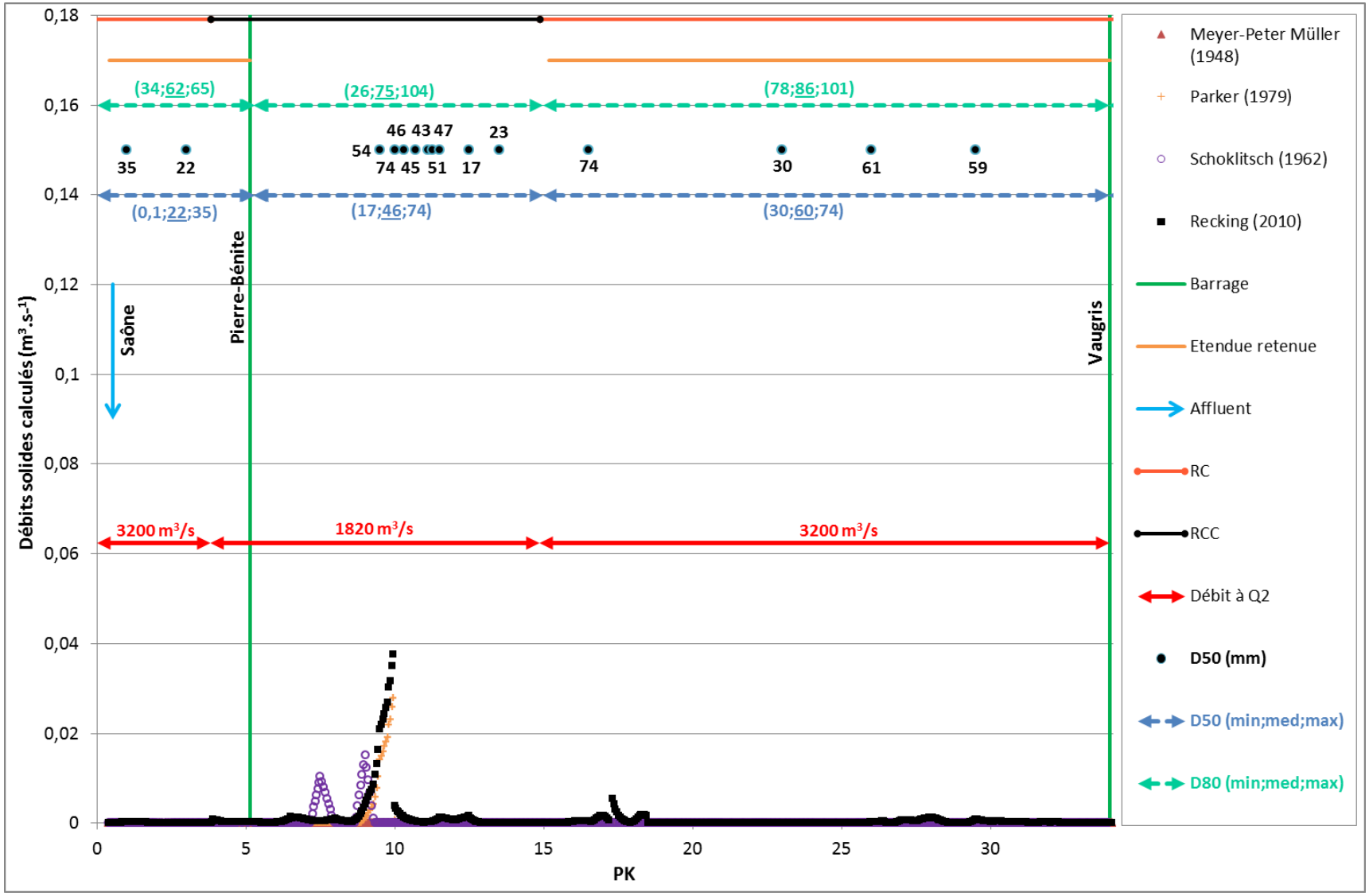


Figure 5-27 : Débits solides calculés dans le secteur de Pierre-Bénite à Q2 (3200 m³/s dans le Rhône total, 1820 m³/s dans le vieux Rhône)

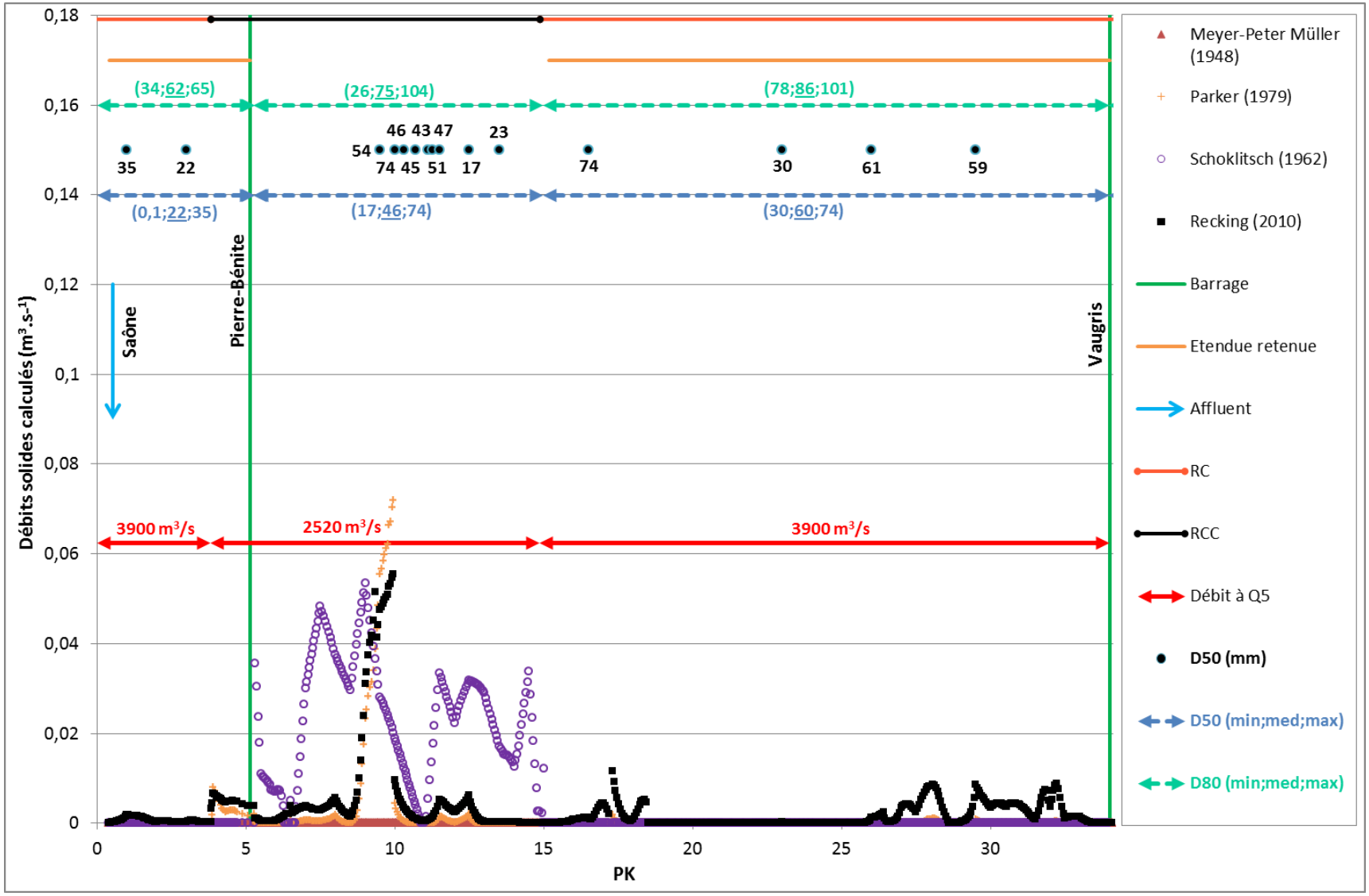


Figure 5-28 : Débits solides calculés dans le secteur de Pierre-Bénite à Q5 (3900 m³/s dans le Rhône total, 2520 m³/s dans le vieux Rhône)

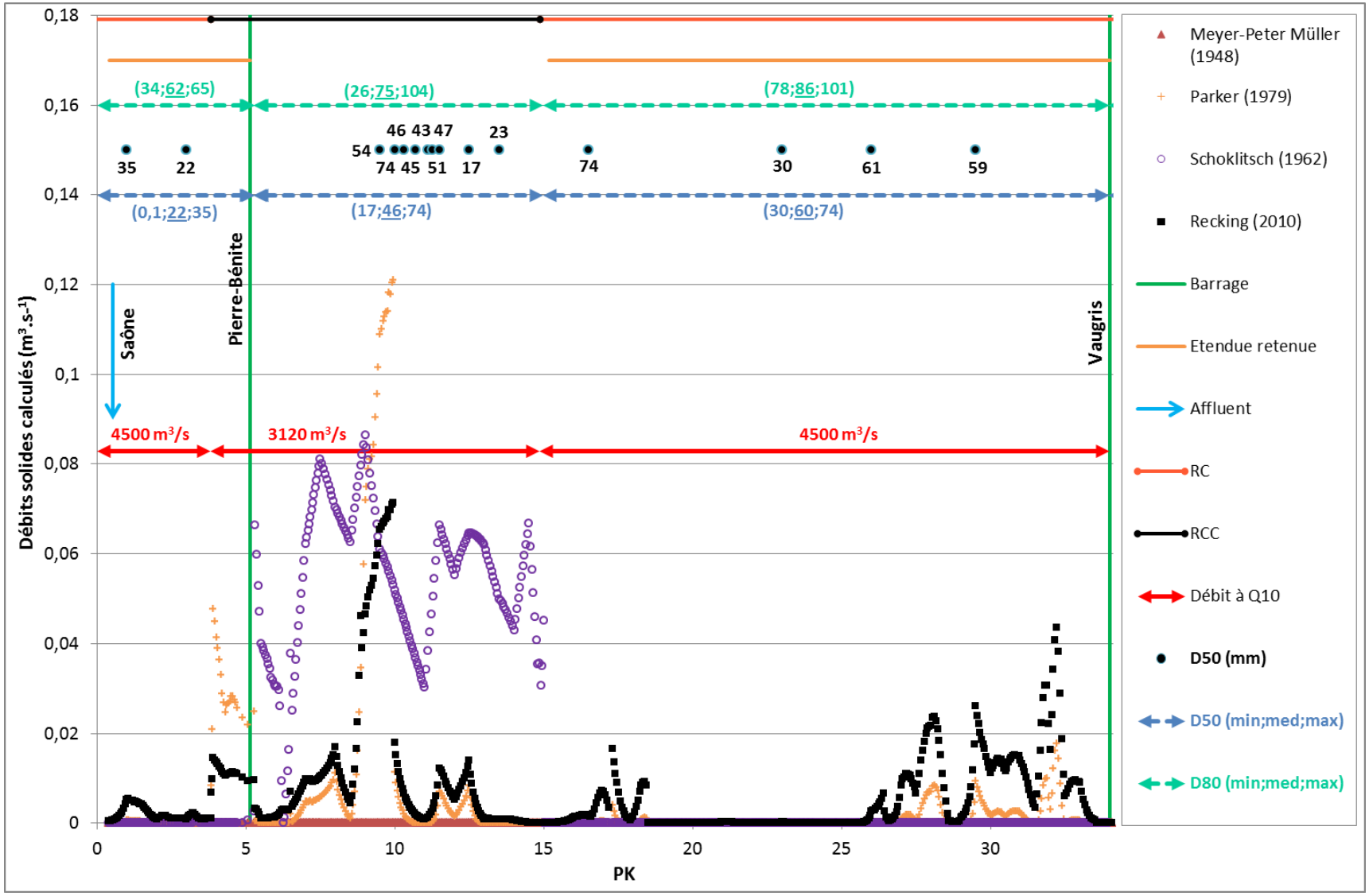


Figure 5-29 : Débits solides calculés dans le secteur de Pierre-Bénite à Q10 (4500 m³/s dans le Rhône total, 3120 m³/s dans le vieux Rhône)

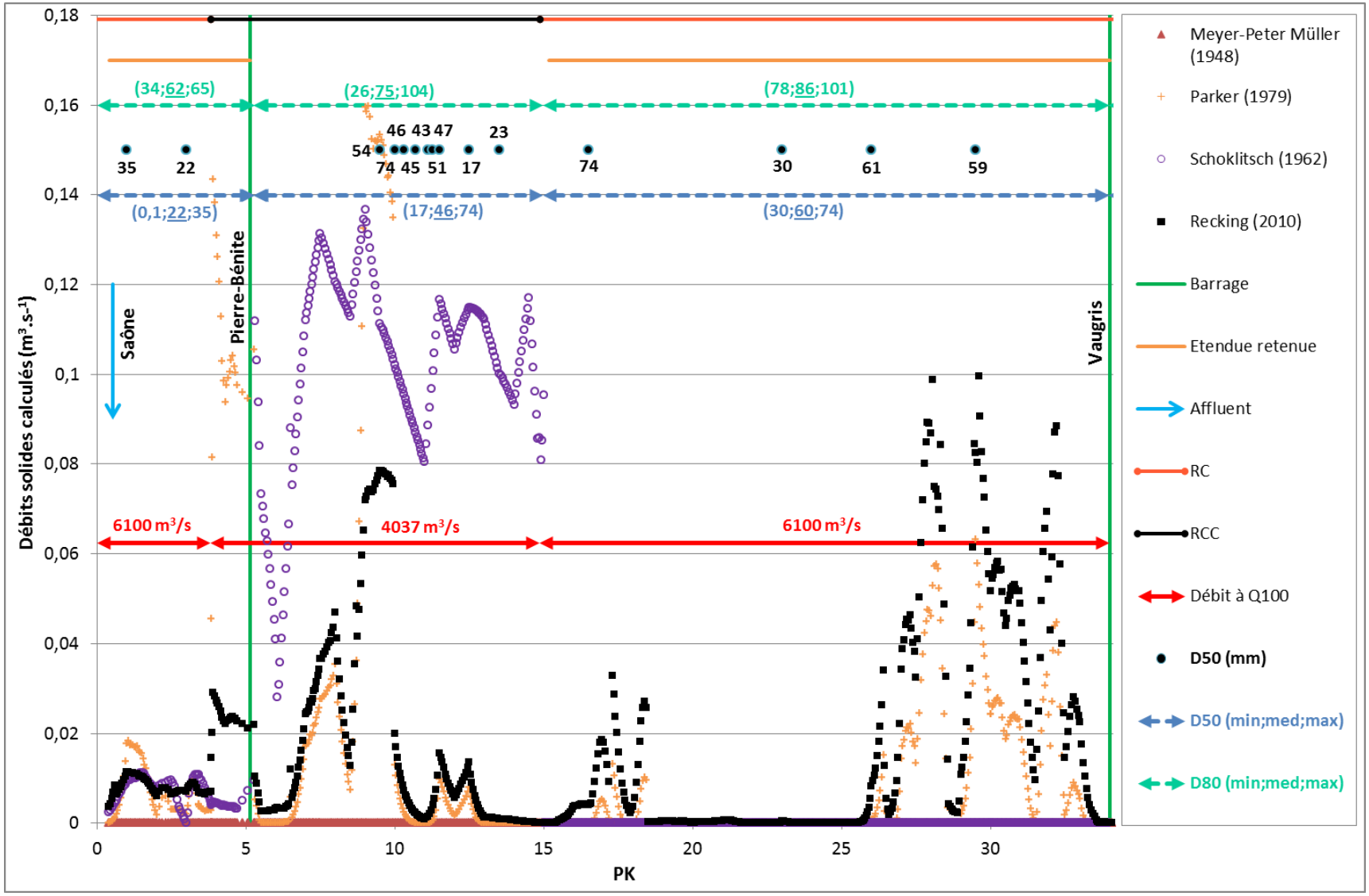


Figure 5-30 : Débits solides calculés dans le secteur de Pierre-Bénite à Q100 (6100 m³/s dans le Rhône total, 4037 m³/s dans le vieux Rhône)

Pierre-Bénite		Q2 : 3200 m³/s					Q5 : 3900 m³/s					Q10 : 4500 m³/s					Q100 : 6100 m³/s				
		MPM (1948)	Parker (1979)	Schok. (1962)	Recking (2010)	Moy	MPM (1948)	Parker (1979)	Schok. (1962)	Recking (2010)	Moy	MPM (1948)	Parker (1979)	Schok. (1962)	Recking (2010)	Moy	MPM (1948)	Parker (1979)	Schok. (1962)	Recking (2010)	Moy
Retenue PB	Débits réels	*3200 - 1820 m³/s après la dérivation*					*3900 - 2520 m³/s après la dérivation*					*4500 - 3120 m³/s après la dérivation*					*6100 - 4037 m³/s après la dérivation*				
	Volume (m³/s)	0	2,16E-07	0	0,02	**0,004**	0	0,07	0	0,15	**0,06**	0	0,65	9,00E-03	0,38	**0,26**	0	2,74	0,59	1,04	**1,09**
	m³/heure	0	7,76E-04	0	55	**14**	0	267	0	547	**203**	0	2 324	32	1 365	**930**	0	9 881	2 122	3 737	**3 935**
	m³/jour	0	0,02	0	1 319	**330**	0	6 396	0	13 122	**4 879**	0	55 775	778	32 770	**22 331**	0	237 133	50 936	89 700	**94 442**
Vieux Rhône	Débits réels	*1820 m³/s*					*2520 m³/s*					*3120 m³/s*					*4037 m³/s*				
	Volume (m³/s)	0	0,24	0,18	0,46	**0,22**	0	1,04	4,50	1,32	**1,71**	0	2,47	10,66	2,25	**3,84**	0	4,39	20	3,51	**6,99**
	m³/heure	0	867	630	1 658	**789**	0	3 750	16 195	4 734	**6 170**	0	8 907	38 358	8 091	**13 839**	0	15 796	72 201	12 630	**25 157**
	m³/jour	0	20 809	15 124	39 797	**18 932**	0	89 996	388 688	113 616	**148 075**	0	213 764	920 592	194 188	**332 136**	0	379 098	1 732 827	303 111	**603 759**
Retenue VS	Débits réels	*3200 m³/s*					*3900 m³/s*					*4500 m³/s*					*6100 m³/s*				
	Volume (m³/s)	0	3,17E-04	0	0,10	**0,02**	0	0,02	0	0,61	**0,16**	0	0,37	0	1,84	**0,55**	0	2,78	0	6,29	**2,27**
	m³/heure	0	1,14	0	352	**88**	0	72	0	2 181	**563**	0	1 321	0	6 622	**1 986**	0	10 008	0	22 657	**8 166**
	m³/jour	0	27	0	8 447	**2 119**	0	1 735	0	52 353	**13 522**	0	31 703	0	158 916	**47 655**	0	240 188	0	543 763	**195 988**
Total	Volume (m³/s)	0	0,24	0,18	0,57	**0,25**	0	1,14	4,50	2,07	**1,93**	0	3,49	10,66	4,47	**4,65**	0	9,91	20,65	10,84	**10,35**
	m³/heure	0	868	630	2 065	**891**	0	4 089	16 195	7 462	**6 937**	0	12 552	38 390	16 078	**16 755**	0	35 684	74 323	39 024	**37 258**
	m³/jour	0	20 837	15 124	49 562	**21 381**	0	98 127	388 688	179 092	**166 477**	0	301 241	921 370	385 874	**402 121**	0	856 419	1 783 763	936 574	**894 189**

Tableau 5-14 : Débits solides calculés à partir des formules de transport établies par Meyer-Peter et Müller (1948 – MPM), Parker (1979), Schoklitsch (1962) et Recking (2010) sur le Rhône total et le vieux Rhône de Pierre-Bénite (PB) et le Rhône total de Vaugris (VS) à Q2, Q5, Q10 et Q100

2.4.2. Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le secteur de Donzère-Mondragon

Les Figure 5-31 et Figure 5-32 permettent de représenter la mise en mouvement des particules dans le secteur de Donzère-Mondragon en fonction des débits de crue. Les différentes formulations de Shields critiques pour les D_{50} (Figure 5-31) et les D_{84} (Figure 5-32) correspondent à celles utilisées précédemment pour Pierre-Bénite. Les abréviations des valeurs de Shields critiques annotées sur la Figure 5-31 correspondent à : « MPM 1948 » = Meyer-Peter et Müller (1948) ; « P&N » = Neill (1968), Parker (1979) et Parker et al. (2007) ; « R. 2009 » = Recking (2009).

Mise en mouvement des particules

Dans la Figure 5-31, les contraintes critiques sont moins étendues qu'à Pierre-Bénite au regard des valeurs de Shields. La valeur maximale reste celle fixée par Shields (1936), suivie de près par celle de Soulsby et Whitehouse (1997), mais qui montre quand même la mise en mouvement à Q100 dans les retenues de Montélimar et Donzère-Mondragon, ainsi que dans le vieux Rhône de Donzère où la mobilisation du lit commence à Q5, à l'aval du confluent Rhône-Ardèche. La limite énoncée par Recking (2009) permet même à la Q2 de remobiliser les sédiments au niveau de la confluence. Les autres Shields critiques (<0,03) montrent un transport sur la quasi-totalité de la zone d'étude à partir d'une Q2. Les contraintes critiques de la Figure 5-32 sont peu étendues entre elles. Les nombres de Shields dépassent moins fréquemment les valeurs seuils notamment celle de Church et Hassan (2002), la plus importante, qui décrit un lit mobile majoritairement à Q100, parfois à partir de Q10 (aval du barrage de Donzère-Mondragon). Au niveau de la confluence de l'Ardèche, c'est à partir de la Q5 que le transport a lieu. La contrainte limite de Recking (2009) est proche de celle de Parker et Klingeman (1982) (légèrement supérieure). Toutes deux montrent une mobilisation des particules à partir de Q5, voire même à Q2 pour le cas de l'Ardèche.

La partie où la mise en mouvement des particules fait l'unanimité reste l'aval de la confluence de l'Ardèche, confirmée par les variations verticales du profil en long suite aux crues (paragraphe 1.3.2, p.253). La mobilisation du lit sur l'ensemble de ce secteur est mieux établie que dans le secteur de Pierre-Bénite, à quelques exceptions près où, localement, la remobilisation est moins évidente : à l'aval du barrage de Montélimar (contrairement au profil qui varie après les crues, sans doute dû à une granulométrie inférieure à celle estimée), et dans la partie amont du vieux Rhône de Donzère-Mondragon, entre le PK 178 et 186, excepté au PK 184 (zone relativement stable d'après l'étude du profil sauf incision au PK 184). Les chutes des valeurs de Shields coïncident avec des mouilles importantes (ou fosses) ou une diminution de pente, notamment au PK 152 (mouille en faible incision après les épisodes de crues d'après l'analyse verticale), au PK 154 (amont du vieux Rhône de Donzère), au PK 186 (correspondant à la zone stable décrite dans l'étude des profils) et au PK 195,5 (fort exhaussement du profil) (Figure 5-12 et Figure 5-13). L'amont du barrage de Montélimar est considéré comme immobile par la majorité des contraintes critiques alors qu'en réalité, l'analyse longitudinale montre une incision globale suite aux crues (paragraphe 1.3.2, p.253), et que la retenue comporte des fines (dont l'étendue géographique nous échappe). Les calculs ont été faits sans tenir compte de cette particularité, mais en prenant la médiane du tronçon. Ces résultats sont à exclure de l'interprétation puisqu'il paraît manifeste d'assister à la mise en mouvement des fines. Afin d'écarter le doute, les calculs ont été refaits dans cette partie du lit en répartissant entre le PK 143 et 151 une valeur de 119 mm pour le D_{50}, et une valeur de 0,16 mm depuis le PK 151 jusqu'au barrage (même démarche pour les autres tailles granulométriques nécessaires aux calculs).

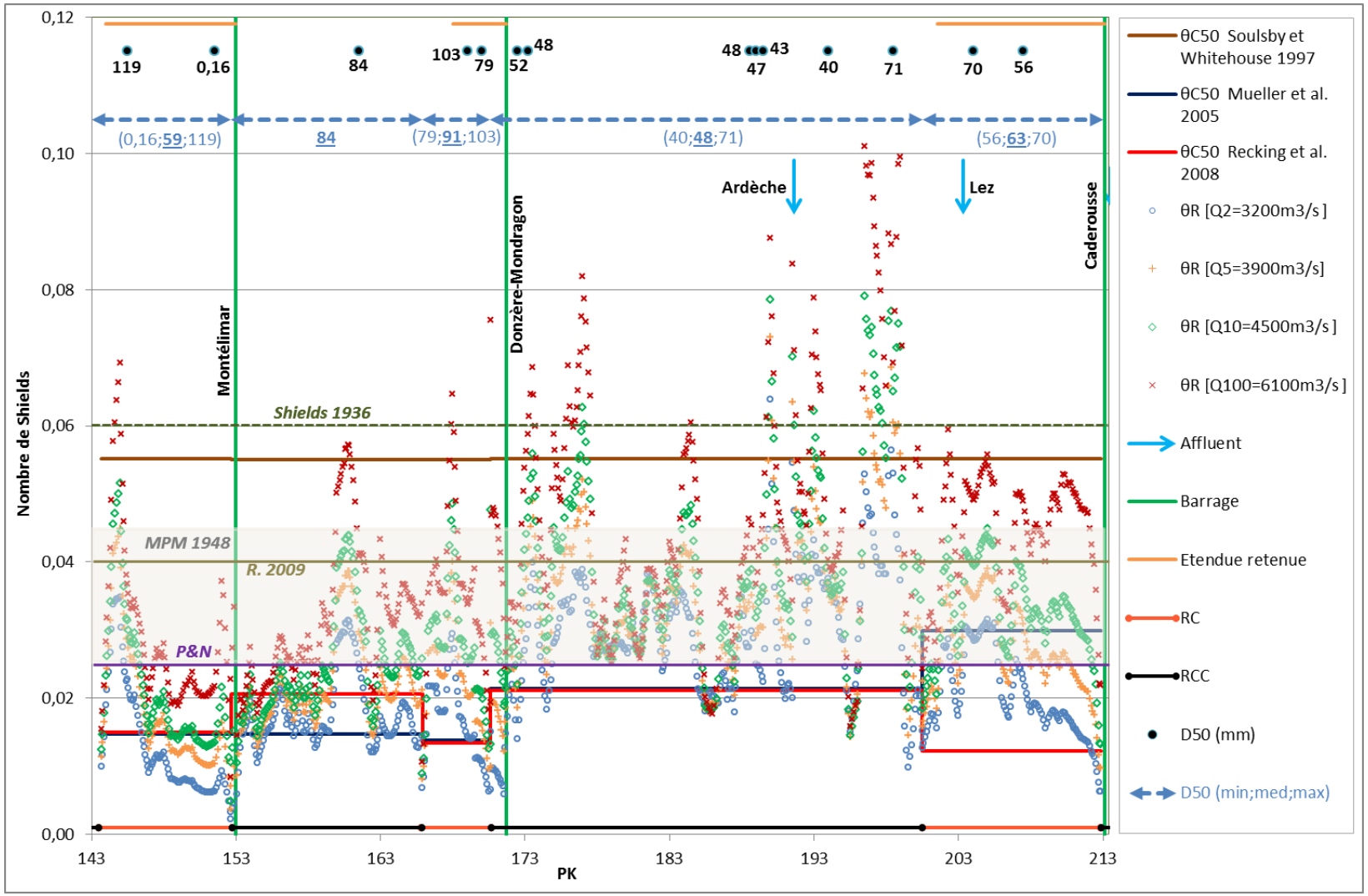


Figure 5-31 : Evolution du nombre de Shields (θ_R) calculé à partir de la médiane des D_{50} du bief à Q2, Q5, Q10 et Q100 par rapport aux Shields critiques (θ_{C50}) calculés et estimés (annotés directement sur la figure) dans le secteur de Donzère

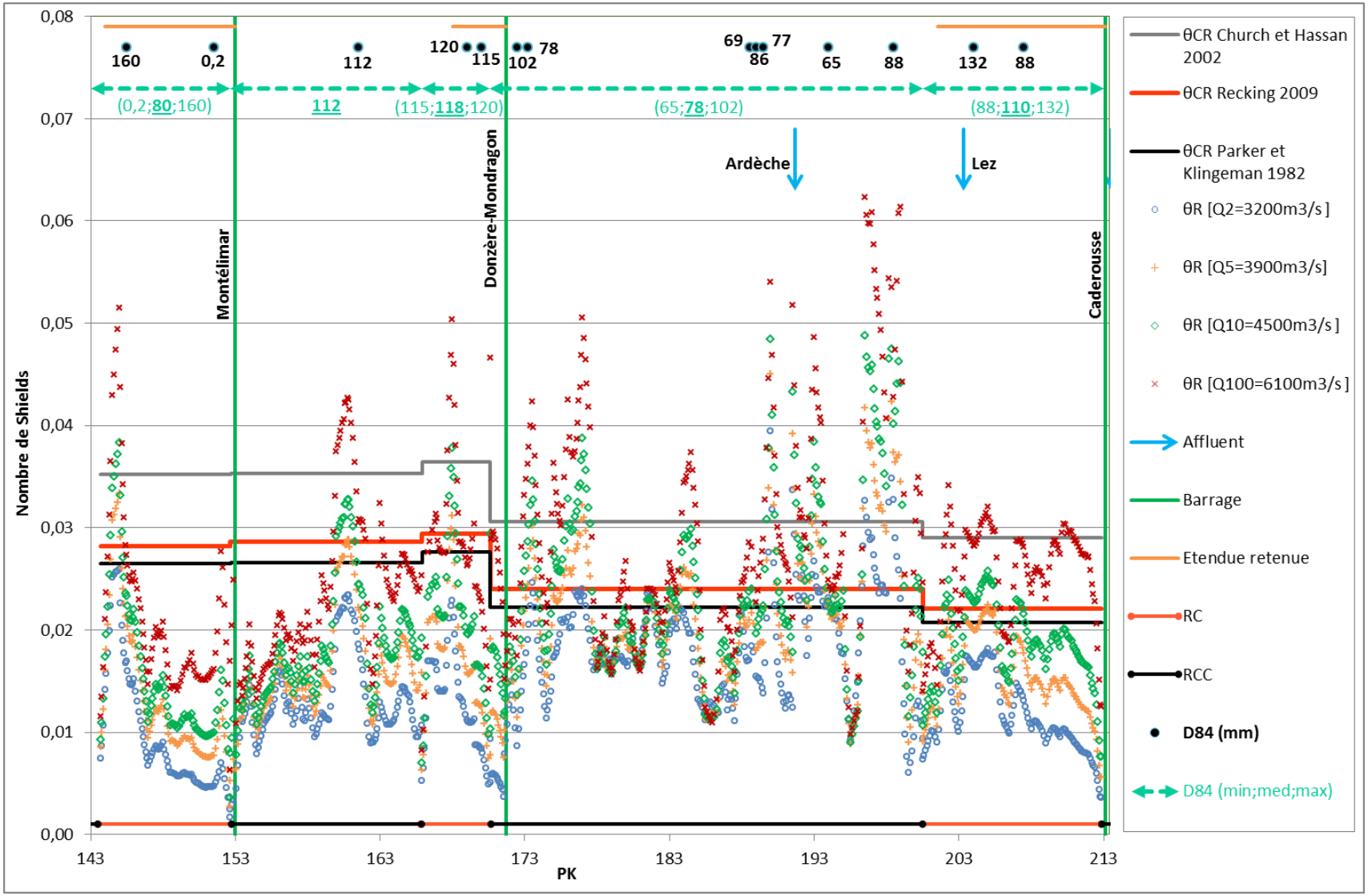


Figure 5-32 : Evolution du nombre de Shields (θ_R) calculé à partir de la médiane des D_{84} du bief à Q2, Q5, Q10 et Q100 par rapport aux Shields critiques (θ_{C84}) calculés et estimés (annotés directement sur la figure) dans le secteur de Donzère

A l'amont de la retenue de Montélimar, les nombres de Shields à Q100 ne dépassent plus les contraintes limites les plus fortes (Shields, 1936, pour le D_{50}, et Church et Hassan, 2002, pour le D_{84}), mais continuent de dépasser les seuils inférieurs (jusqu'à Q5). A l'amont du barrage de Montélimar, dans la zone définie arbitrairement comme lieu de stockage des fines, la mobilité du fond est engendrée par un dépassement de toutes les contraintes de Shields pour D_{50} et D_{84} à partir de Q2. Les nombres de Shields atteignent alors des valeurs fortes, de 0,25 (pour les D_{84} à Q2) à 2 (pour les D_{50} à Q100).

Estimation des débits solides

Le calcul des débits solides de ce secteur a été effectué avec les mêmes équations que celles utilisées à Pierre-Bénite à Q2 (Figure 5-33), Q5 (Figure 5-34), Q10 (Figure 5-35) et Q100 (Figure 5-36). Les valeurs de ces débits ont été regroupées dans le Tableau 5-15. La formule la plus sensible est celle de Recking (2010) qui, à Q2, montre un transport solide de 1,08 m^3/s (Tableau 5-15), soit 3 879 m^3/h et 93 087 m^3/j (à débit constant), dans le vieux Rhône de Donzère-Mondragon, à l'aval de l'Ardèche (Figure 5-33). Il est important de souligner ici l'augmentation du débit suite à la confluence qui passe de 2 320 m^3/s à 3 820 m^3/s pour la Q2. L'équation de Recking (2010) caractérise aussi des débits solides relativement faibles sur les autres biefs, qui coïncident aux zones dont le nombre de Shields dépasse le seuil critique : 0,22 m^3/s au niveau du Rhône total de Montélimar (ne tenant pas compte du stockage des fines), 0,04 m^3/s dans le vieux Rhône de Montélimar, 0,02 m^3/s dans le Rhône total de Donzère, et 0,01 m^3/s pour le Rhône total de Caderousse. Les débits solides issus de l'équation de Parker (1979) suivent la même tendance mais ont des valeurs plus faibles que ceux issus de la formule de Recking (2010) (pour tout Qs > 0,02). La formule de Meyer-Peter et Müller (1948) donne aussi des débits solides au niveau de la confluence de l'Ardèche. De Q5 à Q10, les volumes transportés (dans les mêmes zones qu'à Q2) augmentent (Figure 5-34, Figure 5-35). Le maximum de transport reste au niveau du confluent Rhône-Ardèche (Tableau 5-15) avec un débit moyen (entre les formules) de 1,35 m^3/s à Q5 (soit 4 843 m^3/h et 116 227 m^3/j) et de 3,06 m^3/s à Q10 (soit 11 009 m^3/h et 264 222 m^3/j). A Q100, toutes les formules estiment qu'un volume solide est transporté sur chaque bief (Tableau 5-15), excepté l'équation de Schoklitsch (1962) qui ne donne qu'un faible débit solide au niveau de l'Ardèche de 0,06 m^3/s. Le débit de la Q100 passe de 5 689 m^3/s à 8 889 m^3/s à l'aval de la confluence, doublant presque le débit. Les valeurs obtenues avec les formules Meyer-Peter et Müller (1948) et Parker (1979) dépassent significativement celles issues de Recking (2010) de l'aval de la confluence (respectivement 12,77 m^3/s et 13,88 m^3/s contre 9,49 m^3/s) au Rhône total de Caderousse (12,3 m^3/s pour Meyer-Peter et Müller, 1948) jusqu'alors faiblement en mouvement (Figure 5-36). Contrairement à Pierre-Bénite, la formule de Meyer-Peter et Müller (1948) donne les valeurs de débits solides les plus importantes à Q100 : 25,56 m^3/s au total pour une moyenne de 15,71 m^3/s. Quant à la formule de Schoklitsch (1962), elle calcule des débits quasi nuls sur le linéaire.

Même si certains résultats donnés par les formules de Meyer-Peter et Müller (1948) et de Parker (1979) paraissent démesurés du fait de l'ampleur des volumes transportés soudainement à Q100, sans évolution progressive visible aux crues plus faibles, tandis que ceux données par l'équation de Schoklitsch (1962) semblent bien en dessous de la réalité, la formule de Recking (2010) montre des résultats qui restent cohérents en termes d'évolution et proches de la moyenne à Q100. Le transport de sédiment le plus évident et le plus conséquent reste la confluence de l'Ardèche, suivi de l'aval du barrage de Donzère-Mondragon. Le lit de ce secteur, considéré comme globalement pavé dans les vieux Rhône, n'est donc pas totalement figé et une remobilisation est possible lors de débits conséquents. Ces observations sont d'abord issues de l'analyse des variations de profils en long après la construction des barrages (Figure 5-12 et Figure 5-13) pré et post-crues (Figure 5-7) et ensuite de la modélisation hydraulique.

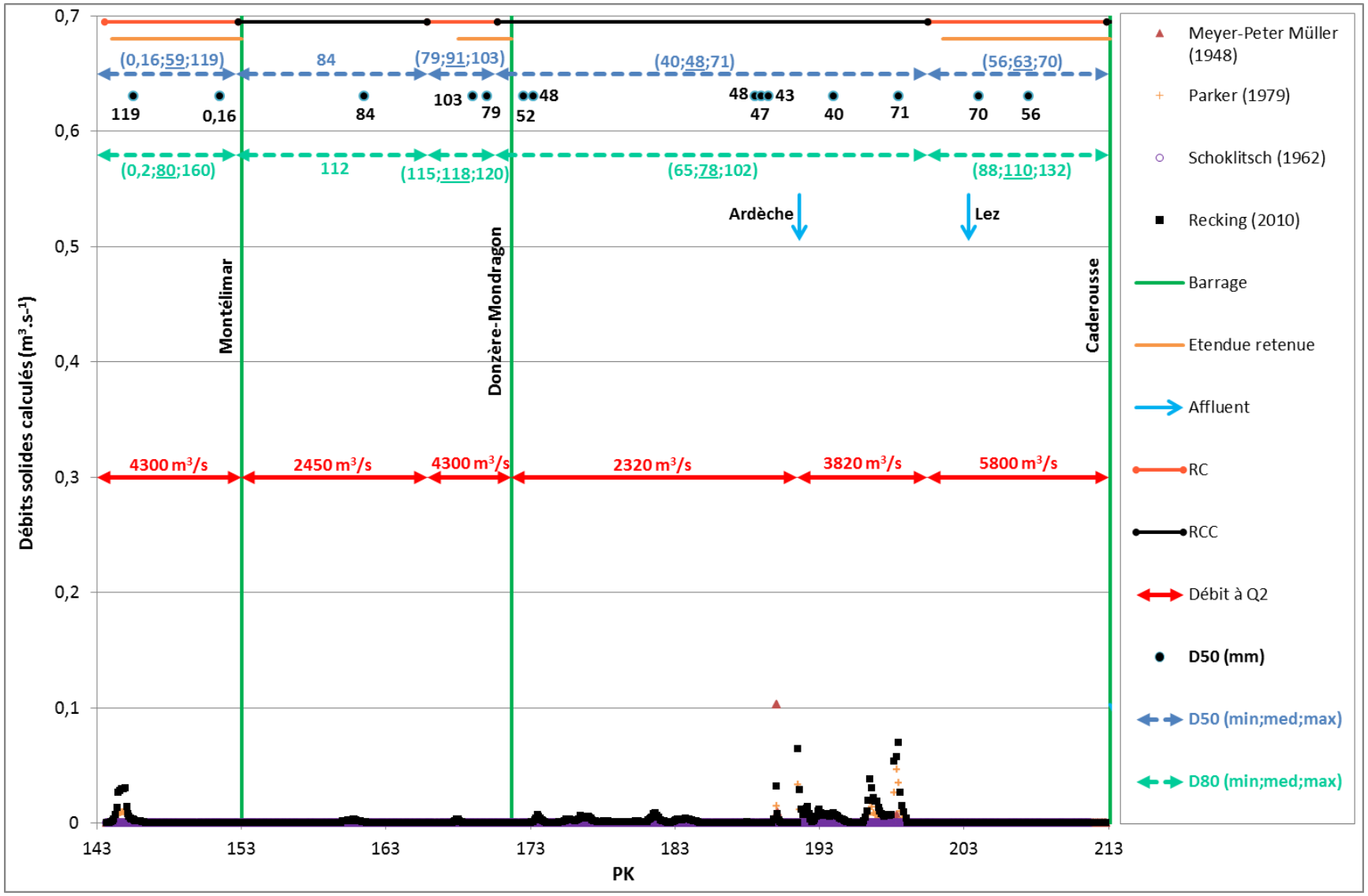


Figure 5-33 : Débits solides calculés dans le secteur de Donzère-Mondragon à Q2 (débits observés : 4300 m³/s dans le Rhône total, 1500 m³/s de l'Ardèche)

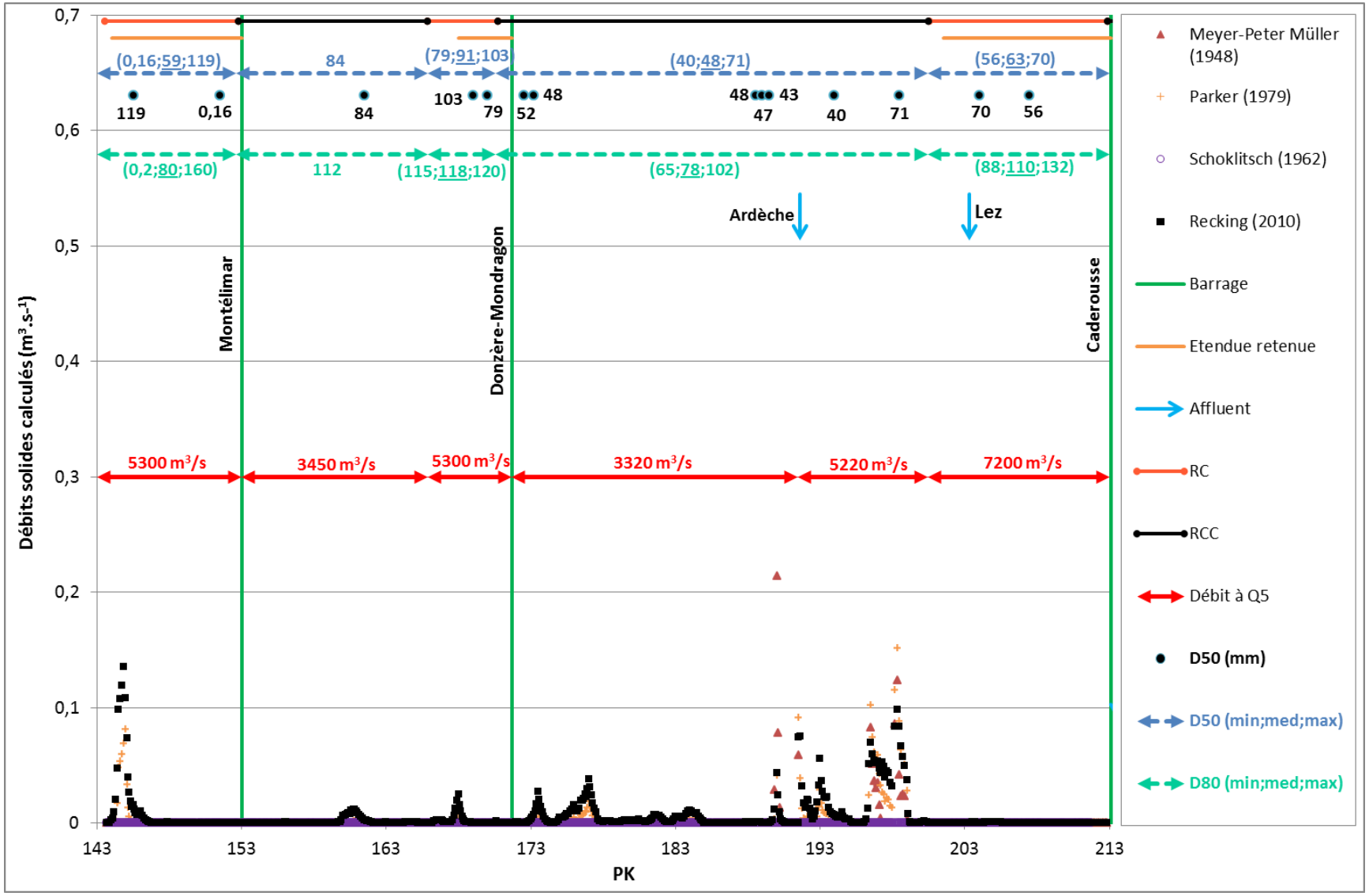


Figure 5-34 : Débits solides calculés dans le secteur de Donzère-Mondragon à Q5 (débits observés : 5300 m³/s dans le Rhône total, 1900 m³/s de l'Ardèche)

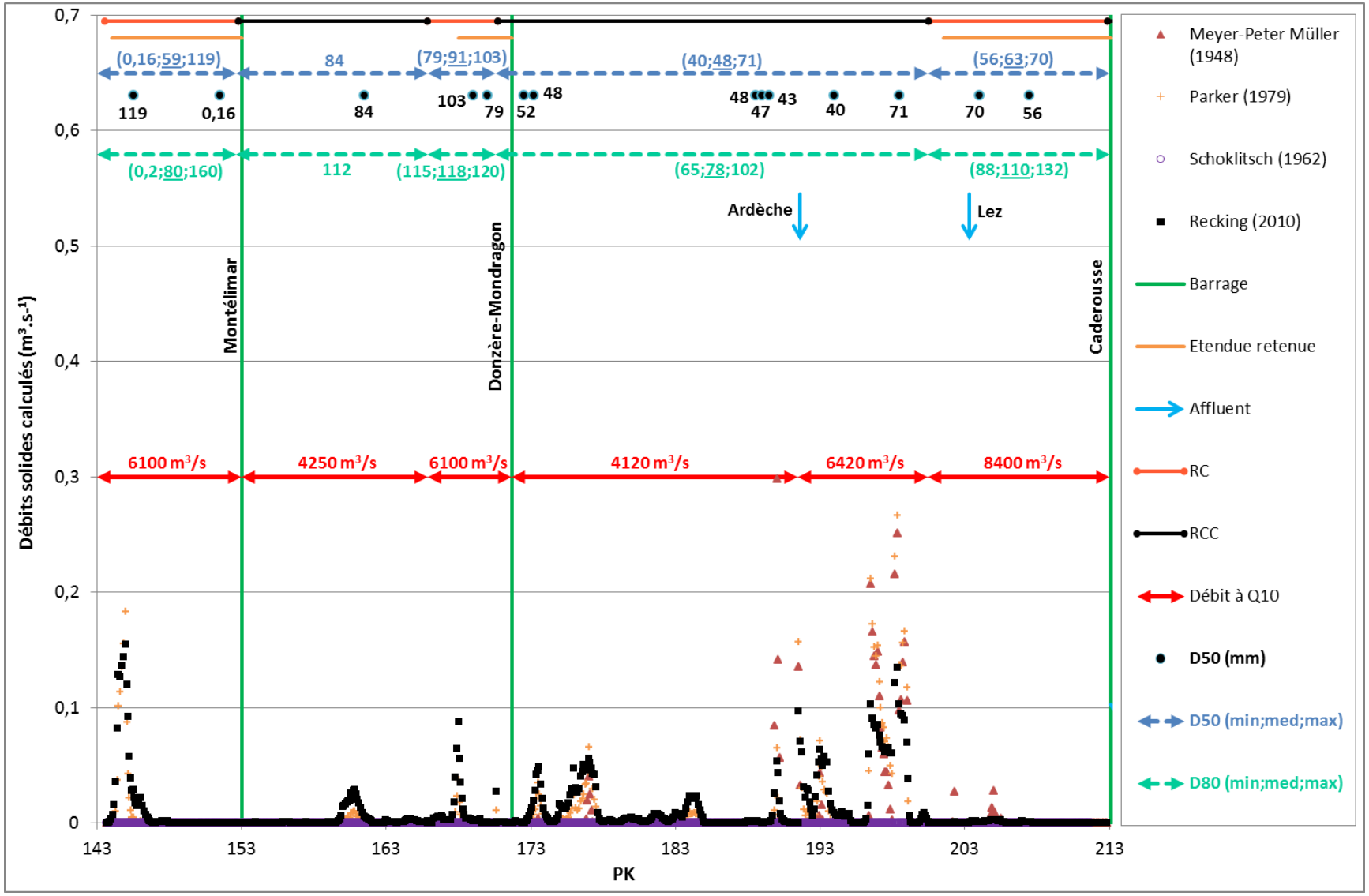


Figure 5-35 : Débits solides calculés dans le secteur de Donzère-Mondragon à Q10 (débits observés : 6100 m³/s dans le Rhône total, 2300 m³/s de l'Ardèche)

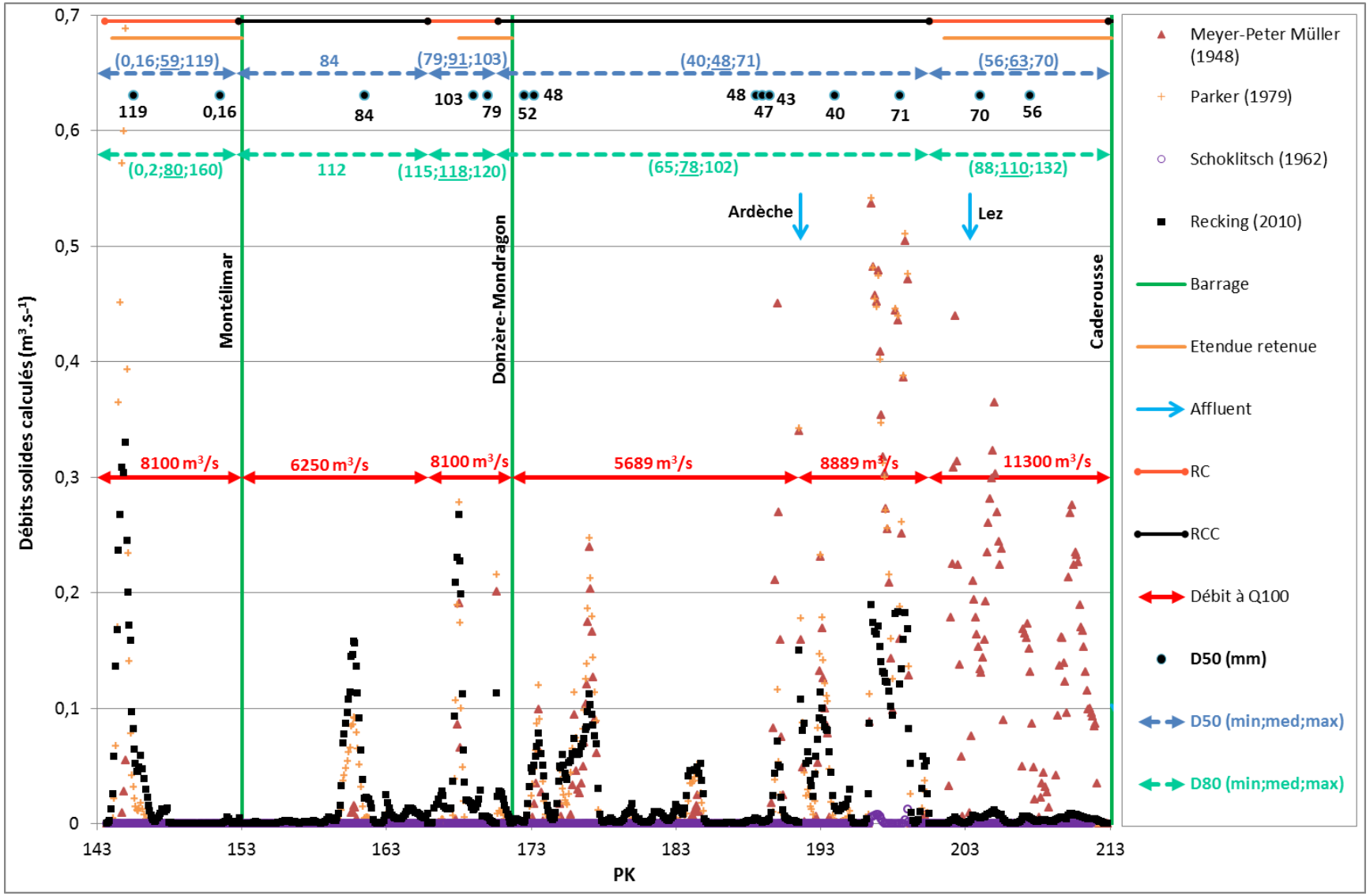


Figure 5-36 : Débits solides calculés dans le secteur de Donzère-Mondragon à Q100 (débits observés : 8100 m³/s dans le Rhône total, 3200 m³/s de l'Ardèche)

Donzère-Mondragon		Q2 : 4300 m³/s					Q5 : 5300 m³/s					Q10 : 6100 m³/s					Q100 : 8100 m³/s				
		MPM (1948)	Parker (1979)	Schok. (1962)	Recking (2010)	Moy	MPM (1948)	Parker (1979)	Schok. (1962)	Recking (2010)	Moy	MPM (1948)	Parker (1979)	Schok. (1962)	Recking (2010)	Moy	MPM (1948)	Parker (1979)	Schok. (1962)	Recking (2010)	Moy
RT MO	Débits réels	*4300 m³/s*					*5300 m³/s*					*6100 m³/s*					*8100 m³/s*				
	Volume (m³/s)	0	0,05	0	0,22	**0,07**	0	0,39	0	0,92	**0,33**	0	0,92	0	1,37	**0,57**	0,09	3,98	0	3,40	**1,87**
	m³/heure	0	172	0	803	**244**	0	1 404	0	3 303	**1 177**	0	3 312	0	4 917	**2 057**	333	14 328	0	12 258	**6 730**
	m³/jour	0	4 123	0	19 278	**5 850**	0	33 687	0	79 283	**28 242**	0	79 495	0	117 996	**49 373**	7 992	343 882	0	294 181	**161 514**
VR MO	Débits réels	*2450 m³/s*					*3450 m³/s*					*4250 m³/s*					*6250 m³/s*				
	Volume en m³/s	0	1,38E-06	0	0,04	**0,01**	0	0,01	0	0,17	**0,04**	0	0,08	0	0,40	**0,12**	0,05	0,97	0	2,14	**0,79**
	m³/heure	0	4,96E-03	0	151	**38**	0	36	0	609	**161**	0	284	0	1 426	**427**	194	3 483	0	7 716	**2 848**
	m³/jour	0	0,12	0	3 633	**908**	0	856	0	14 604	**3 865**	0	6 807	0	34 223	**10 257**	4 659	83 594	0	185 189	**68 360**
RT DM	Débits réels	*4300 m³/s*					*5300 m³/s*					*6100 m³/s*					*8100 m³/s*				
	Volume (m³/s)	0	0	0	0,02	**0,005**	0	7,14E-03	0	0,13	**0,03**	0	0,10	0	0,43	**0,13**	0,35	0,99	0	1,92	**0,82**
	m³/heure	0	0	0	71	**18**	0	26	0	468	**124**	0	351	0	1 542	**473**	1 250	3 579	0	6 909	**2 935**
	m³/jour	0	0	0	1 705	**426**	0	617	0	11 243	**2 965**	0	8 434	0	37 000	**11 359**	30 007	85 906	0	165 828	**70 435**
VR DM	Débits réels	*2320 - 3820 m³/s après l'Ardèche*					*3320 - 5220 m³/s après l'Ardèche*					*4120 - 6420 m³/s après l'Ardèche*					*5689 - 8889 m³/s après l'Ardèche*				
	Volume (m³/s)	0,12	0,29	0	1,08	**0,37**	0,98	1,66	0	2,74	**1,35**	3,27	4,29	0	4,67	**3,06**	12,77	13,88	0,06	9,49	**9,05**
	m³/heure	432	1 055	0	3 879	**1 341**	3 520	5 977	0	9 875	**4 843**	11 766	15 445	0	16 826	**11 009**	45 976	49 960	233	34 171	**32 585**
	m³/jour	10 358	25 328	0	93 087	**32 193**	84 470	143 438	0	237 000	**116 227**	282 375	370 677	0	403 836	**264 222**	1 103 435	1 199 049	5 599	820 112	**782 049**
RT CA	Débits réels	*5800 m³/s*					*7200 m³/s*					*8400 m³/s*					*11300 m³/s*				
	Volume (m³/s)	0	0	0	0,01	**0,001**	0	0	0	0,02	**0,01**	0,10	0	0	0,07	**0,04**	12,30	2,50E-04	0	0,45	**3,19**
	m³/heure	0	0	0	21	**5**	0	0	0	89	**22**	354	0	0	253	**152**	44 266	0,90	0	1 621	**11 472**
	m³/jour	0	0	0	493	**123**	0	0	0	2 144	**536**	8 487	0	0	6 070	**3 639**	1 062 374	21,60	0	38 908	**275 326**
Total	Volume (m³/s)	0,12	0,34	0	1,37	**0,46**	0,98	2,07	0	3,98	**1,76**	3,37	5,39	0	6,93	**3,92**	25,56	19,82	0,06	17,41	**15,71**
	m³/heure	432	1 227	0	4 925	**1 646**	3 520	7 442	0	14 345	**6 326**	12 119	19 392	0	24 964	**14 119**	92 019	71 352	233	62 676	**56 570**
	m³/jour	10 358	29 452	0	118 196	**39 501**	84 470	178 597	0	344 274	**151 835**	290 861	465 413	0	599 125	**338 850**	2 208 467	1 712 452	5 599	1 504 218	**1 357 684**

Tableau 5-15 : Débits solides calculés à partir des formules de transport établies par Meyer-Peter et Müller (1948 – MPM), Parker (1979), Schoklitsch (1962) et Recking (2010) sur le Rhône total (RT) et le vieux Rhône (VR) de Montélimar (MO), le Rhône total et le vieux Rhône de Donzère-Mondragon (DM) et le Rhône total de Caderousse (CA) à Q2, Q5, Q10 et Q100

2.4.3. Estimation du débit solide dans les vieux Rhône à l'état naturel - Conséquences du laminage sur le transport solide

Afin d'évaluer l'impact de l'implantation des barrages sur le transport solide dans les vieux Rhône, le débit solide a été recalculé à l'état dit « naturel », c'est-à-dire en considérant le chenal sans dérivation et, par conséquent, sans laminage. L'intégralité des débits à Q2, Q5, Q10 et Q100 étant déversée dans les vieux Rhône, il a été nécessaire de redéfinir les vitesses d'écoulement dans chaque bief. La formule de Manning-Strickler (paragraphe 2.1.1 & 2.1.3, p.259-261) a d'abord permis de calculer les lignes d'eau (*h*) à un débit donné puis de déterminer les vitesses d'écoulement (V) utilisées pour le calcul du transport solide potentiel avant court-circuitage du chenal. Les débits solides ont tous été estimés à partir de la formule de Recking (2010), considérée comme la plus robuste. Le transport solide est représenté graphiquement à Q2, Q5, Q10 et Q100 pour le vieux Rhône de Pierre-Bénite en Annexe 29, pour Montélimar en Annexe 30 et pour Donzère-Mondragon en Annexe 31. Les débits solides potentiels avant l'implantation des barrages et des dérivations sont comparés aux débits actuels dans le Tableau 5-16.

En considérant l'influence du barrage nulle, le débit solide dans le vieux Rhône de Pierre-Bénite devient environ 2 fois plus important, avec un transport solide potentiel estimé entre 1,2 m^3/s à Q2 (3200 m^3/s) et 6,2 m^3/s à Q100 (6100 m^3/s). Le transport solide potentiel en période de crue aurait ainsi subi une réduction de 33 à 61 % par rapport au transit sédimentaire naturel (Tableau 5-16).

Les débits solides « naturels » dans le vieux Rhône de Montélimar sont estimés entre 4,2 m^3/s à Q2 (4300 m^3/s) et 21,4 m^3/s à Q100 (8100 m^3/s). Ils sont, en moyenne, 45 fois plus importants que les débits réels estimés. C'est dans ce bief que l'écart entre les débits solides avant et après la mise en RCC est le plus important : le charriage des graviers en crue aurait subi une réduction de 90 à 99%, notamment à Q2 où il passe de 4,2 m^3/s à l'état « naturel » à 0,04 m^3/s à l'état réel (Tableau 5-16).

Le transit naturel dans le vieux Rhône de Donzère-Mondragon est en moyenne 13 fois plus important que le transit réel, avec 23,2 m^3/s à Q2 (4300 m^3/s à l'amont de la confluence de l'Ardèche et 5800 m^3/s à l'aval) et jusqu'à 71 m^3/s à Q100 (8100 m^3/s – 11300 m^3/s). Le débit solide potentiel en période de crue aurait subi une réduction de 87 à 95 % (Tableau 5-16).

Même s'il s'agit d'une estimation de la réduction du transport solide potentiel en période de crue, ces chiffres correspondent approximativement à la diminution de la capacité de transit annuel par charriage avant et après aménagement calculée dans l'EGR. Cette réduction est estimée à 33 % dans le RCC de Pierre-Bénite, de 96 à 99 % à Montélimar, de 97 à 99 % à Donzère-Mondragon (Annexe 28).

Quelle que soit l'intensité de la crue, le laminage induit par le court-circuitage du chenal a très fortement réduit le transit sédimentaire dans les vieux Rhône, avec un impact plus important dans les secteurs de Montélimar et Donzère-Mondragon, où les pentes et les débits sont plus forts qu'à Pierre-Bénite.

Qs d'après Recking (2010)		A Q2 (m^3/s)		A Q5 (m^3/s)		A Q10 (m^3/s)		A Q100 (m^3/s)	
		RCC	Naturel	RCC	Naturel	RCC	Naturel	RCC	Naturel
VR PB : 10km	Débits liquides réels	*1820*	*3200*	*2520*	*3900*	*3120*	*4500*	*4037*	*6100*
	Volume (m^3/s)	0,46	**1,2**	1,32	**2,2**	2,25	**3,4**	3,51	**6,2**
	m^3/heure	1 658	4 228	4 734	8 050	8 091	12 147	12 630	22 308
	m^3/jour	39 797	101 480	113 616	193 194	194 188	291 537	303 111	535 397
	Réduction du TS	61%		41%		33%		43%	
VR MO : 13km	Débits liquides réels	*2450*	*4300*	*3450*	*5300*	*4250*	*6100*	*6250*	*8100*
	Volume (m^3/s)	0,04	**4,2**	0,17	**8**	0,40	**11**	2,14	**21,4**
	m^3/heure	151	15 012	609	27 015	1 426	39 450	7 716	77 087
	m^3/jour	3 633	360 286	14 604	648 363	34 223	946 801	185 189	1 850 086
	Réduction du TS	99%		98%		96%		90%	
VR DM : 30km	Débits - après Ardèche	*2320 - 3820*	*4300 - 5800*	*3320 - 5220*	*5300 - 7200*	*4120 - 6420*	*6100 - 8400*	*5689 - 8889*	*8100 - 11300*
	Volume (m^3/s)	1,08	**23,2**	2,74	**35,5**	4,67	**45,4**	9,49	**71**
	m^3/heure	3 879	83 655	9 875	127 762	16 826	163 289	34 171	255 028
	m^3/jour	93 087	2 007 720	237 000	3 066 292	403 836	3 918 925	820 112	6 120 663
	Réduction du TS	95%		92%		90%		87%	

Tableau 5-16 : Comparaison entre les débits solides calculés à partir de la formule de transport établie par Recking (2010) dans les vieux Rhône (VR) court-circuités (RCC) et les vieux Rhône « naturels » (absence de laminage) de Pierre-Bénite (PB), de Montélimar (MO) et de Donzère-Mondragon (DM) à Q2, Q5, Q10 et Q100. La réduction du transport solide (TS) suite aux aménagements est rapportée en pourcentage.

3. Synthèse et discussion des conditions de mise en mouvement

Conclusion et limites des interprétations

En résumé, les réductions de pente dans les retenues et de débit dans les vieux Rhône ont fortement diminué la capacité de transport solide lors des périodes de hautes eaux et ainsi la fréquence de charriage annuelle. Dans l'Etude Globale Rhône il était dit que les volumes charriés étaient beaucoup plus faibles, que le transport de graviers annuel était moins fréquent, et surtout qu'il n'était assuré que lors de crues exceptionnelles. L'idée de cette étude était donc de vérifier que la remobilisation de la charge de fond avait bien lieu et d'évaluer quelle était la fréquence des évènements morphogènes (biennale, quinquennale, décennale et centennale), mais aussi de quantifier le transport solide potentiel lors de ces évènements. L'estimation du transit sédimentaire naturel dans les vieux Rhône lors des crues a permis de confirmer montrer que les effets du laminage des crues, dus à la dérivation, diminuaient très largement les débits solides.

Ce chapitre a souligné que l'étude de la capacité de transport solide est somme toute complexe et qu'il existe de fortes incertitudes. La difficulté tient notamment au choix des formules permettant de calculer le Shields critique et les débits solides, donnant parfois des résultats très différents. C'est pourquoi, la confrontation de l'analyse des variations morphologiques aux résultats des modèles nous a permis de vérifier la cohérence des résultats obtenus. En comparant les différentes équations de débits solides, il apparaît que les débits solides calculés à partir de la formule de Recking (2010) sont les plus proches des interprétations des variations des profils en long suite aux grandes crues de 2001 à 2003.

Les simulations tendent à indiquer que, globalement, les secteurs entre la confluence de la Saône et le barrage de Vaugris et entre le Rhône total de Montélimar et le barrage de Caderousse seraient redynamisés à partir d'une crue centennale (pour des débits solides moyens approchant 1 000 000 m^3/j sur le secteur), notamment le vieux Rhône de Pierre-Bénite et de Donzère-Mondragon qui commencent à montrer un transport conséquent (> 100 000 m^3/j en moyenne) à partir de la crue quinquennale (Tableau 5-14 et Tableau 5-15). Ces résultats montrent que le Rhône possède encore un transport solide résiduel assuré par les crues morphogènes. Les débits de crue centennale permettraient ainsi de charrier en un jour un volume supérieur au cumul du bilan annuel avant aménagement (Annexe 28). Sauf que, statistiquement, cette remobilisation n'aurait lieu qu'un jour tous les 100 ans ce qui, rapporté à l'année, reste finalement peu efficace. Cela montre que le pavage n'était sans doute pas totalement formé lorsque les aménagements hydroélectriques ont été réalisés et que le Rhône était ainsi encore en train de s'ajuster aux conditions morphologiques imposées par les aménagements Girardon au début du siècle.

Par ailleurs, il faut garder en tête les incertitudes des estimations de la mise en mouvement des particules qui résident au niveau de l'estimation des Shields critiques mais aussi au niveau de la précision de la caractérisation granulométrique du lit dans les trois directions (x, y, z). Il est important de rappeler que ces simulations reposent sur une granulométrie médiane alors que la granulométrie est très variable sur le continuum, sans doute plus grossière que la valeur médiane retenue sur les secteurs hydrauliquement les plus sensibles. En effet, ces simulations montrent finalement un transport solide très local, alternant avec des zones où le charriage est quasi nul. Cette variabilité longitudinale est sans doute principalement liée au fait que seule une granulométrie médiane par bief est retenue, ne correspondant pas parfois avec les réalités du terrain. Il est alors possible que la granulométrie soit

surestimée lorsque le transport est nul, ou à l'inverse, sous-estimée quand les conditions hydrauliques sont plus marquées.

L'information sur l'état du lit après une crue demeure encore incomplète puisque les flux solides de l'amont, les apports des affluents ou l'érosion des berges n'ont pas été représentés et pris en compte dans les calculs.

Restauration de la dynamique de fond : perspectives d'une réinjection sédimentaire

Dans le cadre d'opérations de restauration de la dynamique du fond du chenal du Rhône, nous avons cherché à déterminer la granulométrie idéale à réinjecter dans les vieux Rhône pour favoriser la mobilisation en crue biennale et quinquennale (et non plus uniquement en forte crue). Il existe ici deux façons de raisonner : 1) soit on souhaite procéder à une réinjection de graviers d'une taille donnée, ce qui nécessite de faire le tri dans une masse importante de sédiments prélevés, 2) soit on prélève une masse de sédiment dont on connait déjà le D_{50} grâce à notre étude granulométrique réalisée en berge, et qu'on injecte cette fois sans faire le tri. La première option semble être plus coûteuse et plus lourde à réaliser que la seconde. C'est pourquoi, nous raisonnons sur la base de la réinjection d'une masse sédimentaire pouvant potentiellement être prélevée sur les berges du Rhône mécaniquement ou via des processus d'érosion que l'on favorise. Ainsi, les granulométries ayant servi pour les simulations correspondent aux moyennes établies à partir des données granulométriques réelles du Rhône, et déterminées dans le chapitre 4 (Annexe 32).

Plusieurs calculs de débits solides, pour différentes gammes granulométriques (Annexe 32), ont été réalisés à partir de la formule de Recking (2010), jugée comme étant la plus robuste dans le cadre de l'étude, sur le secteur étendu de Pierre-Bénite à Q2 (Annexe 33) et à Q5 (Annexe 34), et sur le secteur étendu de Donzère-Mondragon à Q2 (Annexe 35) et à Q5 (Annexe 36). Ces résultats ont permis de déterminer qu'une injection de graviers, présentant idéalement un D_{50} inférieur à 35 mm, permettrait d'assurer un transport solide supérieur ou égal à 1 m^3/s par 10 km dans les vieux Rhône (de Pierre-Bénite, Montélimar et Donzère-Mondragon) pour la Q2 (Tableau 5-17). Le transport solide devient moins significatif (<0,1 m^3/s par kilomètre) dès lors qu'on réinjecte une masse de sédiment de D_{50} supérieur à 35 mm. Ce D_{50} est globalement inférieur à celui du chenal du Rhône sur chacun de ces secteurs. Dans le vieux-Rhône de Pierre-Bénite, le transport solide serait de 1,06 m^3/s à Q2 et de 2,66 m^3/s à Q5, et dans le vieux-Rhône de Donzère-Mondragon, celui-ci serait de 3,24 m^3/s à Q2 et de 5,6 m^3/s à Q5 (Tableau 5-17), soit des débits solides deux à trois fois plus importants que pour la granulométrie réelle (Tableau 5-14 et Tableau 5-15). Mais c'est pour le vieux-Rhône de Montélimar que l'augmentation du débit solide est la plus spectaculaire : le transport solide est estimé à 1,45 m^3/s à Q2 et à 3,4 m^3/s à Q5 (Tableau 5-17), soit 20 à 35 fois plus que pour la granulométrie réelle (Tableau 5-15). Seulement, la mise en mouvement de cette masse sédimentaire n'aurait pas lieu sur toute la section. En effet, au niveau des retenues, à l'amont des barrages de Pierre-Bénite, Montélimar, Donzère-Mondragon et Caderousse, au niveau des zones stables du Rhône total de Vaugris (entre le PK 18 et 29,5) et du vieux Rhône de Donzère (entre le PK 185 et 187), la charge de fond restera alors immobile. L'absence de transport solide à l'amont du barrage de Vaugris représente la plus faible étendue comparativement à celle des autres barrages (1,5 km de retenue immobile à Q2 contre 5 km pour Pierre-Bénite, 6 km pour Montélimar, 2,2 km pour Donzère et 13 km pour Caderousse ; Annexe 33 et Annexe 35). Cette différence tient probablement au fait que la pente de la ligne d'eau de la retenue de Vaugris est proche de celle d'origine (2 % de différence). Il ne subsiste d'ailleurs qu'une courte zone non remobilisée à l'amont direct de l'ouvrage à Q5 (à peine 500 m, Annexe 34).

De nouvelles simulations ont montré que seuls les sédiments présentant un D_{50} inférieur ou égal à 10 mm étaient susceptibles d'être remobilisés sur l'ensemble des linéaires étudiés à Pierre-Bénite (Annexe 37 et Annexe 38) et à Donzère-Mondragon (Annexe 39 et Annexe 40), comme évoqué dans l'Etude Globale Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4 ; paragraphe 1.1, p.236). En préférant la réinjection d'une masse de sédiments dont le D_{50} serait de 10 mm au lieu de 35 mm, le débit solide serait par ailleurs multiplié par 4, voire 6, dans les vieux-Rhône (Tableau 5-17). Le transport solide sur l'ensemble des secteurs serait, quant à lui, multiplié par 5 voire 7. Par exemple, dans le secteur étendu de Pierre-Bénite, le débit solide passerait de 2,52 m^3/s, pour un D_{50} de 35 mm, à 16,4 m^3/s, pour un D_{50} de 10 mm, lors d'une crue biennale. Il en est de même dans le secteur étendu de Donzère-Mondragon, où le débit solide passerait de 6,94 m^3/s à 32,5 m^3/s à Q2.

L'injection d'une masse de sédiments possédant un D_{50} de 35 mm peut éventuellement être envisagée afin de redynamiser principalement les vieux Rhône dès la crue biennale. Il y a un avantage à réinjecter ce diamètre : on le retrouve sur les bancs en surface (en moyenne : 24 mm à Pierre-Bénite et 33,5 mm à Donzère-Mondragon), ce qui veut dire que la masse est directement disponible et facile d'accès (chapitre 4). Mais si l'on veut assurer un transport solide de façon continue, notamment dans les retenues, il faut envisager la réinjection d'une masse de sédiments possédant un D_{50} inférieur ou égal à 10 mm, aussi disponible sur les bancs mais en subsurface cette fois (en moyenne : 9,5 mm à Pierre-Bénite et 13 mm à Donzère-Mondragon). Par ailleurs, l'autre option pour permettre le transport solide en continue serait de modifier les conditions d'exploitation afin de promouvoir des conditions hydrauliques permettant le transit.

Qs d'après Recking (2010)		Q2		Q5	
		D50 = 35 mm	D50 = 10 mm	D50 = 35 mm	D50 = 10 mm
VR PB: 10km	Débits réels	*1820 m^3/s*		*2520 m^3/s*	
	Volume (m^3/s)	1,06	6,74	2,66	11,8
	m^3/heure	3 816	24 264	9 576	42 480
	m^3/jour	91 584	582 336	229 824	1 019 520
VR MO: 13km	Débits réels	*2450 m^3/s*		*3450 m^3/s*	
	Volume (m^3/s)	1,45	7	3,4	12,5
	m^3/heure	5 220	25 200	12 132	45 000
	m^3/jour	125 280	604 800	291 168	1 080 000
VR DM: 30km	Débits réels	*2320 - 3820 m^3/s*		*3320 - 5220 m^3/s*	
	Volume (m^3/s)	3,24	14,5	5,6	23
	m^3/heure	11 664	52 200	20 160	82 800
	m^3/jour	279 936	1 252 800	483 840	1 987 200

Tableau 5-17 : Débits solides calculés à partir de la formule de transport établie par Recking (2010), dans le cas d'une réinjection de sédiments de diamètres médians (D_{50}) de 35 mm et de 10 mm (Annexe 32), dans les vieux Rhône (VR) de Pierre-Bénite (PB), de Montélimar (MO) et de Donzère-Mondragon (DM) à Q2 (3200 m^3/s à PB, 4300 m^3/s à MO et DM) et Q5 (3900 m^3/s à PB, 5300 m^3/s à MO et DM).

Ces injections posent la question de la mobilité des formes dans le temps et de la dynamique de la végétation qui exercera également un contrôle sur la géométrie si les pratiques d'entretien sont modifiées, et qu'il est difficile d'observer avec la résolution spatiale dont nous disposons (un point de relevé altimétrique tous les 500 m). La poursuite de l'étude et la définition de scénarios d'injection ou d'érosion maîtrisée dans le cadre du schéma de rélargissement devront, sans doute, tenir compte de ces évolutions afin que ces opérations de restauration soient un succès et permettent la redynamisation de biefs conséquents qui ne soient pas limités aux seuls vieux-Rhône.

Conclusion

1. Retour sur les conséquences de l'anthropisation du Rhône

Le Rhône a subi de nombreux changements au cours de la période contemporaine : de la modification du style fluvial à la contraction de la bande active en passant par l'incision du plancher alluvial (chapitre 2). Sa structure et sa dynamique actuelles résultent des ajustements géomorphologiques successifs enregistrés par le système fluvial suite aux perturbations des débits liquides et de la fourniture sédimentaire.

La première grande période de perturbation de la dynamique hydro-sédimentaire rhodanienne a été à la fois climatique et anthropique au cours du 19ème siècle. Elle a consisté en une réduction massive des apports détritiques résultant de la fin de la période climatique froide du Petit Age Glaciaire entre le 14ème et le milieu du 19ème siècle et du changement synchrone d'occupation des sols dans le bassin versant à la suite de la déprise rurale et agricole. Le Rhône a également subi des modifications qui ont affecté durablement le chenal, et dont les effets se répercutent encore aujourd'hui. Les travaux successifs de chenalisation entre le 19ème et le 20ème siècle ont définitivement transformé la morphologie linéaire dans ses trois dimensions par la création d'un bras unique, peu sinueux et profond. L'artificialisation des berges a littéralement modifié les processus morphodynamiques et par conséquent les processus hydro-sédimentaires. Aussi, les aménagements hydroélectriques au cours du 20ème siècle ont imposé une forte discontinuité hydraulique affectant la dynamique sédimentaire et la composition du fond. Enfin, les nombreuses extractions de granulats, réalisées au cours du 20ème siècle en lit mineur sur le fleuve et ses affluents, ont privé le fleuve de sa charge sédimentaire mobilisable, et ont généré des fosses de piégeage ou favorisé l'incision du lit.

L'anthropisation du fleuve s'inscrit dans un contexte géomorphologique déjà complexe, marqué par différents points d'entrées sédimentaires (affluents et héritages du lit), une grande diversité des terrains traversés (gorges, affleurements, successions de verrous et d'ombilics, défilés épigéniques) et l'activité tectonique (compression alpine). Cette organisation longitudinale implique ainsi une distribution granulométrique complexe, sans affinement granulométrique vers l'aval (chapitre 4).

Un aspect particulièrement complexe de la présente étude a été de différencier l'impact spécifique de chaque intervention humaine, dans le temps et dans l'espace, sur les variables du système, notamment dans l'évolution verticale du lit et dans la répartition longitudinale de la taille des particules constituant le fond. Dans le chapitre 3, les données altimétriques disponibles ont été regroupées afin d'effectuer une analyse longitudinale de l'évolution verticale du chenal et une étude des faciès morphologiques du lit actuel. Le chapitre 4 a consisté en l'établissement du patron granulométrique du fond du chenal constitué suite aux campagnes de prélèvements et une analyse de la répartition de la charge sédimentaire.

L'étude simultanée des variations altimétriques du lit du Rhône et de la granulométrie a ainsi permis de mettre en évidence les effets des aménagements successifs sur l'évolution du lit du Rhône.

Les résultats globaux de ces travaux, dont les observations analytiques ont été synthétisées dans l'Annexe 41, sont résumés dans les paragraphes qui suivent.

1.1. Impacts de la chenalisation

Les travaux successifs d'endiguement, depuis la protection des berges jusqu'à la construction de la voie fluviale, notamment la mise en place des casiers Girardon, ont complètement chenalisé et incisé le linéaire à l'aval de Lyon :

- l'interruption de la dynamique latérale du Rhône, i.e. la déconnection entre le fleuve et ses marges alluviales, a entrainé la réduction de la biodiversité en remplaçant peu à peu la ripisylve abritant des communautés pionnières par des écosystèmes forestiers vieillissant et se banalisant,
- l'enfoncement du lit a aussi affecté la ripisylve du fait de l'abaissement de la nappe d'accompagnement, source d'eau pour la végétation ripicole.

Le cloisonnement latéral a ainsi progressivement déconnecté le Rhône de sa plaine alluviale. Avec une vitesse moyenne de 1,77 cm/an, c'est l'incision provoquée suite à la construction des ouvrages Girardon à l'aval de Lyon qui demeure la plus importante et la plus marquée (chapitre 3). Ces ouvrages ont en effet permis d'augmenter la capacité de transport du lit en concentrant les eaux au sein d'un chenal unique.

1.2. Impacts des aménagements hydroélectriques

Les travaux d'aménagement hydroélectrique, comprenant la construction de barrages et de canaux de dérivation, ont provoqué dans les tronçons court-circuités l'abaissement de la ligne d'eau, une modification du régime hydrologique et un laminage des crues (chapitre 2). La mise en place des barrages a définitivement transformé le continuum du Rhône par la compartimentation longitudinale du linéaire en créant un discontinuum fluvial d'amont en aval. Cette segmentation du linéaire s'est traduite par une forte perturbation de la répartition granulométrie en formant :

(1) des zones de faible capacité hydrodynamique résultant de la réduction de la pente hydraulique dans la zone de remous des barrages. Sur dix-neuf retenues, neuf constituent des zones de stockage de sédiments fins : Génissiat, Seyssel, Chautagne, Belley, Sault-Brénaz, Beauchastel, Baix-le Logis Neuf, Montélimar et Beaucaire. Les dix retenues restantes présentent un lit graveleux. Notons la présence ponctuelle de fines à 5 km à l'amont des barrages de Pierre-Bénite et de Saint-Vallier, où les retenues sont majoritairement constituées de graviers (chapitre 4).

(2) des zones de faible capacité de transport qui correspondent à la diminution des débits de crue dans les vieux Rhône, à l'aval des barrages. Les biefs situés dans le tiers central présentent ainsi un pavage fort ($3<IP<8$), comme à Pierre-Bénite, Péage de Roussillon, Saint-Vallier et Donzère-Mondragon, et une granulométrie très grossière, notamment à Beauchastel, avec un diamètre médian atteignant 133 mm, qui résulte de l'incision du lit consécutive à la première phase d'aménagement et qui est exacerbé dans le contexte hydrologique actuel. Les vieux Rhône situés en amont de Lyon ne présentent pas de pavage (chapitre 4).

La ligne d'eau actuelle, imposée par les barrages, a ainsi modifié la composition du fond en favorisant le dépôt de sédiments sablo-argileux dans certaines retenues. Le débit alors imposé à l'aval des barrages ne permet pas le transit des sédiments grossiers dans les vieux Rhône en période de hautes eaux, favorisant la formation d'un pavage. En effet, la distribution granulométrique montre globalement une répartition plus grossière dans les vieux Rhône, avec un D_{50} de 51 mm, que dans les Rhône totaux, avec un D_{50} de 38 mm, et les retenues, avec un D_{50} de 34 mm (chapitre 4). Ces

modifications ont, par conséquent, fortement diminué la capacité de transport solide lors des périodes de hautes eaux. La pente des retenues et les débits réservés dans les vieux Rhône sont globalement incompétents pour le transport de la charge de fond, avec une fréquence de charriage annuelle faible et majoritairement inférieure à 5% de la capacité de transit naturelle, sauf à Génissiat, Seyssel et Pierre-Bénite où elle est supérieure à 50% (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4).

La confrontation entre la granulométrie du lit et les variations du profil en long permet de déterminer si les changements verticaux du fond sont liés aux flux sableux ou au charriage d'éléments grossiers. L'évolution du profil longitudinal du Haut Rhône, n'ayant quasiment pas été chenalisé, est le témoin de l'impact isolé des barrages et des extractions. Ces observations mettent en évidence la perturbation de la dynamique sédimentaire par les ouvrages hydroélectriques avec le stockage quasi systématique de fines à l'amont des barrages et l'incision du lit graveleux à leur aval. Le cas particulier de Miribel-Jonage montre un profil en long particulièrement mobile, fluctuant entre incision et exhaussement des premiers aménagements (Winghart et Chabert, 1965 ; Poinsart et al., 1989 ; Poinsart, 1994) à nos jours (Malavoi, 2000 et 2008 ; ARTELIA, 2012). Le transport sédimentaire dans le Haut Rhône est toujours actif du fait du comblement des fosses et des modifications des formes fluviales (chapitre 3).

A l'aval de Lyon, la compartimentation du continuum en une succession de retenues et de vieux Rhône est globalement mise en évidence respectivement par un exhaussement et une incision ou une stabilisation du profil en long (chapitre 3). Cette stabilisation du plancher alluvial est soulignée par une incision du lit moins forte depuis les aménagements hydroélectriques, avec une vitesse moyenne de 1,2 cm/an, que suite à la construction des casiers Girardon (chapitre 3). Toutefois, cette estimation ne fait pas la distinction entre la part de transferts sableux, notamment vers l'aval des barrages, et celle de mobilisation des graviers. L'évolution du profil en long avant et après les épisodes de crues majeures de 2001, 2002 et 2003 (étudié à l'aval de Lyon), souligne d'autant plus la discontinuité sédimentaire sur le continuum fluvial et la réduction du transport solide grossier annuel sur l'essentiel du linéaire. Cette étude, corrélée aux données granulométriques, permet de caractériser la sensibilité et la réactivité actuelle du lit en réponse à des crues morphogènes. Elle met en évidence le transfert de sédiments sablo-limoneux partiellement piégés dans les retenues vers l'aval des barrages, notamment à Beauchastel, Baix-le Logis Neuf, Montélimar et Beaucaire. L'analyse montre aussi des alternances entre incision et exhaussement du lit grossier à très grossier, voire pavé, tel que dans les secteurs de Pierre-Bénite, Vaugris, Saint-Vallier, Beauchastel à Donzère-Mondragon, Beaucaire (chapitre 5). La formation de zones stables ou de stockages sédimentaires dans le profil est due soit à la présence de sédiments grossiers difficiles à mobiliser, soit à la diminution de la pente notamment dans la partie convexe du profil en long (tiers central), soit au transfert des graviers depuis la retenue vers l'aval. Les variations du profil en long ne s'expliquent donc pas seulement par la mobilité des fines depuis l'amont des barrages vers leur aval, mais aussi par le caractère hydraulique des crues morphogènes rares qui permettent de mobiliser une partie de la charge grossière, ou encore par les apports sédimentaires des affluents. La dynamique sédimentaire persiste donc principalement dans les secteurs amont mais est plus localisée dans les secteurs aval.

Les simulations numériques 1D entre la confluence de la Saône et le barrage de Vaugris et entre le Rhône total de Montélimar et le barrage de Caderousse, des secteurs grossiers où les vieux Rhône sont considérés comme étant pavés, confirment qu'un transport résiduel de la charge de fond est possible lors de la Q100 (pour des flux solides moyens respectivement de 900 000 m^3/j et de 1 300 000 m^3/j) mais aussi une remise en mouvement plus faible et localisée sur quelques tronçons à partir de la Q2 (21 000 m^3/j et 40 000 m^3/j - ce qui reste très peu significatif en matière de mobilité du chenal). Le lit du Rhône n'est donc pas totalement figé et une remobilisation est possible mais lors de débits conséquents et très peu fréquents, comme ceux enregistrés lors des crues morphogènes de 2001 à

2003. Par ailleurs, de nouvelles estimations de la capacité de transport à Q2, Q5, Q10 et Q100 excluant la mise en RCC du chenal ont permis de montrer que celle-ci subissait une réduction de 33 à 61 % dans le vieux Rhône de Pierre-Bénite, de 90 à 99 % dans le vieux Rhône de Montélimar et de 87 à 95 % dans le vieux Rhône de Donzère-Mondragon par rapport à celle calculée en conditions « naturelles » d'écoulement.

Nous sommes donc loin d'une géométrie dynamique et d'un transport solide généralisé pour des crues fréquentes comme cela est observé sur certains affluents du Rhône, où les fréquences de mise en mouvement sont connues. Prenons par exemple le cas de l'Ain où la mobilité des matériaux a été estimée à Q1,5, mais où la propagation d'un déficit a toutefois été constaté à l'aval des barrages. Ce déficit pourrait atteindre le Rhône d'ici moins de 100 ans avec une réduction de l'ordre de 30 000 m^3/an (Rollet, 2007). Autre exemple, celui de la Drôme, qui conserve son style en tresses et maintient le charriage partiel des graviers en l'absence de rupture dans la continuité sédimentaire, comme un barrage ou une fosse d'extraction (Landon 1999). En définitive, le seul secteur présentant encore une morphologie dynamique sur le Rhône est celui de Miribel-Jonage (chapitre 3).

1.3. Impacts résultant de l'effet cumulé des différentes pressions humaines

De nombreuses extractions de graviers dans le chenal du Rhône, connues et réalisées depuis les années 70, ont augmenté l'enfoncement du lit d'au moins 14 cm en moyenne sur le linéaire aval de Lyon, soit 0,52 cm/an (chapitre 3). L'absence de données sur les extractions antérieures aux années 70, le cumul des pressions humaines et l'imprécision des informations ne permettent cependant pas de définir plus précisément leur impact sur l'incision et la dynamique du transport solide.

Malgré les nombreux aménagements et l'exploitation importante de gravières dans le lit mineur des affluents, qui ont provoqué la réduction drastique des apports au Rhône, certains tributaires ont encore la capacité d'alimenter le fleuve en sédiments fins, tels l'Arve, le Fier, la Saône, l'Isère ou la Durance, mais aussi (dans une moindre mesure) en graviers, notamment l'Ain, la Drôme ou l'Ardèche pour les plus importants (chapitre 4). Les sédiments fins sont alors susceptibles de s'accumuler dans les retenues, lorsque la capacité hydrodynamique diminue, comme à Chautagne, Belley et Sault-Brénaz pour le Rhône amont, à Pierre-Bénite (dépôt localisé près de la confluence – retenue constituée de graviers), Vaugris, Péage de Roussillon pour le tiers central, ou enfin comme à Beauchastel, Baix-le Logis-Neuf, Montélimar, Avignon et Beaucaire pour le tiers aval. Tandis que les graviers, dont la fréquence de mise en mouvement est réduite au sein même du linéaire, se retrouvent souvent stockés au niveau des confluences, où la pente est plus faible, avant d'être remobilisés par les crues ou par des travaux d'entretien des chenaux (ex. : extractions de graviers dans le lit du Doux en 2013 entrepris par la CNR).

La distribution granulométrique établie et étudiée dans le chapitre 4 est complexe. Elle ne montre aucun affinement granulométrique amont-aval mais une organisation dépendant :

- des phénomènes naturels : pente de la vallée, sources de recharges sédimentaires ponctuelles par les affluents et par la remobilisation du stock sédimentaire propre du lit (dépôts glaciaires, fluvio-glaciaires ou fluviatiles anciens) ;
- des perturbations anthropiques : diminution générale des apports sédimentaires (issus des affluents et de l'érosion latérale du chenal), processus de pavage sur certaines sections aval,

sections amont encore potentiellement actives et en voie d'ajustement (aménagements plus récents), discontinuités hydrauliques.

La confrontation des études granulométrique (chapitre 4) et altimétrique (chapitre 3) a permis de caractériser la dynamique du linéaire. En excluant les fines déposées dans les retenues, le chapitre 4 a permis de mettre en évidence la compartimentation de la distribution granulométrique en quatre grands secteurs : le Haut Rhône de Génissiat à Lyon, avec un diamètre médian de 20 mm, le Rhône médian de Pierre-Bénite à Saint-Vallier, avec un D_{50} de 46 mm, le Bas Rhône entre le Doux et Avignon, avec un D_{50} de 56 mm, et le Delta à l'aval d'Arles, avec un D_{50} de 30 mm. Cette sectorisation fait sens au regard du pavage et des faciès morphologiques du fond du lit. En effet, les vieux Rhône en amont de Lyon ne sont pas pavés et présentent des formes fluviales de fortes amplitudes et longueurs d'onde, caractéristiques d'un transport solide modéré, à l'amont de Sault-Brénaz, et des formes fluviales petites mais très variables, caractéristiques d'un transport solide actif, à l'aval de Sault-Brénaz (chapitre 3). De plus, les modifications des formes fluviales depuis la construction des barrages montrent que le transport solide est toujours actif à l'amont de Lyon. A l'aval, notamment à Pierre-Bénite et à Donzère-Mondragon, les vieux Rhône présentent de forts taux de pavage et des formes fluviales majoritairement petites et homogènes, caractéristiques d'un lit figé. Les variations des formes existent sur cette partie du Rhône, sans être toutefois aussi importantes qu'à l'amont (chapitre 3).

L'évolution altimétrique du lit, depuis la période Girardon, s'est donc accompagnée d'une transformation de la géométrie des formes du lit (chapitre 3). L'incision et la diminution des apports latéraux imposées par les aménagements Girardon, la réduction des apports des affluents et l'impact des extractions ont favorisé la formation de formes fluviales de plus faibles amplitudes que celles du Haut Rhône, où les aménagements Girardon sont quasi absents. L'organisation longitudinale des formes fluviales ne se calque donc pas sur la position des barrages, zones de stockage des fines dans les retenues exclues. Cette affirmation est renforcée par le fait que la pente du fond du lit actuel suit la même tendance que celle de la pente de la ligne d'eau de 1900, c'est-à-dire la pente à l'époque de la construction des casiers Girardon (chapitre 4). Les secteurs à granulométrie grossière présentent généralement une pente du fond du lit actuel ou de la ligne d'eau historique forte, tandis que les zones de granulométrie fine dépendent de la pente actuelle de la ligne d'eau, pente toujours faible. Le plancher alluvial a donc été figé suite aux aménagements Girardon et a gardé approximativement la même pente du fond, responsable du charriage des sédiments avant les aménagements CNR et autour de laquelle s'organise encore aujourd'hui la distribution longitudinale des sédiments grossiers.

2. Perspectives de ces travaux

2.1. Une base de données essentielle pour la connaissance globale du fleuve…

En définitive, la présente étude fournit une base de données essentielle pour établir un diagnostic de l'état du Rhône et de son évolution. Les résultats permettent d'identifier les zones à forte tendance au stockage et celles à forte tendance au déstockage, depuis la construction des barrages et lors d'évènements de crues morphogènes. Ils peuvent permettre ainsi de mieux cibler les opérations de redynamisation des zones pavées, effectuées notamment par le biais de réinjections de graviers dans les secteurs ayant une tendance au déstockage de sédiments extraits dans les secteurs ayant une tendance au stockage. Cette étude peut aussi contribuer à l'élaboration d'une stratégie de gestion

sédimentaire durable visant à préserver la continuité sédimentaire dans les biefs encore alimentés et dynamiques. La compréhension des facteurs qui contrôlent l'évolution du lit et les bases de données altimétriques et granulométriques acquises au cours de cette thèse peuvent aider à mieux répondre aux questions liées (1) au calage des formules d'hydraulique pour le calcul du transport solide potentiel, (2) au lien entre transport solide et risque d'inondation (question des excès/déficits sédimentaires du lit et des curage/essartement des bancs) et (3) à la restauration écologique et à l'état des habitats aquatiques (secteurs mobiles ou fixes).

La préservation de la ripisylve fait partie des enjeux de la restauration et de la redynamisation des marges alluviales. En effet, la ripisylve, composée d'espèces de bois tendres (forêts pionnières), régulièrement inondée et fortement dépendante de la nappe, joue un rôle clé dans la préservation des cours d'eau et de la diversité biologique et rend de nombreux services écosystémiques : maintien des berges, zones de refuges, source de nutriments, lieux d'habitat, maintien des propriétés physico-chimiques de l'eau, régulation de la température de l'eau, épuration et phytofiltration (zones-tampon), zones de stockage permettant l'atténuation des crues, limitation de l'érosion des sols. Par contraste, les espèces de bois durs (forêts matures), présentes dans la zone non inondée de la forêt riveraine et remplaçant les forêts de bois tendres lorsque le niveau de l'eau diminue (abaissement de la nappe, déconnexion du chenal principal), causent non seulement la diminution de la diversité biologique mais aussi l'engraissement et la fixation des marges alluviales, qui augmentent la puissance des crues. C'est pourquoi, la volonté de maintenir la biodiversité des cours d'eau et de « retrouver le Rhône naturel » a amené les différents acteurs du Rhône et la communauté scientifique à établir (1) un plan de restauration des bras morts (lônes) afin de maintenir les formes fluviales en cours de comblement et (2) un schéma directeur de rélargissement du lit en vue de démanteler les casiers Girardon et de redonner au fleuve une certaine dynamique latérale.

La mise en œuvre des travaux de restauration et leur réussite en termes de maintien des formes fluviales sont corrélées à la dynamique sédimentaire du chenal. Les conséquences sur la restauration écologique de la dynamique partielle du lit, imposée par le laminage des crues et le tarissement sédimentaire, sont complexes et dépendent fortement du contexte local. Tant que les formes sont figées, la hauteur de la ligne d'eau est maintenue et la restauration des lônes, notamment telle qu'elle a été menée sur Pierre-Bénite et qu'elle le sera sur Donzère, est a priori durable. Prenons le cas de la restauration à Pierre-Bénite. Riquier (*in prep*) a observé une réduction de l'alimentation de la lône de Ciselande (Pierre-Bénite) suite à la migration vers l'aval du radier entre 2006 et 2011, qui entraine l'abaissement de la ligne d'eau au droit de l'entrée de la prise d'eau de Ciselande. L'alimentation des lônes est fortement influencée par le niveau de la ligne d'eau dans le chenal principal. Ainsi, des exhaussements dans les vieux Rhône peuvent entrainer une augmentation de la ligne d'eau, qui peut alors favoriser une mise en eau plus fréquente des lônes. Ces travaux soulèvent donc la question de la mobilité des formes dans le temps, qu'il est néanmoins difficile d'observer avec la résolution spatiale dont nous disposons (un point de relevé altimétrique tous les 500 m). Selon la même logique, la recharge sédimentaire est susceptible de modifier les conditions d'écoulement dans les bras restaurés. Il impose donc une certaine vigilance concernant la redynamisation du chenal principal afin que la seconde phase de restauration agissant sur les processus ne vienne pas affecter les premiers efforts de restauration.

La mise en œuvre du schéma de rélargissement est tout aussi complexe. Les effets positifs sont nombreux, notamment la diminution des risques de crue grâce à l'abaissement de la ligne d'eau par élargissement du chenal (à condition que la végétation ne prolifère pas sur les marges, favorisant alors leur engravement et le rétrécissement du chenal en eau), le transfert sédimentaire par érosion latérale et la préservation de la biodiversité au sein de la plaine alluviale. Cependant, ces travaux peuvent aussi

avoir des conséquences négatives sur les écosystèmes (libération de particules polluantes, prolifération d'espèces invasives) et la gestion du cours d'eau (érosion non maîtrisée des berges, discontinuité du transit sédimentaire pouvant perturber la navigation). Provansal et al. (2012) ont synthétisé (Figure 37) les différents enjeux relatifs aux actions de réactivation de la dynamique fluviale, des lits fluviaux et de leurs marges.

Cet apport de connaissance sur la dynamique actuelle du Rhône fournit ainsi des éléments pouvant aider aux opérations de réhabilitation en particuliers de restauration des bras morts, de recharge sédimentaire et de démantèlement des casiers pour redynamiser les marges en lien avec la qualité des habitats aquatiques.

Enjeux	Effets positifs potentiels de la réhabilitation	Effets négatifs potentiels de la réhabilitation
Rétablir le transfert sédimentaire	Apports des sédiments remobilisés au littoral en déficit	
Conservation et préservation des milieux et des espèces	Amélioration du fonctionnement écologique des marges (maintien de perturbations) et diversification des habitats par remise en eau d'anciens bras	Risque de favoriser le développement d'espèces invasives comme *Amorpha fruticosa* L., *Ludwigia* spp.
Pollution		Les sédiments remobilisés peuvent contenir des polluants (PCB, métaux...)
Navigation		La remobilisation de sédiments peut se traduire des dépôts au sein du chenal et la mobilité de ce chenal, incompatibles avec le maintien de la navigation
Risques (crue, érosion des berges)	Abaissement de la ligne d'eau à débit équivalent	(Ré)activation de phénomènes érosifs de terrains privés

Figure 37 : Synthèse des principaux enjeux identifiés sur le Rhône aval (Provansal et al., 2012)

2.2. … qui mériterait d'être complétée à l'avenir

La poursuite de ces travaux pourrait utilement tenir compte de l'évolution des formes fluviales dans le temps et dans les trois dimensions, à une échelle spatiale plus fine, afin de vérifier la pérennité des opérations de restauration des bras morts du Rhône et des marges alluviales. L'analyse de la bathymétrie et de l'évolution des formes fluviales pourrait par ailleurs être affinée par l'étude des variations latérales du chenal afin de compléter la spatialité des observations.

Les modélisations 1D réalisées sur quelques secteurs du Rhône dans le chapitre 5 donnent une idée de leur capacité de transport. Il pourrait être envisagé d'étendre cette étude à l'ensemble du linéaire. Néanmoins, ces simulations, réalisées dans une seule dimension, demeurent imprécises. La quantification des flux et le suivi de la migration des formes fluviales, qui permettraient de guider avec plus de précision les grandes opérations de restauration, nécessitent une modélisation en deux dimensions. L'élaboration d'un tel modèle requiert des données supplémentaires. La densification des données granulométriques sur le linéaire permettrait de travailler à une échelle plus fine et d'obtenir des données de transport solide plus précises à partir du modèle. Des campagnes de terrain pourraient être envisagées afin de compléter le patron granulométrique établi dans le chapitre 4. La granulométrie par imagerie pourrait constituer une solution alternative aux prélèvements, moins coûteuse et plus rapide à déployer et à post-traiter. Dans le cadre de cette thèse, des tests d'imagerie ont été réalisés avec un catamaran téléguidé, le Catarob, mais de nombreux problèmes techniques ont empêché de le déployer sur le Rhône (débits trop importants). La réinjection de graviers pourrait aussi être suivie par image aérienne (bathymétries successives à pas de temps court) ou par transpondeurs passifs (PIT-tags) pour mieux comprendre la migration des sédiments injectés et les vitesses de transit de la charge

solide. Ces résultats permettraient de caractériser la dynamique dans les vieux Rhône et d'améliorer ainsi les simulations.

2.3. Préconisation pour les gestionnaires : stratégie de gestion du Rhône

L'un des principaux enjeux auxquels doivent faire face les gestionnaires du Rhône est celui de la gestion du transit de la charge de fond et des conséquences associées en matière de navigation, de risque inondation et de qualité environnementale. Il est en effet nécessaire, pour maintenir la dynamique fluviale, les formes du lit et par conséquent la diversité des habitats aquatiques, d'assurer la continuité sédimentaire sur l'ensemble du linéaire. Or, les apports au Rhône ont chuté depuis les premières interventions humaines, les zones de stockage sédimentaires se sont multipliées et la capacité de transport a globalement diminué.

Si l'ouverture des vannes de fond est favorisée en période de crue, et non plus les évacuateurs de surface seuls, il est alors possible que le transport des graviers soit augmenté de part et d'autre du barrage. De plus, les sédiments fins stockés dans les retenues pourraient être évacués vers l'aval. Cette réflexion, relative à une nouvelle gestion des ouvrages en crue, mériterait d'être engagée au moment où on envisage d'introduire dans le fleuve une charge de petite taille dont la fréquence de mise en mouvement est plus importante.

Il s'agirait de mener une réflexion qui rejoint par ailleurs la question des chasses du Haut Rhône et leurs conséquences sur la faune piscicole. L'ouverture des vannes de fond systématique lors de la crue annuelle, permettrait de libérer des fines en quantités plus faibles que celles mesurées lors des grandes chasses, ce qui se révèlerait être moins nocif pour les populations aquatiques et éviterait des opérations lourdes, coûteuses et néfastes pour l'environnement. Réalisée à des débits de crues fréquentes, cette procédure permettrait de maitriser les flux sédimentaires afin d'éviter une concentration nocive en fines et une déstabilisation d'ouvrages à l'aval.

L'augmentation de la fréquence de charriage annuelle peut aussi être envisagée en diminuant le niveau des retenues afin (1) de réduire la section d'écoulement entrainant l'augmentation du débit et du transport solide et (2) d'augmenter la pente de la ligne d'eau comme en crue et de favoriser la capacité de transport dans les retenues, notamment là où du matériel graveleux est injecté afin que celui-ci transite. De plus, ces recharges permettraient de faciliter la mise en mouvement des graviers transitant dans les zones pavées lors des crues plus fréquentes (Q2, Q5, voire même en période de hautes eaux), et non plus seulement lors des crues morphogènes. Les réinjections envisagées pourraient présenter idéalement un D_{50} de 10 mm pour assurer un transit continu, voire inférieur à 35 mm en cas de suivi dans les vieux Rhône (chapitre 5). La charge solide déposée à l'aval immédiat des barrages, en pied de berge, serait reprise lors de crues fréquentes.

En définitive, la réalisation d'un plan de gestion détaillé des sédiments permettrait de localiser et de quantifier précisément les apports et les excès sédimentaires, et de définir ainsi des priorités en matière de réinjection. Afin d'assurer une pérennité dans le transport résiduel, la réinjection de sédiments plus petits que les sédiments constituant le pavage, susceptibles d'être facilement mis en mouvement dans le contexte hydraulique actuel, pourrait être envisagée à pas de temps répété, en fonction des ajustements du chenal. En parallèle, on pourrait promouvoir des rélargissements du chenal là où on favorise un transport solide afin de favoriser les dépôts et le développement associé d'une végétation pionnière qui fait défaut aujourd'hui sur une grande partie du Rhône. Ce qui amène à repenser la gestion de la végétation et les arasements de bancs afin d'optimiser la restauration du transport solide

et de la dynamique de la ripisylve. Enfin, il est nécessaire d'ouvrir une réflexion sur la gestion des barrages en crue et sur les potentialités d'optimisation du transit de la charge grossière où il est encore possible.

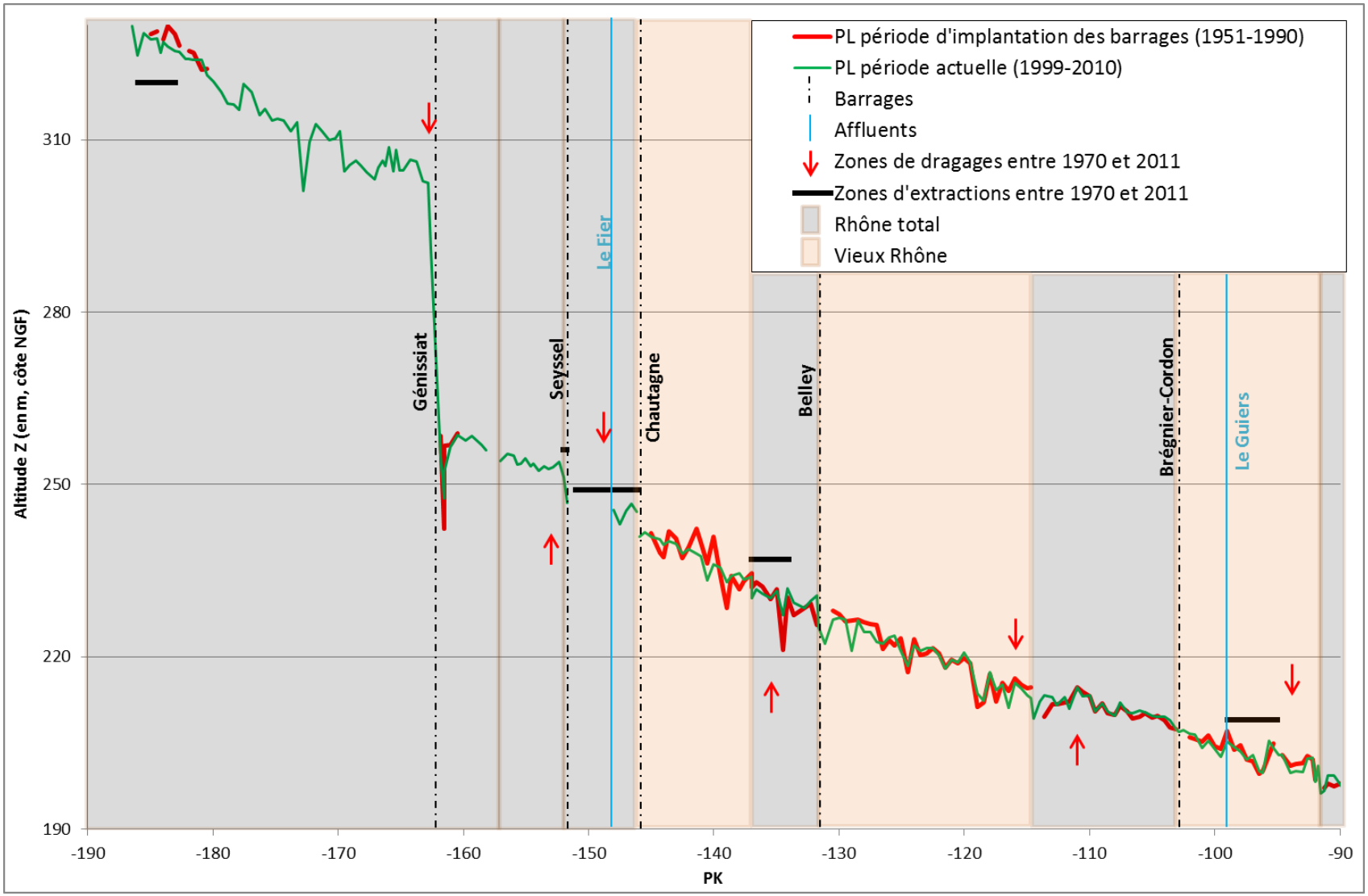
Annexes

Annexe 1 : Principales stations hydrométriques dans le bassin versant du Rhône (SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1)

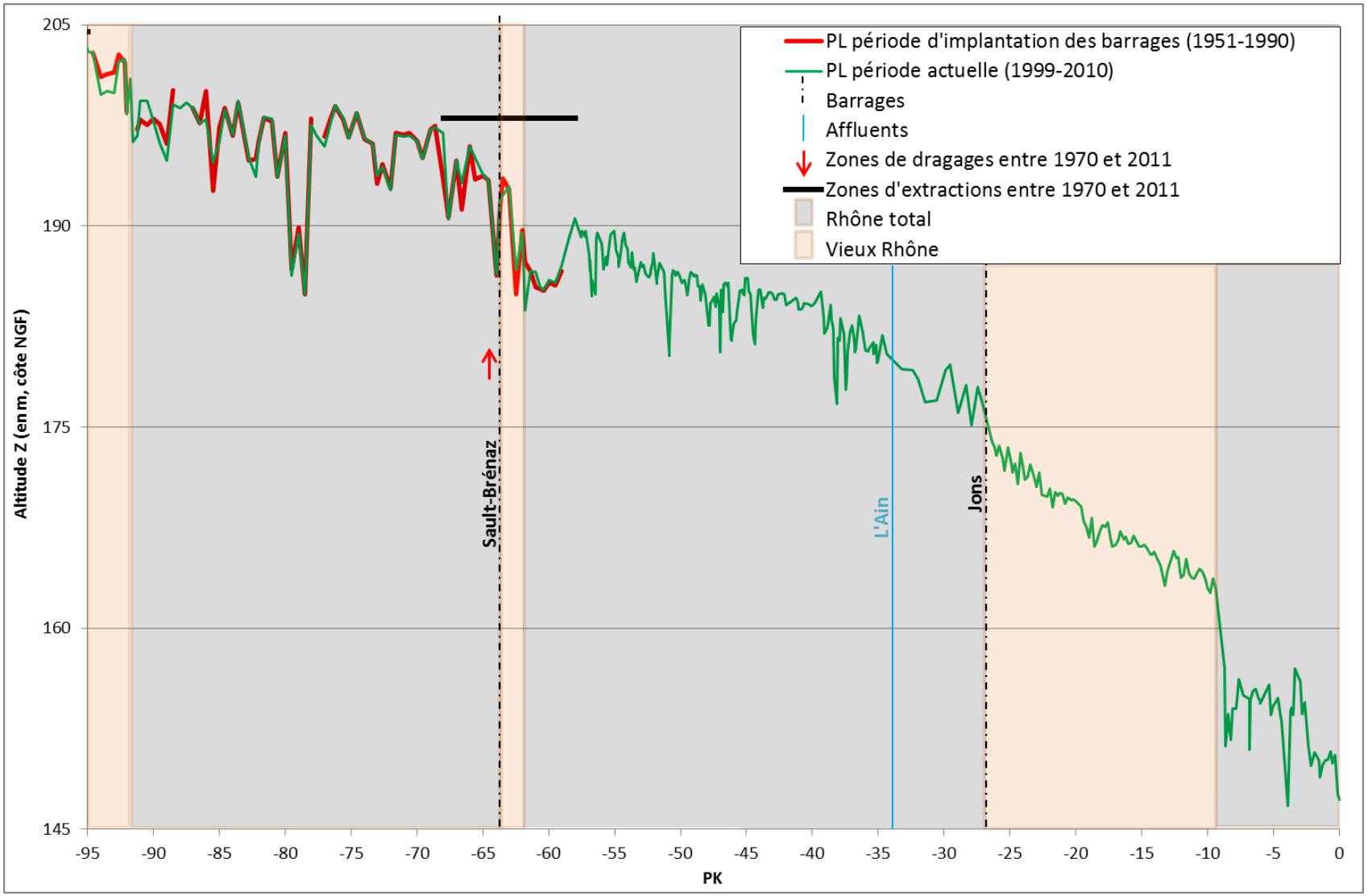
Annexe 2 : Typologie des ouvrages Girardon. Réalisée par Perial (2012), d'après Girardon (1894)

Type de travaux	Type d'ouvrage	Localisation dans le fleuve	Influence du niveau des eaux	Influences des paramètres physiques	Orientation	Forme / tracé	Intérêt
Concentration des eaux	barrage submersible	Les barrages se situent à l'entrée de "faux bras", plus précisément entre le faux bras et le bras principal	Les barrages doivent avoir un effet limité aux basses eaux. Ils doivent permettre aux hautes et moyennes eaux de s'étaler sur la plus grande surface possible de manière à limiter leur vitesse et à éviter le creusement du fond.	Orientation de la direction du courant		Le barrage doit être arasé au niveau à partir duquel la concentration des eaux n'est plus nécessaire	Les ouvrages permettent de réunir les eaux dans un chenal unique. le barrage permet de limiter l'entrée des basses eaux dans le faux bras. En revanche, il n'empêche pas les hautes eaux de passer.
	traverses	Les traverses sont localisées le long de "faux bras", et sont disposées à distances régulières				La largeur des traverses correspond à la largeur du bras secondaire	Les traverses assurent la solidité et diminuent la charge du barrage au moment du déversement. Elles divisent la chute totale et réduisent celle qui doit supporter chacun d'eux.
Fixation des profondeurs dans les parties courbes	digues	Les digues se situent en position concave du fleuve. Aucune digue ne doit être positionnée en rive convexe. La rive convexe doit avoir la forme d'une plage en pente douce.		Creusement du plancher alluvial		Les rives unies et levées favorisent les profondeurs. Plus la courbure de la rive est prononcée et plus les profondeurs sont grandes et proches de la rive	Les digues assurent la fixation des profondeurs en rive concave et limitent les dépôts.
Tracé de la rive concave	digues	Les digues se situent en position concave du fleuve	Tant que le niveau d'eau reste faible, le rôle de la digue est assuré. Le couronnement des digues doit être placé à une hauteur telle qu'elle contienne les eaux aussi longtemps qu'il y a un intérêt à les concentrer pour augmenter le mouillage. Dans les conditions particulières du Rhône, le niveau ne doit pas dépasser 1.00 m environ au dessus des plus basses eaux.	.		Il est impératif que la digue soit continue pour que son action soit continue. Il faut que la courbure de la digue diminue à mesure que le thalweg s'éloigne de celle-ci. De même que sa hauteur, celle-ci est maximale au niveau du sommet de la courbure et diminue à mesure de l'inflexion et de la courbure	
	traverses, tenons ou rattachements		Les ouvrages transversaux assurent leur fonction pendant les périodes de hautes eaux. Lorsque le niveau d'eau augmente, le rôle de la digue n'est plus assuré. L'augmentation des eaux peut provoquer un affouillement du pied de la digue, celle-ci peut être emportée par le courant, les bateaux pourraient être entrainés sur les digues par le courant transversal de déversement. Les ouvrages transversaux reliés à la digue permettent de s'opposer à cet effet.	Changement de direction du courant	Ces ouvrages sont orientés vers l'amont à partir de la berge continentale et ils descendent en pente depuis cette berge jusqu'à la digue.	Plus les eaux tendent à sortir du chenal violemment et plus leur pente longitudinale vers le chenal doit être forte	Ces ouvrages assurent de par leur orientation ainsi que leur pente la concentration du courant sur l'axe du chenal principal et s'opposent à la formation de courants secondaires et au déversement des eaux.
Tracé de la rive convexe	épis plongeants	Les épis plongeants sont placés en rive convexe.			Les épis plongeant doivent être orientés de manière à rejeter le courant principal sur la ligne du thalweg. La pente des épis diminue de la berge vers le chenal;	L'épi présent au point de courbure le plus prononcé doit être celui dont l'inclinaison doit être la plus prononcée : c'est-à-dire qu'il doit posséder l'altitude la plus élevée près de la berge et la pente de son profil en long est la plus forte. De part et d'autre de ce maximum, la longueur, l'altitude et la pente des autres épis diminuent progressivement.	Les épis plongeants permettent de consolider ou de former des plages à pentes douces dans les rives convexes.
Position de l'inflexion - Fixité du seuil	épis noyés, seuils de fond	Les épis noyés sont établis en profondeurs suffisante pour ne pas gêner la navigation et éviter les perturbations de surface. Ils sont disposés les uns à la suite des autres. Lorsque la consolidation du lit est nécessaire, les épis noyés sont alors prolongés jusqu'à la rive opposée, on parle alors de "seuils de fond ».		Changement de direction du courant. Les épis servent à fixer les seuils, dirigent l'inflexion et limitent le creusement excessif du lit.	Les épis doivent être orientés vers l'amont à partir de la rive	Les épis doivent être en pente à partir de la rive. L'épi présent au plus près du sommet de la courbe doit avoir son enracinement plus bas que les autres, sa pente plus accentuée et son extrémité en rivière plus profonde. Les épis suivants se relèvent peu à peu et leur pente diminue à mesure qu'on s'éloigne du sommet de la courbe.	

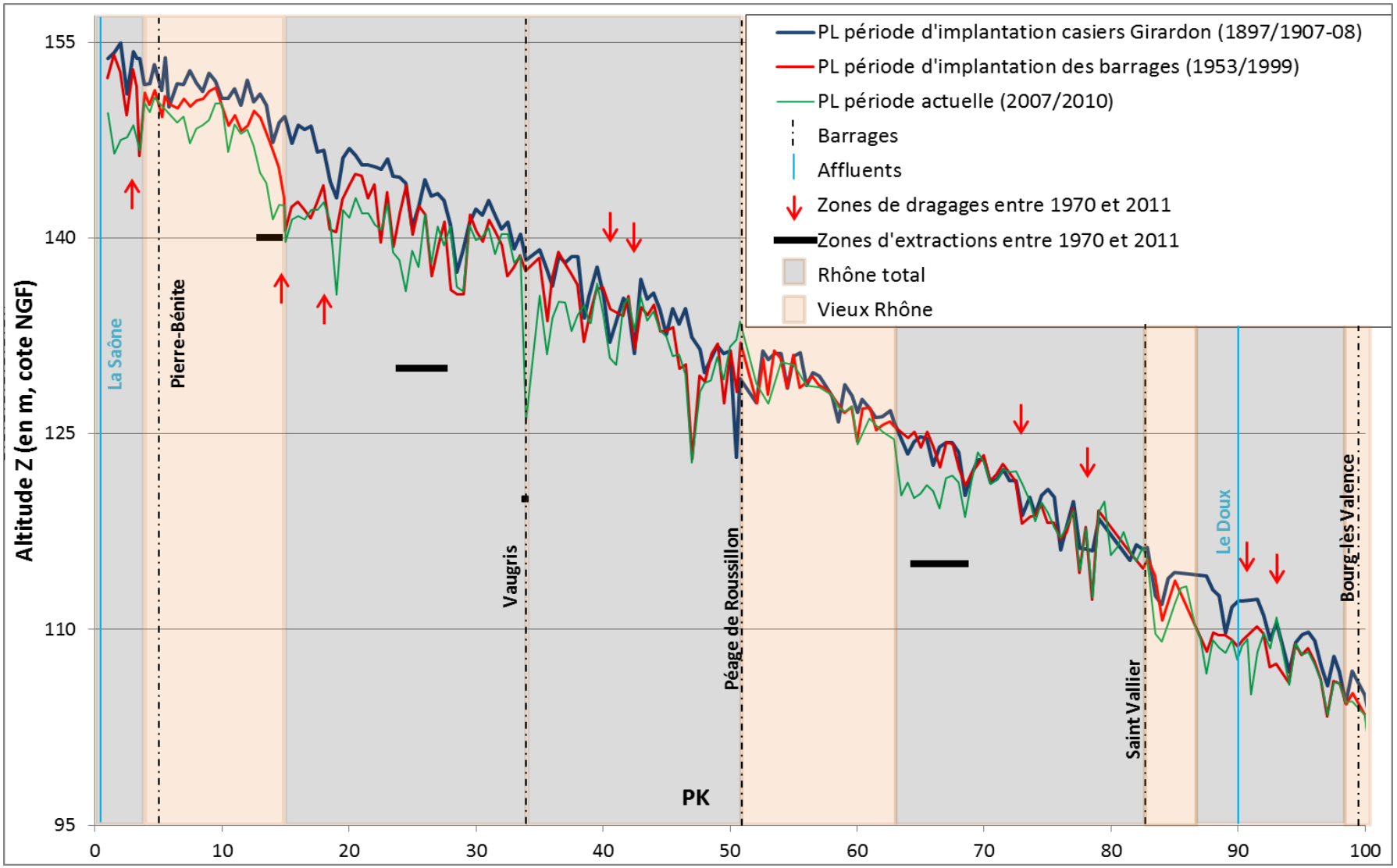
Annexe 3 : Profils en long entre les PK-190 et -90 de la période de mise en service des aménagements CNR (rouge) et de la période récente (vert)



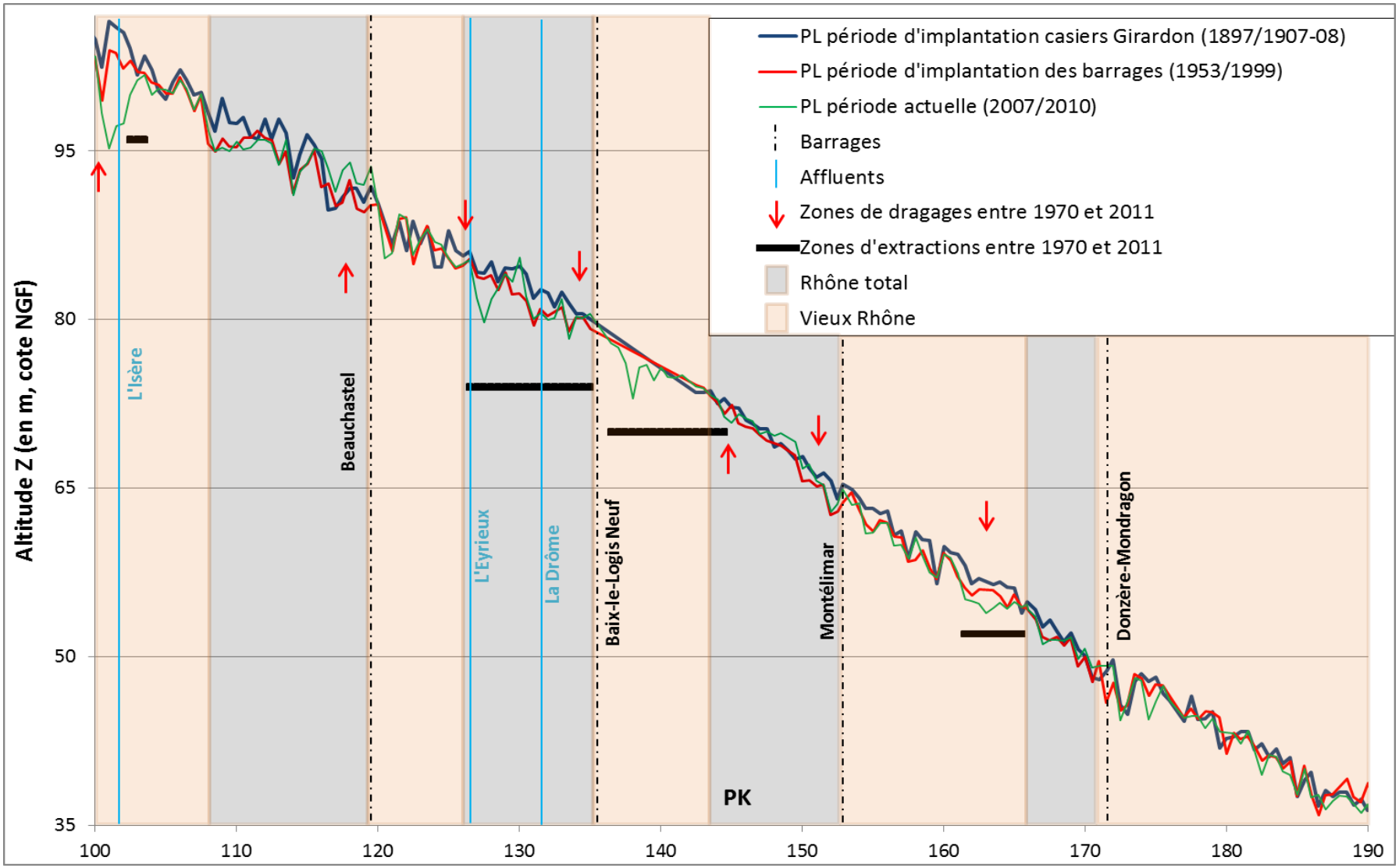
Annexe 4 : Profils en long entre les PK-95 et 0 de la période de mise en service des aménagements CNR (rouge) et de la période récente (vert)



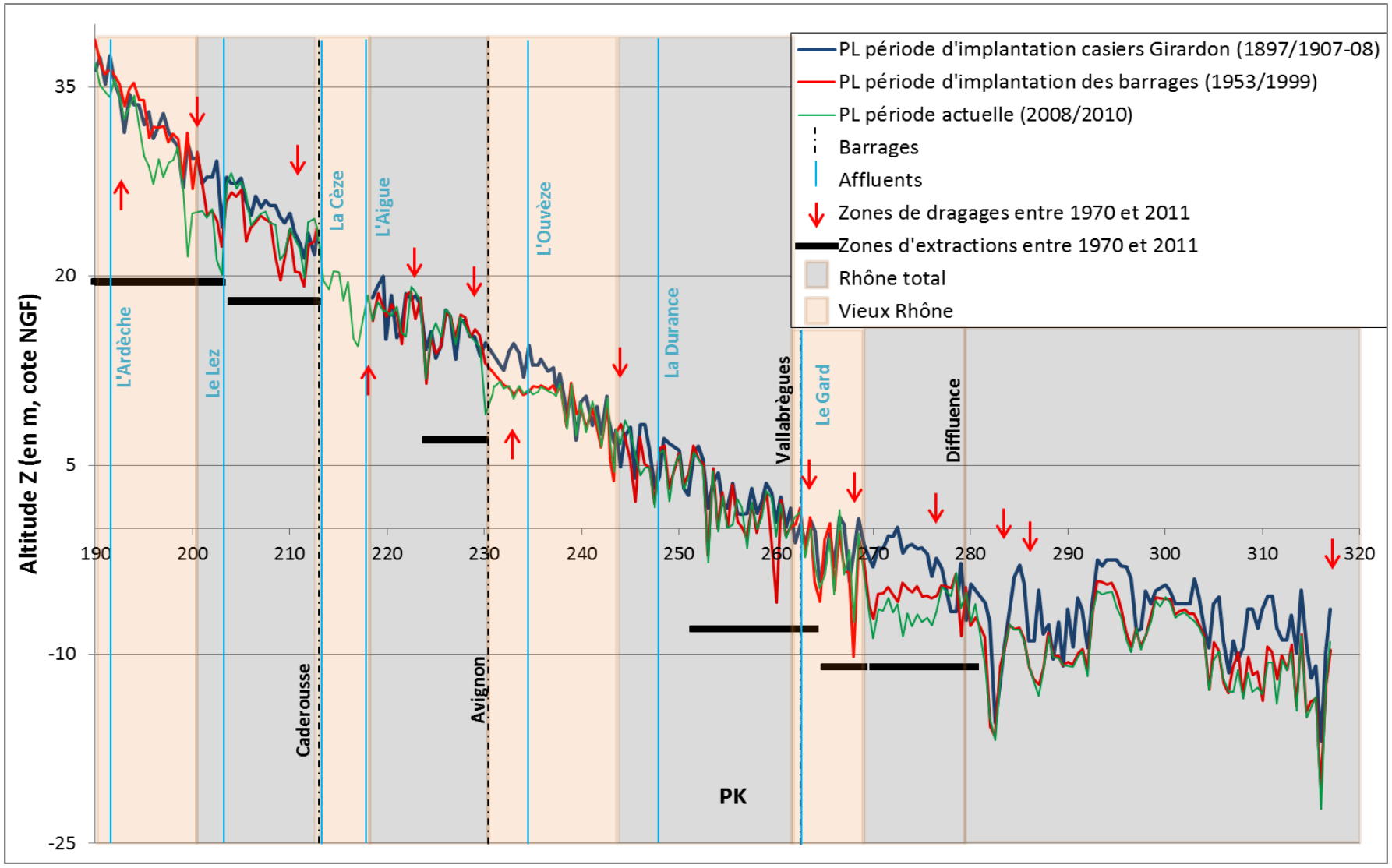
Annexe 5 : Profils en long entre les PK0 et 100 de la période de construction des casiers Girardon (bleu), de mise en service des barrages (rouge) et de la période récente (vert)



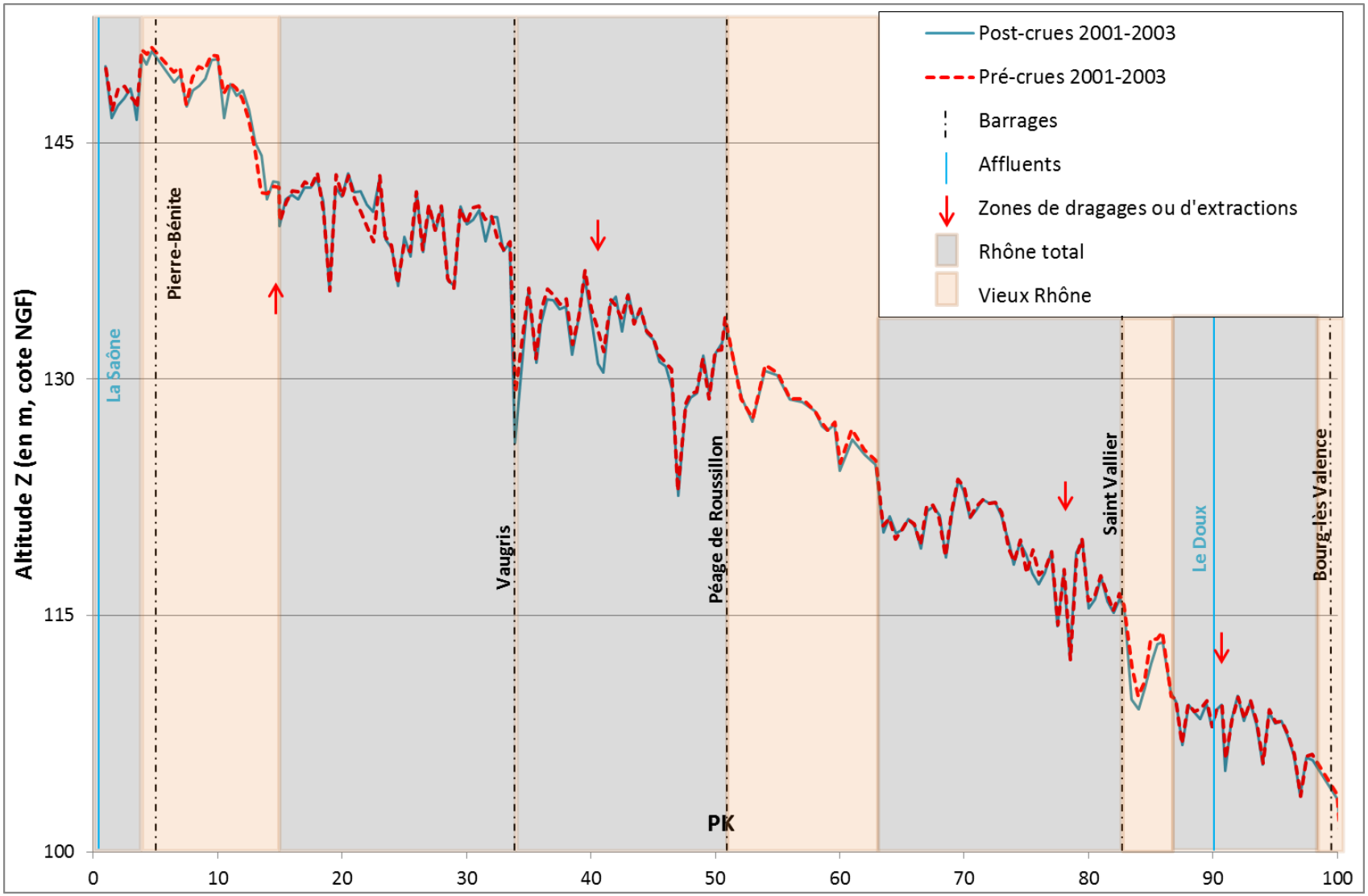
Annexe 6 : Profils en long entre les PK100 et 190 de la période de construction des casiers Girardon (bleu), de la mise en service des barrages (rouge) et de la période récente (vert)



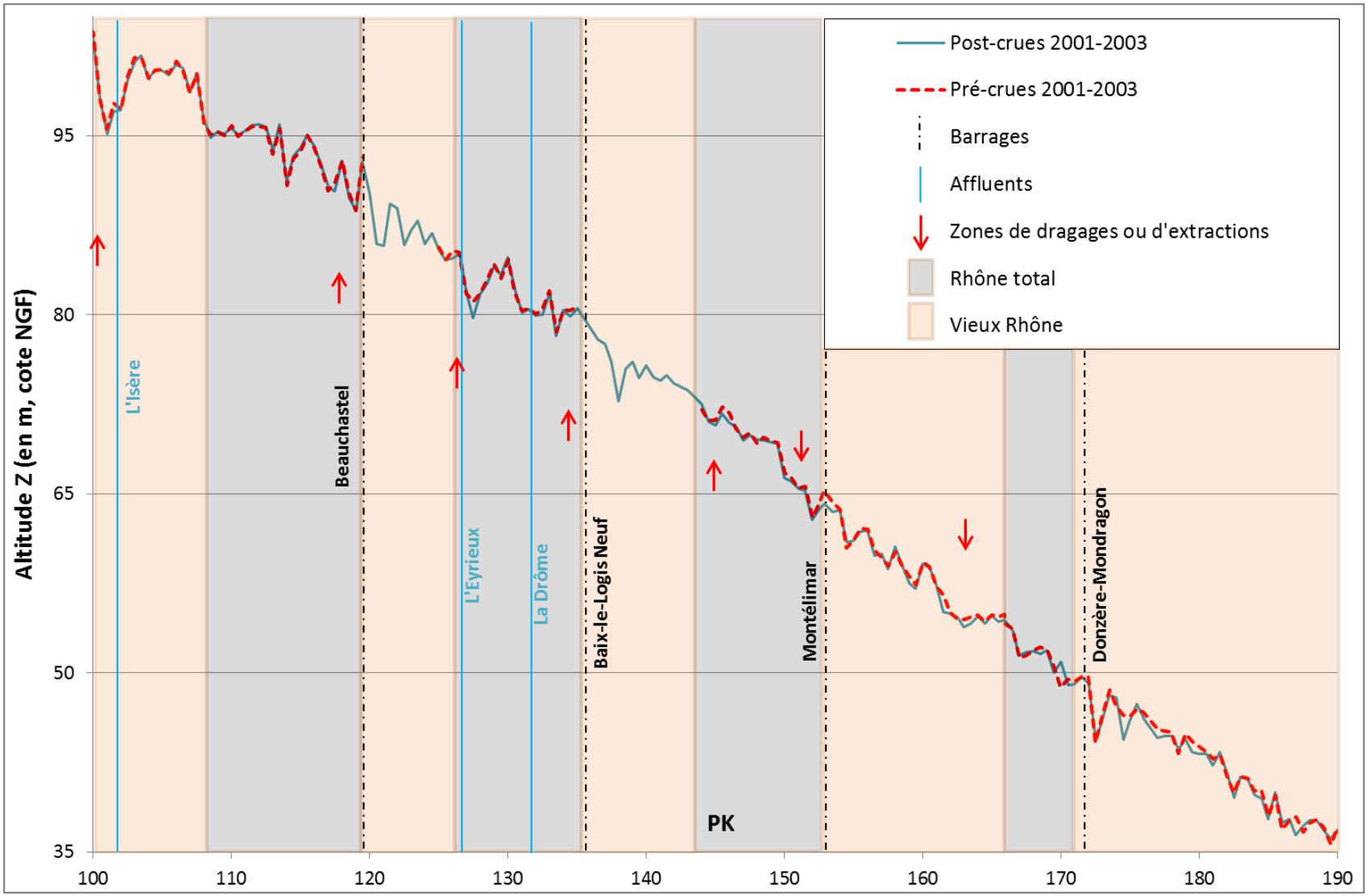
Annexe 7 : Profils en long entre les PK190 et 320 de la période de construction des casiers Girardon (bleu), de la mise en service des barrages (rouge) et de la période récente (vert)



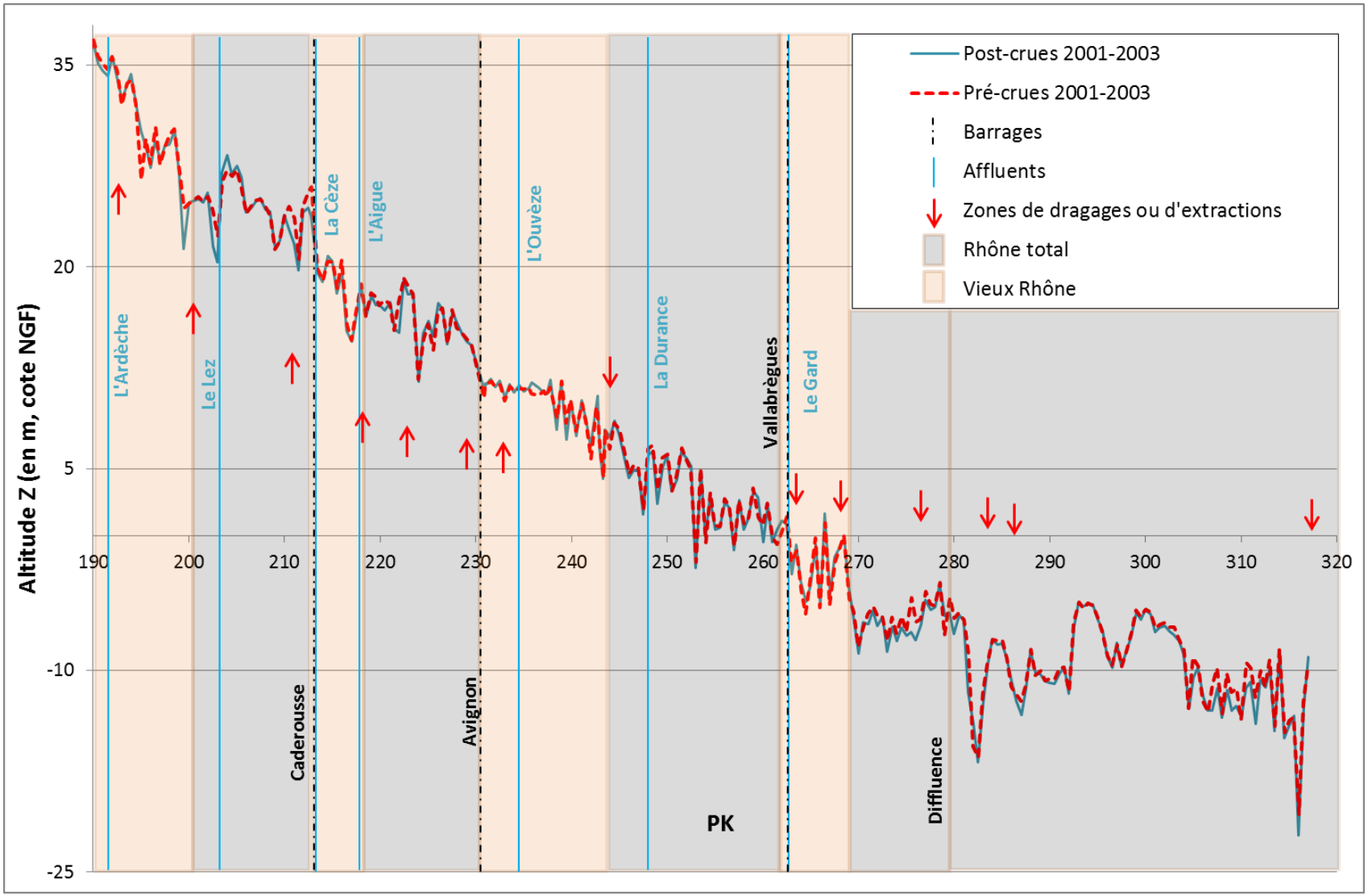
Annexe 8 : Profils en long entre les PK 0 et 100 avant les crues de 2001 à 2003 (1996/2000 en pointillés rouge) et après les crues (2004/2007 en bleu)



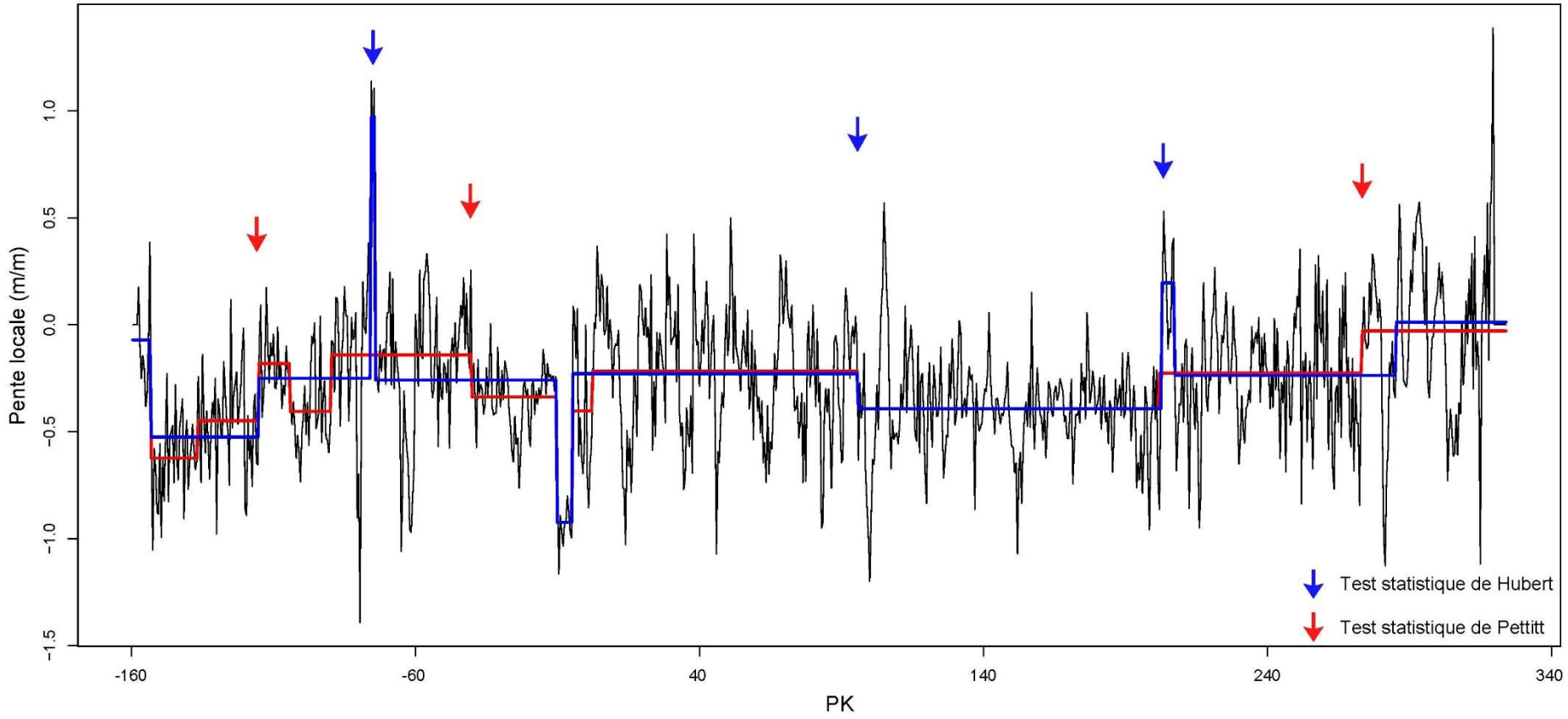
Annexe 9 : Profils en long entre les PK 100 et 190 avant les crues de 2001 à 2003 (1996/2000 en pointillés rouge) et après les crues (2004/2007 en bleu)



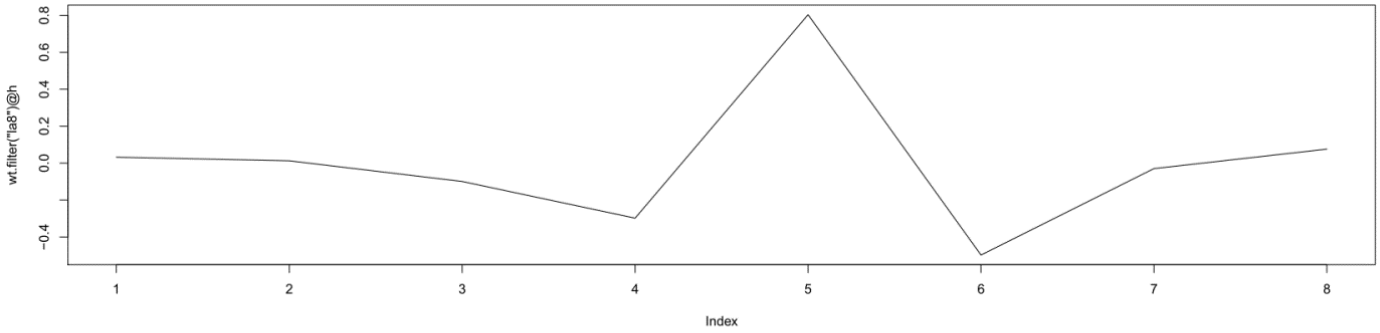
Annexe 10 : Profils en long entre les PK 190 et 320 avant les crues de 2001 à 2003 (1996/2000 en pointillés rouge) et après les crues (2004/2007 en bleu)

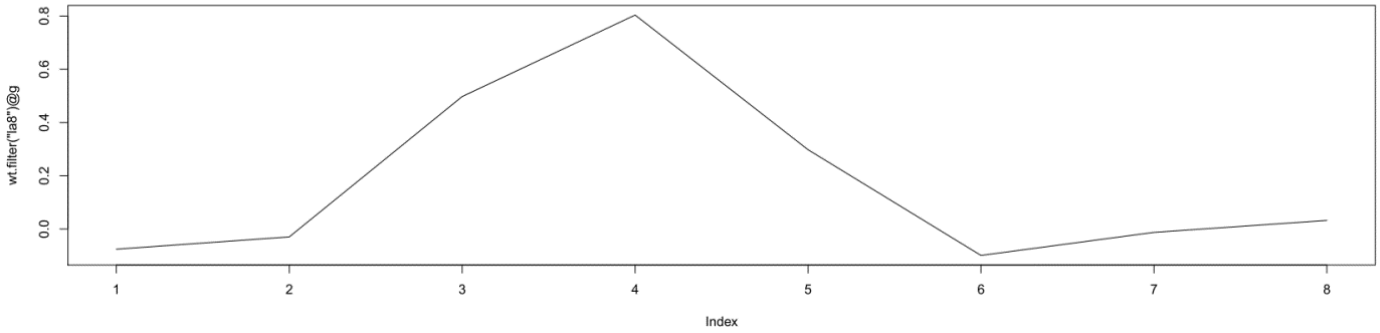


Annexe 11 : Analyses statistiques de Pettitt (1979, en rouge) et Hubert (2000, en bleu) sur la pente locale du profil en long

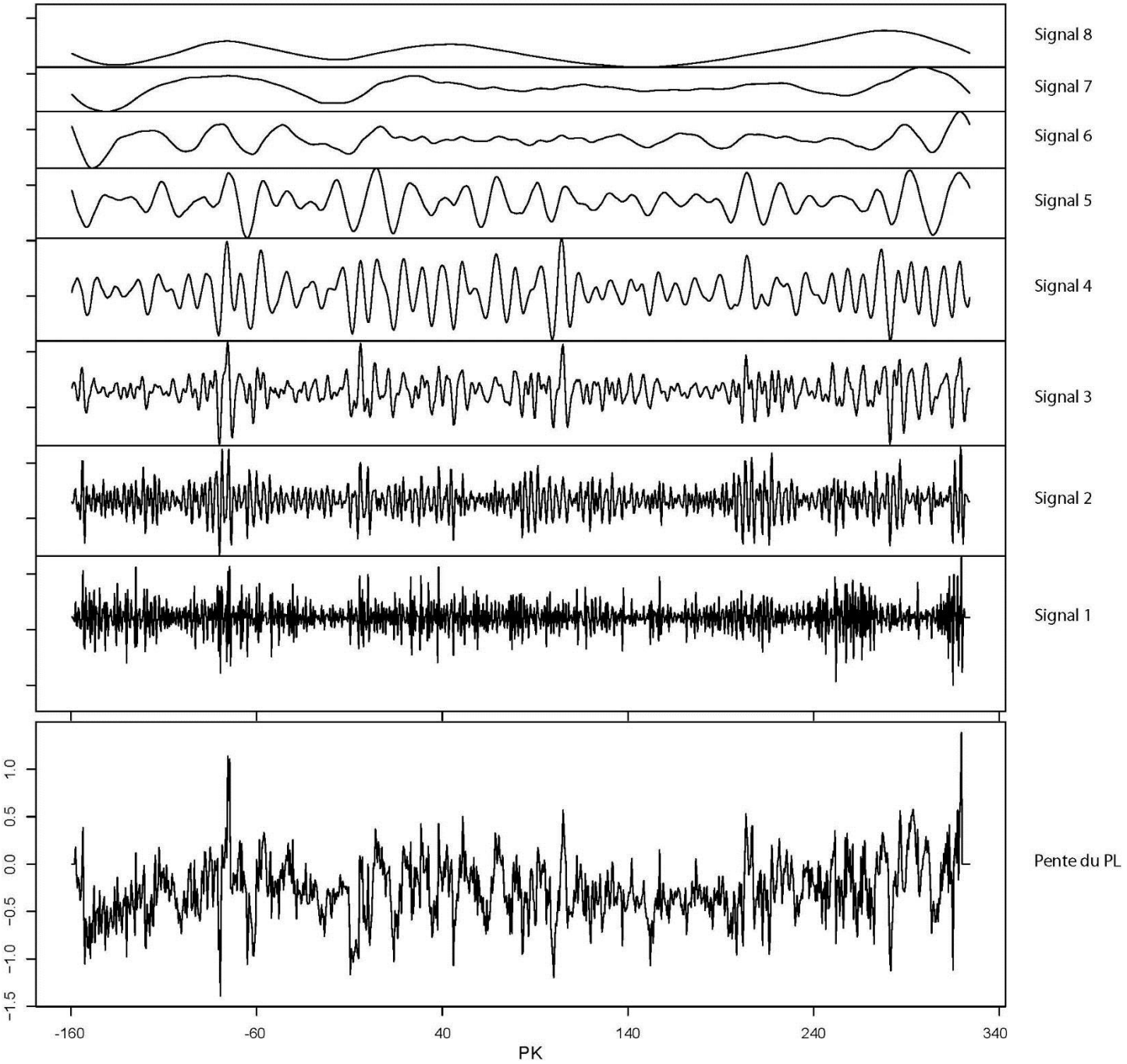


Annexe 12 : Fenêtre glissante représentant deux filtres: la fonction d'ondelette (première fenêtre) et la fonction d'échelle (deuxième fenêtre)

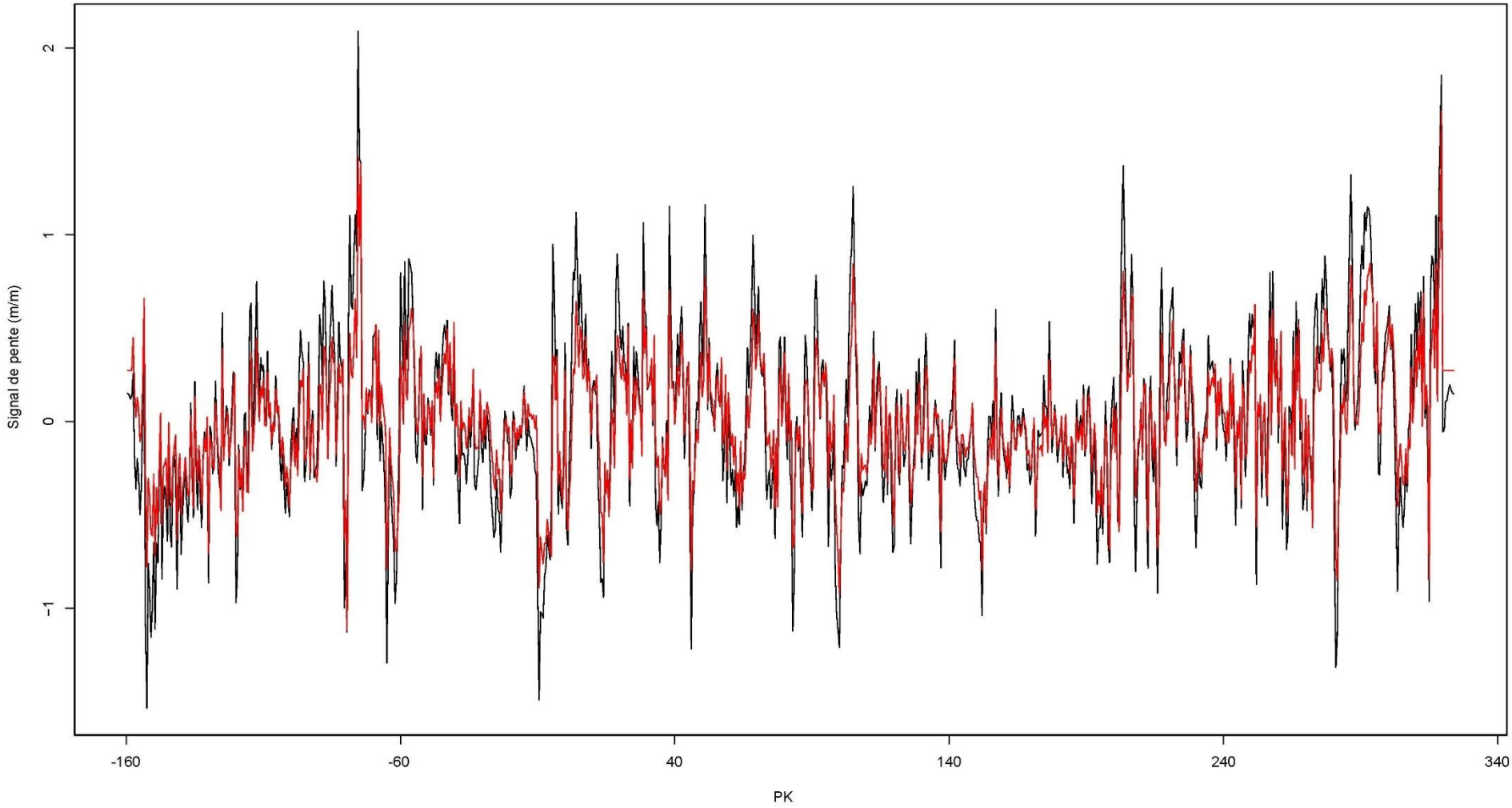




Annexe 13 : Décomposition du signal de pente locale (Génissiat exclu)



Annexe 14 : Recomposition du signal de pente à partir des signaux obtenus par la méthode des ondelettes



Annexe 15 : Synthèse des paramètres physiques des formes par tronçon homogène. L'indice de rugosité correspond au rapport de l'amplitude (A) sur la période (P).

N° Tronçon	Pente moy	Largeur chenal moy	Amplitude moy	Amplitude min	Amplitude max	Période moy	Période min	Période max	Indice rugosité moy (A/P)	Nombre seuil	Hauteur seuil moy	Hauteur seuil min	Hauteur seuil max	Nombre mouille	Hauteur mouille moy	Hauteur mouille min	Hauteur mouille max
1	1,42	126,41	3,29	1,36	5,11	2637	886	4276	0,001	5	1,71	0,84	2,63	5	1,47	0,52	2,88
2	1,72	108,02	9,83	1,36	44,68	2391	529	4605	0,004	6	4,79	0,26	17,69	5	2,70	0,33	7,59
3	0,07	153,10	8,04	1,46	29,70	2152	1339	3947	0,004	4	2,09	1,10	3,34	4	8,52	0,35	26,98
4	0,95	218,71	3,97	1,88	7,49	2107	935	4960	0,002	3	0,98	0,70	1,22	3	3,61	1,27	6,47
5	1,08	90,87	3,12	1,65	5,03	1934	1372	3050	0,002	4	1,34	1,12	1,83	4	1,72	0,53	3,20
6	1,23	229,48	4,00	1,44	7,39	1455	69	2245	0,003	4	1,94	0,99	3,28	5	2,01	0,08	5,26
7	0,84	99,77	4,82	2,30	7,43	2067	610	3304	0,002	6	2,34	1,48	3,96	6	2,52	1,21	4,44
8	0,27	209,80	3,63	1,17	8,12	1979	125	3883	0,002	7	1,40	0,31	3,65	7	2,05	0,27	4,46
9	1,19	93,13	3,05	1,99	5,06	2696	1997	3483	0,001	2	1,97	0,43	3,50	2	1,59	1,56	1,62
10	0,65	114,67	4,15	1,40	6,09	1571	475	3477	0,003	5	2,00	0,13	3,10	5	2,18	1,27	3,02
11	0,43	180,41	6,61	4,30	12,02	3320	2043	4095	0,002	5	3,01	1,18	4,77	4	3,81	2,12	7,25
12	0,39	265,04	4,03	1,27	7,73	1943	687	3629	0,002	6	1,59	0,74	2,83	6	2,29	0,10	4,90
13	1,03	96,37	5,42	3,09	6,62	1612	659	3996	0,003	2	3,03	1,34	4,73	2	1,82	1,75	1,89
14	0,28	162,99	2,71	0,15	6,74	1021	220	5087	0,003	12	1,18	0,14	2,18	12	1,62	0,02	5,54
15	0,07	130,07	2,53	0,54	4,96	1039	180	2702	0,002	8	0,88	0,23	1,89	9	1,55	0,31	3,74
16	1,52	136,18	7,48	5,05	10,34	981	727	1453	0,008	2	2,39	1,90	2,89	2	5,38	3,31	7,44
17	0,62	139,98	1,98	0,64	3,84	1252	199	2538	0,002	9	1,28	0,14	2,84	9	0,78	0,10	1,45
18	0,59	71,09	3,49	0,11	10,38	652	97	2775	0,005	27	1,61	0,03	4,93	26	1,78	0,08	5,95
19	0,56	209,68	3,78	1,52	6,22	830	388	1581	0,005	3	0,73	0,34	1,27	4	3,07	1,19	5,46
20	1,04	173,99	4,65	0,97	10,91	938	120	1710	0,005	7	2,75	0,77	4,18	7	2,03	0,19	6,73
21	0,57	246,54	3,08	2,65	3,88	2019	1824	2148	0,002	2	0,88	0,70	1,06	2	1,99	1,95	2,02
22	0,65	118,83	2,34	0,23	4,88	1414	416	3002	0,002	8	0,98	0,01	1,94	7	1,35	0,10	2,96
23	0,27	225,56	3,87	0,58	7,01	1918	1002	3015	0,002	5	1,57	0,55	2,65	6	2,27	0,02	5,41
24	0,51	242,14	6,11	2,58	10,52	2173	1498	2974	0,003	4	2,65	2,04	3,18	4	3,51	0,54	7,34
25	0,22	296,85	4,04	0,84	6,88	1814	291	3057	0,002	10	1,81	0,77	3,60	9	2,14	0,06	5,00
26	0,43	143,66	3,10	0,66	5,86	2044	557	3461	0,002	6	1,08	0,43	1,97	6	2,17	0,23	3,89
27	0,33	278,12	4,18	1,45	7,79	2022	287	3471	0,002	10	1,70	0,21	2,99	10	2,40	0,38	4,80
28	0,64	145,38	6,06	6,06	6,07	3760	3521	4000	0,002	1	2,59	2,59	2,59	1	3,48	3,48	3,48
29	0,10	241,23	3,19	1,22	4,55	2195	813	3003	0,001	3	1,25	0,60	2,25	4	2,14	0,62	3,48
30	1,81	281,47	4,03	2,02	5,96	2436	885	3983	0,002	3	1,74	1,19	2,05	3	2,12	0,03	3,76
31	0,14	149,16	3,07	2,48	3,81	4285	2601	5831	0,001	2	1,99	1,78	2,20	1	0,71	0,71	0,71
32	0,65	313,77	3,96	0,51	10,88	1627	554	3016	0,002	6	1,60	0,39	2,68	7	2,32	0,12	8,53
33	0,71	160,85	3,04	1,10	4,53	1371	419	2159	0,002	6	1,54	0,70	2,48	5	1,36	0,11	2,88
34	0,05	258,49	3,01	1,02	4,13	2081	1194	3020	0,001	2	1,55	0,49	2,61	3	1,75	0,53	3,21
35	0,25	307,82	2,14	0,37	3,58	1355	981	2278	0,002	3	1,03	0,25	1,52	3	1,31	0,13	2,06

N° Tronçon	Pente moy	Largeur chenal moy	Amplitude moy	Amplitude min	Amplitude max	Période moy	Période min	Période max	Indice rugosité moy (A/P)	Nombre seuil	Hauteur seuil moy	Hauteur seuil min	Hauteur seuil max	Nombre mouille	Hauteur mouille moy	Hauteur mouille min	Hauteur mouille max
36	0,53	163,39	1,86	0,74	4,09	2197	968	3491	0,001	4	0,66	0,24	1,07	3	0,00	0,15	3,02
37	1,01	512,31	2,13	1,15	4,92	2137	1070	4083	0,001	4	0,82	0,46	1,84	4	0,00	0,66	1,11
38	0,70	148,42	2,74	1,42	5,96	2894	1410	5041	0,001	5	1,28	0,63	1,62	5	0,00	0,79	4,45
39	0,98	292,93	2,20	1,80	3,11	1213	497	2611	0,002	3	1,48	1,31	1,59	4	0,00	0,49	1,57
40	0,69	139,51	2,00	0,14	4,49	1840	926	3419	0,001	11	0,99	0,08	1,86	11	0,00	0,05	3,25
41	1,26	176,22	4,09	1,62	8,05	2310	1990	3469	0,002	4	1,62	0,74	3,31	4	0,00	0,88	4,73
42	2,66	317,18	7,24	6,69	7,78	3267	3017	3516	0,002	1	2,07	2,07	2,07	1	0,00	4,62	4,62
43	0,75	421,10	5,23	3,00	9,98	2561	1773	3480	0,002	4	2,18	1,01	3,27	4	0,00	1,99	6,71
44	0,97	220,75	2,81	1,44	4,48	1410	914	2000	0,002	3	1,74	1,38	1,98	2	0,00	0,06	2,62
45	0,20	392,02	2,91	0,90	6,89	1683	990	2480	0,002	5	1,34	0,18	3,29	6	0,00	0,23	3,60
46	0,97	270,95	2,18	0,47	5,19	1788	1007	2649	0,001	4	0,95	0,21	1,84	3	0,00	0,10	3,36
47	0,31	157,29	2,70	0,93	4,03	1762	971	2677	0,002	5	1,15	0,67	1,88	6	0,00	0,26	2,72
48	1,53	438,40	3,33	1,49	4,75	1591	1118	2012	0,002	3	0,86	0,43	1,47	3	0,00	1,05	2,89
49	0,47	471,29	3,86	1,35	8,63	1524	989	2498	0,003	10	1,46	0,73	2,28	10	0,00	0,36	6,35
50	0,04	240,00	5,11	2,69	9,11	1504	938	3041	0,003	5	2,65	1,12	4,88	4	0,00	1,26	2,86
51	0,04	262,36	2,36	0,73	5,36	1435	974	2014	0,002	4	0,90	0,08	1,81	4	0,00	0,13	4,23
52	0,74	259,17	1,94	0,94	2,84	1959	1502	2491	0,001	2	1,23	0,93	1,54	2	0,00	0,01	1,51
53	2,85	264,23	7,45	4,48	9,28	3371	2409	4535	0,002	1	3,17	3,17	3,17	2	0,00	1,31	5,43
54	0,41	374,52	3,84	0,53	6,74	3016	2532	3964	0,001	2	3,10	2,36	3,84	2	0,00	0,48	2,90
55	0,15	467,86	3,91	0,85	12,74	2247	900	5938	0,002	15	1,67	0,05	4,33	14	0,00	0,51	8,42

Annexe 16 : Données brutes des paramètres physiques caractérisant les méso-formes fluviales en chaque point du talweg à partir de l'analyse des extrema et de la moyenne mobile

PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon	PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon
-186,43	5,11	886,04	2,23	1	-121,49	4,67	2487,29	-1,50	7
-186,03	4,42	1861,03	-2,88	1	-119,99	6,64	2079,84	3,17	7
-185,54	2,40	1601,18	1,54	1	-119,00	7,43	1697,33	-3,47	7
-184,16	1,69	1907,90	-0,86	1	-117,91	5,17	915,81	3,96	7
-183,94	1,36	3083,64	0,84	1	-117,31	2,30	610,41	-1,21	7
-182,26	1,81	3450,79	-0,52	1	-117,00	5,55	1846,46	1,09	8
-180,86	3,06	3301,81	1,29	1	-116,69	8,12	2141,69	-4,46	8
-178,81	4,40	2507,24	-1,77	1	-115,15	7,63	1551,93	3,65	8
-177,55	3,93	4276,29	2,63	1	-114,55	4,79	2925,10	-3,98	8
-176,30	4,67	3498,61	-1,31	1	-113,60	2,87	2595,54	0,80	8
-173,28	10,95	1527,38	3,36	2	-111,63	3,89	2022,54	-2,06	8
-172,80	11,34	3293,79	-7,59	2	-111,00	3,76	2002,54	1,82	8
-171,75	6,30	3151,18	3,75	2	-109,61	2,24	1608,59	-1,94	8
-169,51	2,81	2409,20	-2,55	2	-109,00	1,18	1401,49	0,31	8
-168,60	2,07	2670,50	0,26	2	-108,00	2,12	1005,40	-0,88	8
-167,10	4,46	1474,28	-1,81	2	-107,60	1,51	3599,10	1,25	8
-165,93	3,86	529,10	2,64	2	-106,99	1,17	3883,34	-0,27	8
-165,62	2,24	814,39	-1,21	2	-104,00	1,68	1001,69	0,91	8
-165,40	1,36	2580,51	1,03	2	-103,11	4,27	125,28	-0,77	8
-164,81	18,03	3247,45	-0,33	2	-103,00	5,06	2507,03	3,50	9
-162,82	44,68	4605,32	17,69	2	-102,98	1,99	3482,67	-1,56	9
-161,56	29,70	3947,09	-26,98	3	-100,49	2,05	2797,26	0,43	9
-158,21	8,11	2213,17	2,72	3	-99,50	3,10	1996,59	-1,62	9
-157,61	6,59	2218,98	-5,39	3	-97,70	2,76	696,56	1,48	10
-156,00	1,55	1339,38	1,20	3	-97,50	1,40	1005,86	-1,27	10
-155,39	1,46	1474,38	-0,35	3	-97,00	3,15	1318,14	0,13	10
-154,66	2,45	2312,96	1,10	3	-96,50	6,09	2492,95	-3,02	10
-153,92	4,69	2341,28	-1,35	3	-95,68	5,57	3477,41	3,07	10
-152,35	9,81	1368,06	3,34	3	-94,00	5,60	2003,21	-2,50	10
-151,58	7,49	2078,82	-6,47	4	-92,20	4,85	521,51	3,10	10
-150,98	2,29	1985,84	1,02	4	-92,00	3,96	475,39	-1,75	10
-149,50	1,97	934,79	-1,27	4	-91,68	4,59	1187,51	2,21	10
-148,99	3,78	956,36	0,70	4	-91,53	3,56	2528,69	-2,38	10
-148,57	4,30	4581,29	-3,07	4	-90,49	4,30	3037,85	1,18	11
-148,04	1,88	4960,34	1,22	4	-89,00	4,70	3504,70	-3,12	11
-143,98	1,78	1489,78	-0,66	5	-87,46	4,34	3845,42	1,59	11
-143,08	1,65	2077,61	1,12	5	-85,49	5,74	2892,60	-2,76	11
-142,49	1,81	1962,31	-0,53	5	-83,61	5,11	3603,76	2,98	11
-141,00	4,49	1626,27	1,29	5	-82,60	6,65	4095,04	-2,12	11
-140,53	5,03	1529,43	-3,20	5	-80,01	11,77	2043,48	4,52	11
-139,37	4,32	1371,67	1,83	5	-78,50	12,02	3492,35	-7,25	11
-139,00	3,62	2364,98	-2,49	5	-77,96	4,88	3365,46	4,77	11
-138,00	2,22	3050,08	1,14	5	-75,01	1,27	1007,20	-0,10	12
-136,64	2,07	2244,70	-1,08	6	-74,60	1,71	996,70	1,17	12
-134,95	2,22	1048,67	0,99	6	-74,01	1,27	2000,46	-0,54	12
-134,39	2,59	995,67	-1,23	6	-73,60	3,35	2598,19	0,74	12
-133,90	1,44	2222,76	1,36	6	-72,00	3,99	2387,60	-2,61	12
-133,40	3,36	1768,30	-0,08	6	-71,00	2,25	2407,01	1,38	12
-131,68	5,66	69,01	3,28	6	-69,62	2,59	1994,98	-0,87	12
-131,63	4,51	478,16	-2,38	6	-68,60	6,42	2605,58	1,72	12
-131,61	7,39	2114,80	2,13	6	-67,62	7,52	3629,35	-4,69	12
-131,15	6,74	2152,53	-5,26	6	-65,99	7,73	2305,54	2,83	12
-129,50	5,92	1000,10	1,48	7	-63,99	6,64	696,60	-4,90	12
-129,00	6,21	2029,51	-4,44	7	-63,69	3,62	686,66	1,74	12
-128,50	3,08	2697,20	1,77	7	-63,30	6,62	794,95	-1,89	13
-126,97	3,21	2481,89	-1,31	7	-63,00	6,48	996,91	4,73	13
-125,80	5,07	3303,53	1,90	7	-62,50	3,09	658,66	-1,75	13
-124,49	4,93	2997,22	-3,17	7	-62,00	5,49	3996,08	1,34	13
-122,50	3,25	2502,44	1,76	7	-61,84	6,33	5086,55	-4,15	14

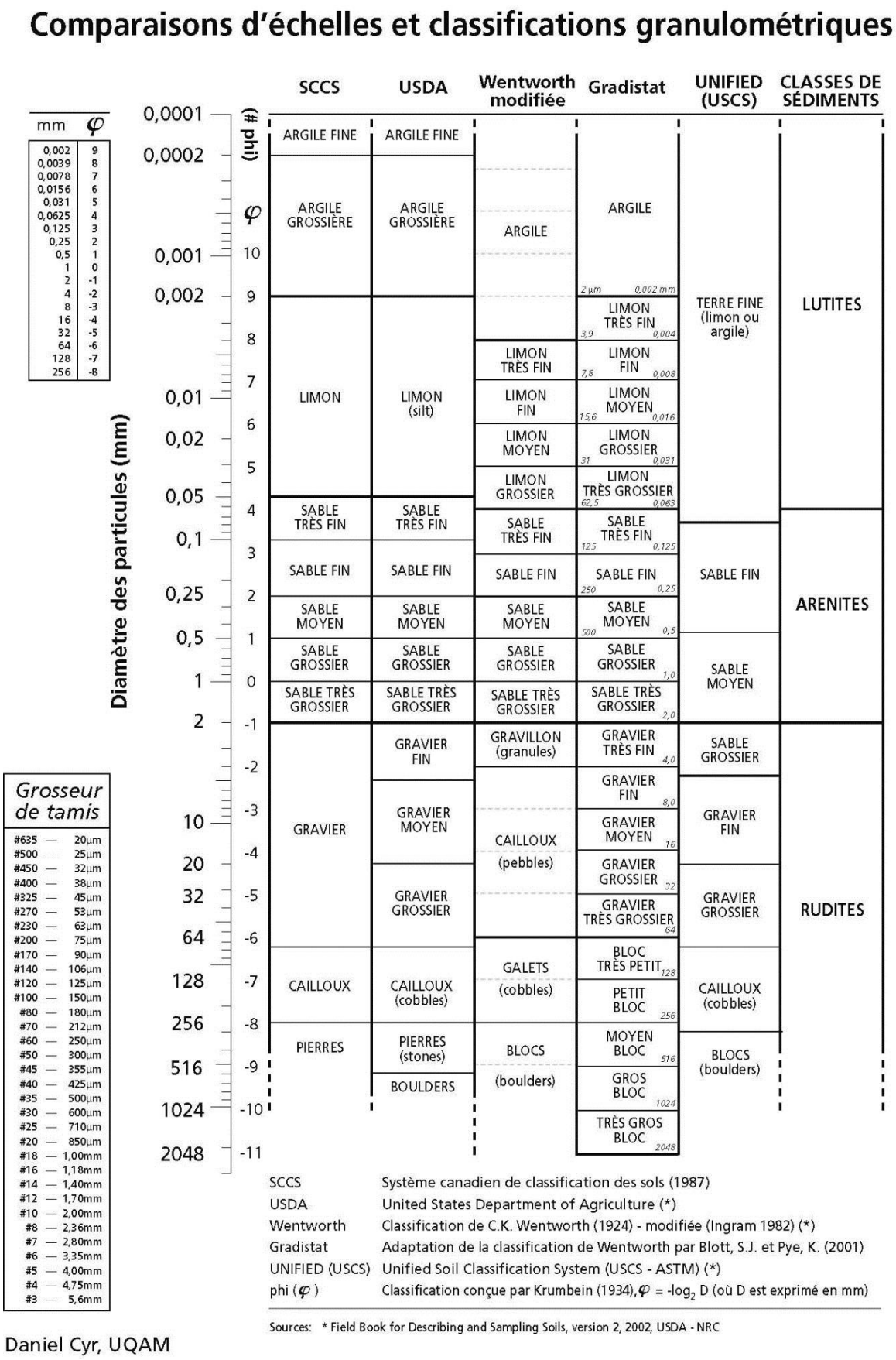
PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon	PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon
-58,01	5,95	1693,78	2,18	14	-27,91	3,84	1907,59	-1,00	17
-56,76	4,75	887,83	-3,77	14	-27,44	3,54	1631,61	2,84	17
-56,31	2,48	1268,59	0,98	14	-26,00	1,03	602,23	-0,70	17
-55,87	3,44	1164,80	-1,50	14	-25,81	1,46	668,44	0,33	18
-55,04	2,74	723,04	1,95	14	-25,40	1,93	601,43	-1,13	18
-54,70	2,66	867,85	-0,79	14	-25,14	1,48	537,96	0,80	18
-54,32	2,39	632,87	1,87	14	-24,80	0,85	399,83	-0,67	18
-53,84	1,13	513,35	-0,52	14	-24,60	1,49	399,51	0,18	18
-53,69	2,12	643,24	0,61	14	-24,40	2,63	503,90	-1,31	18
-53,32	1,64	386,20	-1,51	14	-24,20	1,81	738,36	1,33	18
-53,04	0,15	219,99	0,14	14	-23,90	1,40	892,65	-0,49	18
-52,94	0,50	513,92	-0,02	14	-23,46	1,28	652,11	0,91	18
-52,82	0,79	787,50	0,49	14	-23,00	1,15	401,15	-0,37	18
-52,42	2,04	605,05	-0,30	14	-22,81	1,56	807,22	0,78	18
-52,04	2,14	417,08	1,74	14	-22,60	0,83	843,64	-0,78	18
-51,82	1,60	969,62	-0,40	14	-22,00	1,26	429,51	0,05	18
-51,62	6,74	1380,79	1,20	14	-21,76	1,24	390,35	-1,21	18
-50,85	6,50	1356,54	-5,54	14	-21,57	0,11	574,29	0,03	18
-50,24	1,25	992,10	0,96	14	-21,37	0,52	571,04	-0,08	18
-49,49	1,78	1027,03	-0,29	14	-21,00	0,62	1001,95	0,44	18
-49,25	2,08	883,04	1,49	14	-20,80	0,89	1792,91	-0,17	18
-48,46	1,18	574,36	-0,59	14	-20,00	2,25	1202,81	0,72	18
-48,36	2,61	914,84	0,59	14	-19,01	1,70	418,00	-1,53	18
-47,89	2,34	543,49	-2,02	15	-18,79	1,91	1184,50	0,17	18
-47,45	0,69	214,31	0,32	15	-18,59	2,54	1370,91	-1,74	18
-47,35	1,01	358,33	-0,37	15	-17,61	1,69	1006,82	0,80	18
-47,23	4,39	318,84	0,65	15	-17,22	1,35	826,02	-0,89	18
-46,99	4,72	179,80	-3,74	15	-16,60	0,60	410,60	0,45	18
-46,92	1,74	542,89	0,99	15	-16,39	0,26	390,16	-0,15	18
-46,81	2,38	690,13	-0,76	15	-16,19	0,32	2146,65	0,11	18
-46,37	4,20	1290,52	1,62	15	-16,00	1,10	2774,96	-0,21	18
-46,12	4,47	1770,60	-2,58	15	-14,05	1,67	1439,06	0,88	18
-45,08	4,96	984,20	1,89	15	-13,23	3,21	797,19	-0,79	18
-44,35	3,81	568,17	-3,07	15	-12,61	6,57	208,19	2,42	18
-44,10	1,40	1747,92	0,74	15	-12,43	6,38	96,99	-4,15	18
-43,78	1,29	1790,36	-0,66	15	-12,40	7,90	190,43	2,23	18
-42,35	0,94	1086,78	0,63	15	-12,33	8,27	275,38	-5,67	18
-41,99	0,54	949,40	-0,31	15	-12,21	5,48	195,83	2,60	18
-41,26	0,72	1930,44	0,23	15	-12,06	4,35	183,70	-2,88	18
-41,04	3,38	2701,80	-0,49	15	-12,01	2,91	191,53	1,48	18
-39,33	10,34	1453,23	2,89	16	-11,87	3,09	242,26	-1,43	18
-38,34	9,34	858,36	-7,44	16	-11,82	2,13	216,31	1,66	18
-37,88	5,20	886,29	1,90	16	-11,63	3,47	634,14	-0,47	18
-37,48	5,05	727,20	-3,31	16	-11,60	3,37	802,02	3,00	18
-36,99	1,85	811,78	1,75	17	-11,00	2,78	220,91	-0,37	18
-36,75	1,35	824,31	-0,10	17	-10,80	8,33	219,81	2,41	18
-36,18	1,92	788,02	1,25	17	-10,77	9,20	202,67	-5,92	18
-35,93	1,14	593,29	-0,67	17	-10,58	6,75	188,56	3,28	18
-35,39	0,97	199,05	0,48	17	-10,57	7,37	207,61	-3,47	18
-35,33	0,64	239,16	-0,49	17	-10,39	9,86	201,25	3,91	18
-35,19	1,17	476,34	0,14	17	-10,36	9,93	223,42	-5,95	18
-35,10	2,25	1241,36	-1,02	17	-10,19	6,12	381,60	3,97	18
-34,72	1,54	2349,07	1,23	17	-10,14	5,76	378,71	-2,15	18
-33,85	0,77	2383,40	-0,31	17	-9,81	5,99	200,83	3,61	18
-32,37	1,91	2473,03	0,46	17	-9,76	7,31	1118,96	-2,38	18
-31,47	3,47	2537,64	-1,45	17	-9,61	10,38	1603,36	4,93	18
-29,90	3,30	1557,63	2,02	17	-8,64	5,79	829,82	-5,46	19
-28,93	2,60	1020,90	-1,28	17	-8,01	1,52	387,77	0,34	19
-28,34	2,32	899,75	1,33	17	-7,81	2,46	602,68	-1,19	19

PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon	PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon
-7,62	3,68	762,61	1,27	19	38,50	6,19	2692,03	-2,60	25
-7,21	3,00	410,61	-2,42	19	39,50	6,82	2500,90	3,60	25
-6,86	3,82	1232,92	0,58	19	41,19	5,22	1312,91	-3,22	25
-6,80	6,22	1580,74	-3,24	19	42,00	2,05	941,35	2,00	25
-5,62	3,18	955,43	2,98	20	42,51	2,14	943,98	-0,06	25
-5,22	0,97	1334,50	-0,20	20	42,94	2,46	1026,64	2,08	25
-4,67	7,50	1317,21	0,77	20	43,45	1,14	1068,45	-0,38	25
-3,88	10,91	1709,85	-6,73	20	43,97	0,84	2056,04	0,77	25
-3,35	6,33	1386,06	4,18	20	44,52	1,67	2492,54	-0,07	25
-2,18	6,24	297,03	-2,15	20	46,03	6,59	1209,01	1,59	25
-1,97	4,28	128,99	4,09	20	47,01	6,88	291,11	-5,00	25
-1,88	2,89	397,15	-0,19	20	47,23	5,55	1709,71	1,89	25
-1,84	4,39	1539,65	2,70	20	47,30	4,57	2156,85	-3,66	25
-1,48	3,90	1365,58	-1,69	20	48,94	3,28	1823,00	0,91	25
-0,30	3,60	292,06	2,21	20	49,46	4,68	1551,27	-2,37	25
-0,12	3,70	119,85	-1,39	20	50,77	5,96	2732,73	2,31	25
0,00	4,21	1005,19	2,31	20	51,01	4,81	3461,06	-3,65	26
0,00	2,95	1289,66	-1,90	20	53,50	2,97	1666,32	1,17	26
1,00	3,08	1958,20	1,06	21	54,47	2,56	1534,55	-1,80	26
1,29	2,72	2147,77	-2,02	21	55,17	0,99	1358,19	0,76	26
2,96	2,65	2145,63	0,70	21	56,01	0,66	2464,64	-0,23	26
3,44	3,88	1823,52	-1,95	21	56,52	1,45	3066,57	0,43	26
5,10	4,88	415,71	1,92	22	58,47	2,26	1525,72	-1,03	26
5,27	4,13	1235,78	-2,96	22	59,59	3,63	883,18	1,23	26
5,52	1,35	1480,19	1,17	22	60,00	4,36	2978,15	-2,40	26
6,50	0,66	988,56	-0,18	22	60,47	5,86	2500,83	1,96	26
7,00	2,09	2994,05	0,48	22	62,97	4,81	557,00	-3,89	26
7,49	3,12	3002,10	-1,61	22	62,98	2,80	2536,24	0,92	26
9,99	3,50	1033,46	1,51	22	63,53	2,35	3006,91	-1,89	27
10,49	2,64	1007,70	-1,98	22	65,51	1,92	2025,73	0,47	27
11,03	0,76	980,15	0,66	22	66,54	3,23	1978,27	-1,45	27
11,50	2,04	1503,44	-0,10	22	67,54	3,54	1177,97	1,77	27
12,01	2,06	1509,41	1,94	22	68,52	1,98	287,36	-1,77	27
13,00	0,23	994,90	-0,12	22	68,72	4,98	799,25	0,21	27
13,52	2,59	1335,74	0,11	22	68,80	7,75	2167,99	-4,77	27
14,00	2,49	985,70	-2,48	22	69,51	3,36	2944,25	2,98	27
14,85	2,48	1736,76	0,01	22	70,97	1,45	2524,13	-0,38	27
14,98	3,73	2193,46	-2,47	23	72,46	1,75	2273,35	1,07	27
16,59	3,07	1381,67	1,27	23	73,50	3,25	2255,05	-0,68	27
17,18	3,40	1787,08	-1,81	23	74,73	7,24	2143,31	2,57	27
17,97	7,01	1481,02	1,60	23	75,75	7,08	1800,63	-4,68	27
18,96	5,96	1001,85	-5,41	23	76,88	4,92	1137,89	2,41	27
19,45	0,58	1012,61	0,55	23	77,55	2,99	925,83	-2,51	27
19,97	1,81	2008,17	-0,02	23	78,01	5,28	1511,53	0,48	27
20,46	2,13	2540,30	1,78	23	78,48	7,79	1547,30	-4,80	27
21,97	2,99	2500,67	-0,34	23	79,52	4,05	3048,93	2,99	27
23,01	6,23	3015,26	2,65	23	80,03	3,13	3471,07	-1,07	27
24,47	5,62	2172,37	-3,59	23	82,57	5,55	3420,62	2,07	27
26,02	2,58	2014,76	2,04	24	83,50	6,07	4000,00	-3,48	28
26,65	3,26	2308,26	-0,54	24	85,99	6,06	3520,76	2,59	28
28,04	8,31	1498,01	2,72	24	87,50	4,38	2372,45	-3,48	29
28,96	8,25	2578,39	-5,59	24	89,51	1,52	813,43	0,90	29
29,53	3,20	2974,25	2,65	24	89,87	1,22	1162,05	-0,62	29
31,53	3,72	2400,12	-0,54	24	90,33	2,76	2628,06	0,60	29
32,51	10,52	2100,15	3,18	24	91,03	4,41	2940,57	-2,16	29
33,93	9,05	1510,49	-7,34	24	92,96	4,55	2446,29	2,24	29
34,61	3,61	2333,30	1,71	25	93,97	3,50	3003,38	-2,31	29
35,44	3,16	3057,16	-1,90	25	95,40	3,76	2726,28	1,19	30
36,94	3,86	2559,63	1,26	25	96,97	4,55	1484,64	-2,56	30

PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon	PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon
98,13	2,02	884,72	1,98	30	154,48	1,53	3023,08	-0,89	38
98,46	2,08	2547,23	-0,03	30	156,00	1,42	2024,15	0,63	38
99,01	5,81	3983,26	2,05	30	157,50	2,14	1496,98	-0,79	38
101,01	5,96	2987,50	-3,76	30	158,02	2,70	2463,93	1,34	38
103,00	2,90	4422,28	2,20	31	159,00	2,97	2955,41	-1,35	38
103,99	2,48	5830,89	-0,71	31	160,48	2,87	4525,30	1,62	38
107,42	3,81	2600,66	1,78	31	161,96	2,57	5041,16	-1,25	38
109,83	2,43	675,79	-2,04	32	165,01	2,89	4026,70	1,32	38
110,02	0,51	2601,44	0,39	32	167,00	3,11	2610,63	-1,57	39
110,50	1,14	2497,27	-0,12	32	169,04	2,28	977,84	1,54	39
112,62	1,95	917,15	1,02	32	169,61	2,05	1106,91	-0,74	39
113,00	2,41	993,50	-0,92	32	170,01	1,80	1499,75	1,31	39
113,54	4,61	1938,08	1,48	32	170,72	2,08	936,89	-0,49	39
113,99	4,80	3016,44	-3,13	32	171,51	2,23	497,24	1,59	39
115,48	2,75	2523,07	1,67	32	171,65	1,87	861,17	-0,64	39
117,01	3,76	1988,12	-1,08	32	172,01	4,48	1989,32	1,23	40
118,00	3,08	1452,71	2,68	32	172,51	4,49	2486,85	-3,25	40
119,00	2,76	654,50	-0,41	32	174,00	1,90	1591,86	1,24	40
119,45	10,88	554,38	2,35	32	175,00	2,39	2001,49	-0,66	40
119,65	10,40	1344,31	-8,53	32	175,59	2,88	3419,21	1,73	40
120,01	3,91	1493,40	1,87	33	177,00	1,43	2493,90	-1,15	40
121,00	4,53	1506,83	-2,05	33	179,01	0,43	1482,79	0,27	40
121,50	3,85	2003,35	2,48	33	179,50	0,24	1527,44	-0,15	40
122,50	2,90	1501,82	-1,37	33	180,49	0,14	947,56	0,08	40
123,50	1,65	1002,81	1,54	33	181,02	1,18	1474,05	-0,05	40
124,00	1,54	1488,52	-0,11	33	181,44	2,51	2127,98	1,13	40
124,51	1,83	1493,71	1,43	33	182,50	2,58	1508,28	-1,38	40
125,49	1,10	555,90	-0,40	33	183,57	1,61	925,96	1,20	40
126,00	3,58	418,78	0,70	33	184,01	0,66	1002,62	-0,41	40
126,05	4,12	1457,83	-2,88	33	184,50	1,18	1087,04	0,25	40
126,42	4,45	2159,07	1,24	33	185,01	2,79	1472,99	-0,93	40
127,51	3,69	1193,71	-3,21	34	185,58	3,33	3002,22	1,86	40
128,58	1,02	1416,95	0,49	34	186,48	2,72	3077,62	-1,47	40
128,70	3,15	2308,70	-0,53	34	188,58	2,13	1370,12	1,25	40
129,99	4,13	3019,95	2,61	34	189,56	1,51	1431,71	-0,88	40
131,01	3,04	2467,45	-1,52	34	189,95	1,54	2025,85	0,63	40
133,01	3,58	980,76	1,52	35	190,99	2,00	2029,19	-0,90	40
133,48	2,31	1030,30	-2,06	35	191,98	2,80	1996,33	1,10	41
134,00	0,37	1025,18	0,25	35	193,02	3,04	1989,73	-1,70	41
134,51	1,47	1257,64	-0,13	35	193,98	3,41	2524,83	1,34	41
135,02	3,09	1557,52	1,34	35	195,01	2,81	1994,47	-2,07	41
135,76	1,99	2277,93	-1,75	35	196,50	1,62	2005,07	0,74	41
136,58	3,26	2438,61	0,24	36	197,00	4,20	2507,20	-0,88	41
138,04	4,09	1526,30	-3,02	36	198,51	8,05	1995,80	3,31	41
139,02	1,23	968,10	1,07	36	199,51	6,80	3468,84	-4,73	41
139,57	1,01	1437,56	-0,15	36	200,50	6,69	3515,88	2,07	42
139,98	1,12	3012,34	0,86	36	202,98	7,78	3017,37	-4,62	42
141,01	0,74	3491,35	-0,26	36	204,02	5,15	3480,35	3,16	43
143,00	1,58	2503,04	0,47	36	206,00	3,00	3000,92	-1,99	43
144,50	1,60	2539,97	-1,11	37	207,50	3,09	2487,18	1,01	43
145,50	1,15	4083,36	0,50	37	209,00	3,34	2496,85	-2,08	43
147,04	2,50	2962,20	-0,66	37	209,99	3,28	2405,60	1,26	43
149,58	2,67	1914,69	1,84	37	211,50	5,29	1772,51	-2,02	43
150,00	1,29	2002,51	-0,83	37	212,39	9,98	2608,00	3,27	43
151,50	1,43	1094,69	0,46	37	213,27	8,69	2235,02	-6,71	43
152,00	1,44	1069,74	-0,97	37	215,00	2,04	994,33	1,98	44
152,59	4,92	1425,44	0,47	37	215,50	1,44	914,48	-0,06	44
153,07	5,96	1410,28	-4,45	38	215,99	4,00	2000,11	1,38	44
154,02	2,40	1977,28	1,51	38	216,42	4,48	1981,63	-2,62	44

PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon	PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	N° Tronçon
217,99	2,09	1160,74	1,86	44	266,01	6,12	938,16	-2,86	50
218,40	1,15	1997,85	-0,23	45	266,52	5,88	1017,61	3,26	50
219,15	1,85	1652,02	0,92	45	266,95	3,74	1065,64	-2,62	50
220,40	1,52	1492,42	-0,93	45	267,54	2,71	944,49	1,12	50
220,81	2,36	1752,22	0,59	45	268,01	6,47	1987,64	-1,59	50
221,89	5,05	2195,38	-1,77	45	268,48	9,11	3041,07	4,88	50
222,56	6,89	2479,74	3,29	45	270,00	5,36	2007,09	-4,23	51
224,08	3,78	1456,27	-3,60	45	271,52	1,26	974,47	1,13	51
225,04	0,90	989,85	0,18	45	272,01	0,73	979,58	-0,13	51
225,54	2,47	1489,30	-0,72	45	272,50	2,58	2004,76	0,60	51
226,03	3,34	1495,16	1,75	45	272,99	2,06	2014,46	-1,98	51
227,03	2,75	1510,68	-1,59	45	274,50	0,93	996,17	0,08	51
227,52	1,25	2348,97	1,16	46	275,00	2,66	1001,77	-0,85	51
228,54	1,93	2253,00	-0,10	46	275,50	3,32	1498,69	1,81	51
229,87	5,19	2648,98	1,84	46	276,00	2,44	1507,81	-1,51	52
230,79	3,98	2223,41	-3,36	46	277,00	0,94	1501,74	0,93	52
232,52	1,43	1017,12	0,62	46	277,51	1,54	2491,30	-0,01	52
233,02	1,02	1006,64	-0,81	46	278,50	2,84	2333,16	1,54	52
233,54	0,47	1020,04	0,21	46	280,00	4,48	2409,20	-1,31	53
234,02	0,93	2019,67	-0,26	47	280,83	8,60	3168,87	3,17	53
234,56	2,20	2000,36	0,67	47	282,41	9,28	4535,29	-5,43	53
236,04	2,32	2468,38	-1,53	47	284,00	6,74	3963,81	3,84	54
236,56	3,51	2476,46	0,80	47	286,95	5,26	2531,62	-2,90	54
238,51	3,71	975,22	-2,72	47	287,97	2,84	3027,90	2,36	54
239,04	1,55	971,24	0,99	47	289,48	0,53	2539,46	-0,48	54
239,49	1,95	1495,23	-0,56	47	290,99	3,27	2034,56	0,05	55
240,01	3,55	2676,79	1,40	47	292,02	4,89	4482,04	-3,22	55
240,98	4,03	2015,28	-2,15	47	293,03	3,20	5938,48	1,67	55
242,68	3,71	1194,85	1,88	47	296,50	3,08	4483,92	-1,53	55
243,00	2,27	1092,59	-1,83	47	298,97	2,11	4025,81	1,55	55
243,88	1,49	1118,42	0,43	48	300,98	2,66	3509,58	-0,57	55
244,09	2,52	1413,50	-1,05	48	302,99	4,42	2495,66	2,10	55
245,00	4,36	2011,55	1,47	48	304,49	3,85	1992,95	-2,32	55
245,50	3,55	1986,57	-2,89	48	305,49	2,55	2004,18	1,53	55
247,01	3,30	1504,74	0,66	48	306,49	2,08	1521,48	-1,03	55
247,49	4,75	1510,90	-2,64	48	307,49	1,86	1002,29	1,06	55
248,51	3,97	1488,69	2,12	49	308,01	1,87	2003,16	-0,80	55
249,00	2,97	1496,27	-1,86	49	308,49	2,55	2524,64	1,07	55
250,00	2,69	1497,44	1,11	49	310,01	2,17	1495,23	-1,48	55
250,50	3,39	2498,44	-1,58	49	311,02	2,87	1985,35	0,69	55
251,50	7,77	1999,95	1,81	49	311,51	4,26	1984,77	-2,18	55
253,00	7,20	1004,47	-5,97	49	313,00	4,54	960,78	2,09	55
253,50	3,71	989,46	1,24	49	313,49	5,85	1021,13	-2,45	55
254,00	3,20	995,45	-2,47	49	313,97	4,23	1555,47	3,40	55
254,49	1,63	1509,72	0,73	49	314,51	1,38	1485,30	-0,83	55
255,00	2,25	2005,18	-0,90	49	315,52	8,97	2074,63	0,55	55
256,00	3,50	1502,39	1,35	49	316,00	12,74	3120,81	-8,42	55
257,00	3,39	1000,68	-2,15	49	317,60	5,94	2390,55	4,33	55
257,50	2,21	1503,21	1,23	49	319,12	4,24	2335,66	-1,62	55
258,00	2,70	2002,09	-0,98	49	319,99	4,94	2047,73	2,62	55
259,00	3,47	1501,54	1,72	49	321,45	4,39	1049,66	-2,32	55
260,00	2,74	995,73	-1,75	49	322,03	2,58	899,90	2,08	55
260,51	1,35	1474,38	0,99	49	322,50	0,85		-0,51	55
261,00	2,64	1588,12	-0,36	49	322,93			0,34	
261,98	8,63	1534,99	2,28	49					
262,59	7,79	1887,83	-6,35	49					
263,52	2,69	1892,15	1,44	50					
264,48	3,84	1533,80	-1,26	50					
265,41	5,43	1113,78	2,58	50					

Annexe 17 : Echelle granulométrique, utilisation de la classification de Wentworth (1922). Tableau réalisé par D. Cyr à partir des travaux de Schoeneberger et al. (2002)



Annexe 18 : Synthèse bibliographique des mesures granulométriques effectuées sur le Rhône

N°	Lieu	Qualité localisation	X	Y	PK	Dm de surface (mm)	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D70 (mm)	D90 (mm)	D70 (dm)	Approche qualitative	Méthode échantillonnage	Observations / Remarques	Sources
0	Pougny (01)	A	9E+05	6564409	-186,5				**132,5**		21,38		Gravier moyen	Wolman	ATTENTION VALEURS DE MONTANE EN CM	Mémoire Master 2 Montané
1	Motz (73)	A	9E+05	6539559	-145,3				**95**		14,48		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
2	La Balme	A	9E+05	6515901	-115				**147,5**		26		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
3	Cordon (01)	A	9E+05	6505208	-99				**56,5**		8,9		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
4	Thil (01)	A	9E+05	6525461	-20				**86**		11,6		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
5	Vernaison (69)	A	8E+05	6506943	10,5				**128**		20,1		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
6	Roche de glun (26)	A	8E+05	6436014	100				**118**		19,8		Gravier moyen	Wolman		Mémoire Master 2 Montané
7	St Perey (07)	A	8E+05	6428941	108,3				**58**		9,5		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
8	La Voulte (07)	A	8E+05	6413315	127				**68**		9,39		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
9	Cruas (07)	A	8E+05	6397641	143,8				**76**		16,3		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
10	Donzère (26)	A	8E+05	6374110	169,5				**54**		11,98		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
11	Pt St Esprit (30)	A	8E+05	6,4E+07	193				**67**		16,4		Gravier moyen	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
12	Aramon (30)	A	8E+05	6310790	254,5				**30**		5,38		Gravier fin	Wolman	échantillonage < 100 prélèvements	Mémoire Master 2 Montané
13	Beaucaire (30)	A	8E+05	6301113	268,5				**24**		7,22		Gravier fin	Wolman		Mémoire Master 2 Montané
14	Camargue	A	8E+05	6282389	290						6,286		Gravier fin			Mémoire Master 2 Montané
15	Camargue	A	8E+05	6257162	320						0,084		Sable très fin			Mémoire Master 2 Montané
16	Seyssel/ La Balme	C			150	16	0,3	4	**13**	21	40	1,2	graviers		Localisation douteuse	EGR : V3D1A4 1ère étape
17	Seyssel/ La Balme	C			151	32	2	13	**22**	35	90	1,2	graviers		Localisation douteuse	EGR : V3D1A4 1ère étape
18	Chautagne	C			141,3	51	3	21	**45**	70	114	1,37	graviers / galets		Sédiments de surface de RCC (15 premiers cm) ; Localisation douteuse	EGR : V3D1A4 1ère étape
19	Chautagne	C			141,5	26	0.5	7,5	**17**	37	70	1,42	graviers		courbe moyenne CNR ; Localisation douteuse	EGR : V3D1A4 1ère étape
20	Chautagne	C			146,4	43	2	8	**22**	70	110	1,63	graviers / galets		extraction retenue ; Localisation douteuse	EGR : V3D1A4 1ère étape
21	Chautagne	C			147,6	41	1,4	10	**22**	70	100	1,71	graviers / galets		aval confluent Fier	EGR : V3D1A4 1ère étape
22	Chautagne	C			141	42	2	18	**37**	55	100	1,31	graviers / galets		prélèvement par dragueline	EGR : V3D1A4 1ère étape
23	Belley	C				26	0,55	9	**18**	40	62	1,4	graviers		Dépôt de Peyrieu	EGR : V3D1A4 1ère étape
24	Belley	C				31	0,55	9	**26**	40	80	1,4	graviers		Dépôt de Peyrieu	EGR : V3D1A4 1ère étape
25	Belley	C				41	1	17	**34**	52	100	1,27	graviers	draguage	Draguage Dépöt	EGR : V3D1A4 1ère étape
26	Belley	C				35	2	9,5	**21**	50	90	1,43	graviers	draguage	Draguage Dépöt	EGR : V3D1A4 1ère étape
27	Bregnier-C	C				18	0,4	5	**13**	24	50	1,33	graviers		Dépôt pont d'Evieu, cote 211	EGR : V3D1A4 1ère étape
28	Bregnier-C	C				13	0,4	5	**11**	18	31	1,38	graviers		Stock aval usine, cote 210	EGR : V3D1A4 1ère étape
29	Bregnier-C	C				18	0,3	8	**18**	26	36	1,44	graviers		Lône de l'Espérance	EGR : V3D1A4 1ère étape
30	Bregnier-C	C			-90.3	16	0,7	7	**15**	22	35	1,33	graviers		Restitution, fond	EGR : V3D1A4 1ère étape
31	Bregnier-C	C				28	8	19	**28**	35	50	1,33	graviers		Restitution, fond	EGR : V3D1A4 1ère étape
32	Sault-Brenaz	C				0,37	0,2	0,27	**0,35**	0,45	0,6		sables	draguage	Draguage retenue	EGR : V3D1A4 1ère étape
33	Miribel	C							**23**		49		graviers		Matériaux de surface (analyse D. Poinsart)	EGR : V3D1A4 1ère étape
34	Miribel	C							**26**		64		graviers		Matériaux de surface (analyse D. Poinsart)	EGR : V3D1A4 1ère étape

N°	Lieu	Qualité localisation	X	Y	PK	Dm de surface (mm)	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D70 (mm)	D90 (mm)	D70 (dm)	Approche qualitative	Observations / Remarques	Sources
35	Pierre-Benite	B	8E+05	6512910	4	8	0,25	0,6	**1,8**	8	30	1,51	sable grossier à graviers	Courbe enveloppe des graviers en place, RCC	EGR : V3D1A4 1ère étape
36	Pierre-Benite	B	8E+05	6512910	4	33	0,35	0,7	**24**	50	85	1,51	sable grossier à graviers	Courbe enveloppe des graviers en place, RCC	EGR : V3D1A4 1ère étape
37	Pierre-Benite	B	8E+05	6502262	15,5	21	0,35	1	**12**	27	65	1,29	sable grossier à graviers	Alluvions RD du Rhône	EGR : V3D1A4 1ère étape
38	Pierre-Benite	B	8E+05	6494724	27,5	25	3	14	**22**	30	55	1,2	graviers	Alluvions RD du Rhône	EGR : V3D1A4 1ère étape
39	Pierre-Benite	B			1,05	24	0,5	10	**20**	36	55	1,5	graviers	40m rive droite	EGR : V3D1A4 1ère étape
40	Vaugris	B	8E+05	6500371	18	18	0,2	4	**13**	25	50	1,37	sable grossier à graviers	retenue	EGR : V3D1A4 1ère étape
41	Vaugris	B	8E+05	6500371	18	37	1	18	**35**	50	80	1,37	sable grossier à graviers	retenue	EGR : V3D1A4 1ère étape
42	Vaugris	B	8E+05	6500371	18	27	0,4	8	**22**	35	68	1,3	graviers	courbes moyennes CNR	EGR : V3D1A4 1ère étape
43	Bourg lès Valence	B	8E+05	6430859	106	36	0,35	10	**25**	50	95	1,47	sable grossier à graviers	Alluvions dans la masse	EGR : V3D1A4 1ère étape
44	Bourg lès Valence	B	8E+05	6430859	106	45	0,35	10	**35**	70	110	1,47	sable grossier à graviers	Alluvions dans la masse	EGR : V3D1A4 1ère étape
45	Beauchastel	B	8E+05	6415256	124	26	0,4	0,4	**12**	35	80	1,44	sable grossier à graviers	Dans la masse, canal de fuite	EGR : V3D1A4 1ère étape
46	Beauchastel	B	8E+05	6415256	124	38	0,8	14	**32**	58	85	1,44	sable grossier à graviers	Dans la masse, canal de fuite	EGR : V3D1A4 1ère étape
47	Baix – Logis Neuf	B	8E+05	6405977	135,5	15	0,35	0,9	**12**	22	38	1,38	graviers	retenue	EGR : V3D1A4 1ère étape
48	Baix – Logis Neuf	B	8E+05	6405977	135,5	31	10	21	**30**	40	53	1,38	graviers	retenue	EGR : V3D1A4 1ère étape
49	Montélimar	B	8E+05	6417408	121,5	37	1	11	**32**	55	85	1,49	graviers	Dans le lit du Turzon	EGR : V3D1A4 1ère étape
50	Donzère–Mondragon	B	8E+05	6370923	173,7				**55**		109		galets	Pavage de surface (source D, Poinsart)	EGR : V3D1A4 1ère étape
51	Donzère–Mondragon	B	8E+05	6370923	173,7				**61**		123		galets	Pavage de surface (source D, Poinsart)	EGR : V3D1A4 1ère étape
52	Donzère–Mondragon	B	8E+05	6372696	171	72	25	45	**67**	90	135	1,25	gravier / galets	courbe utilisée par le laboratoire de Chatou	EGR : V3D1A4 1ère étape
53	Donzère–Mondragon	B	8E+05	6372309	172	33	5	16	**26**	40	80	1,21	gravier / galets	Matériaux dragués dans la retenue	EGR : V3D1A4 1ère étape
54	Donzère–Mondragon	B	8E+05	6372309	172	54	14	29	**44**	65	120	1,21	gravier / galets	Matériaux dragués dans la retenue	EGR : V3D1A4 1ère étape
55	Donzère–Mondragon	B	8E+05	6372521	171,4	41	0,1	10	**30**	60	105	1,46	sables grossiers à graviers voire galets	Dans retenue, milieu du lit	EGR : V3D1A4 1ère étape
56	Donzère–Mondragon	B	8E+05	6373244	170,5	80	35	62	**84**	105	140	1,31	gravier / galets	Dans retenue, milieu du lit	EGR : V3D1A4 1ère étape
57	Caderousse	B	8E+05	6347105	201,5	21	0,4	2	**12**	25	65	1,34	Gravier sableux	Surface ?	EGR : V3D1A4 1ère étape
58	Caderousse	B	8E+05	6347105	201,5	37	4	14	**26**	55	85	1,34	Gravier sableux	Surface ?	EGR : V3D1A4 1ère étape
59	Avignon	B	8E+05	6329187	226,0	9	0,3	1	**8**	12	22	1,28	Gravier sableux	île d'oiselet, RD du bras des Armeniers	EGR : V3D1A4 1ère étape
60	Avignon	B	8E+05	6329187	226,0	18	1,3	12	**18**	22	35	1,28	Gravier sableux	île d'oiselet, RD du bras des Armeniers	EGR : V3D1A4 1ère étape

N°	Lieu	Qualité localisation	X	Y	PK	Pente (‰)	Dm de surface (mm)	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D70 (mm)	D90 (mm)	D70 (dm)	Approche qualitative	Débit charriage naturel (m3/an)	Débit charriage actuel (m3/an)	Transit sédimentaire (%)	Observations / Remarques	Sources
61	Vallabrègues	B	830548	6306096	262,6		45	3.5	16	**30**	55	120	1,22	graviers				sondage –10m dans retenue,graviers dans la masse	EGR : V3D1A4 1ère étape
62	Vallabrègues	B	830548	6306096	262,6		10	0,2	0,4	**8**	15	28	1,36	Gravier sableux				fuseau de 219 échantillons dans les déblais à la construction de la retenue et du canal	EGR : V3D1A4 1ère étape
63	Vallabrègues	B	830548	6306096	262,6		37	0,5	19	**30**	45	90	1,36	Gravier sableux				fuseau de 219 échantillons dans les déblais à la construction de la retenue et du canal	EGR : V3D1A4 1ère étape
64	Vallabrègues	B	830538	6306195	262,5		21		11	**19**	26	48	1,24	graviers				courbe granulométrique moyenne des alluvions du Rhône	EGR : V3D1A4 1ère étape
65	Palier d'Arles	B	830398	6290902	279,3		13	0,22	7	**14**	18	27	1,32	Gravier sableux				Défluent petit Rhône	EGR : V3D1A4 1ère étape
66	Palier d'Arles	B	830398	6290902	279,3		19	8	14	**18**	24	32	1,32	Gravier sableux				Défluent petit Rhône	EGR : V3D1A4 1ère étape
67	Palier d'Arles	B	833881	6279370	294		24	4	14	**20**	30	50	1,25	Gravier pierreux				80m berge	EGR : V3D1A4 1ère étape
68	Palier d'Arles	B	833995	6278912	294,5		22	80µ	12	**20**	30	50	1,36	Grave argileuse				40m berge, en surface	EGR : V3D1A4 1ère étape
69	Palier d'Arles	B	831300	6297641	272,5		14	20µ	2	**17**	25	27	1,79	Gravier sableux					EGR : V3D1A4 1ère étape
70	Palier d'Arles	B	831300	6297641	272,5		0,072	0,003	0,025	**0,05**	0,1	0,18		Limon sableux					EGR : V3D1A4 1ère étape
71	GENISSIAT	B	928882	6565095	-187	1,5	77							Galets	88632	88632	100,0	En amont du barrage	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
72	GENISSIAT	B	923087	6561168	-179	1,5	77							Galets	88632	0	0,0	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
73	SEYSSEL	B	917136	6553562	-162	1,5	77							Galets	88632	88632	100,0	En amont du barrage	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
74	SEYSSEL	B	917519	6551172	-159	1,2	63							Gravier grossier	104616	627	0,6	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
75	SEYSSEL	B	917814	6546741	-154	1,1	63							Gravier grossier	60024	117	0,2	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
76	CHAUTAGNE	B	919555	6542141	-149	1,1	56							Gravier grossier	190660	0	0,0	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
77	CHAUTAGNE	B	919032	6535635	-141	1,1	56							Gravier grossier	164170	1810	1,1	Dans RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
78	BELLEY	B	917200	6529939	-135	0,9	49							Gravier grossier	120507	1632	1,4	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
79	BELLEY	B	916116	6522259	-127	0,8	42							Gravier grossier	143688	1997	1,4	Dans RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
80	BELLEY	B	915095	6517254	-121	0,7	42							Gravier grossier	63128	797	1,3	Dans RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
81	BELLEY	B	912323	6515921	-117	0,7	42							Gravier grossier	63128	1276	2,0	Dans RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
82	BREGNIER-CORDON	B	910824	6513511	-112	0,7	42							Gravier grossier	108600	1920	1,8	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
83	BREGNIER-CORDON	B	908926	6508058	-106	0,6	37,8							Gravier grossier	95388	0	0,0	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
84	BREGNIER-CORDON	B	905627	6506100	-101	0,6	37,8							Gravier grossier	95388	579	0,6	Dans RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
85	BREGNIER-CORDON	B	903567	6506671	-97	0,6	37,8							Gravier grossier	95388	726	0,8	Dans RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
86	BREGNIER-CORDON	B	901576	6509822	-93	0,6	37,8							Gravier grossier	95388	65	0,1	Dans RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
87	SAULT-BRENAZ	B	898408	6515592	-85	0,2	21							Gravier moyen	5802	472	8,1	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
88	SAULT-BRENAZ	B	892640	6520714	-77	0,2	21							Gravier moyen	441	8	1,8	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
89	SAULT-BRENAZ	B	889794	6524145	-72	0,4	21							Gravier moyen	138931	2662	1,9	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
90	SAULT-BRENAZ	B	888775	6527791	-67	0,4	21							Gravier moyen	138931	13	0,0	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
91	SAULT-BRENAZ	B	887381	6530745	-63	1,2	21							Gravier moyen	1044558	6757	0,6	Dans RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
92	SAULT-BRENAZ	B	886205	6531716	-62	0,5	21							Gravier moyen	176753	421	0,2	Dans RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
93	Pierre-Bénite	B	842330	6518010	2	0,5	49							Gravier grossier	19289	55	0,3	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
94	PIERRE-BENITE	B	842208	6514084	2,5	0,4	51,8							Gravier grossier	30814	0	0,0	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
95	Pierre-Bénite	B	843153	6521541	5,5	0,8	56							Gravier grossier	139579	72469	51,9	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
96	Pierre-Bénite	B	845638	6522881	8,5	0,8	56							Gravier moyen	139579	28	0,0	Dans retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
97	PIERRE-BENITE	B	842457	6508247	9	0,5	56							Gravier grossier	37559	25273	67,3	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
98	VAUGRIS-Retenue	B	842564	6496255	24	0,4	56							Gravier grossier	33593	1672	5,0	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
99	VAUGRIS-Aval	B	839081	6487106	38,5	0,4	56							Gravier grossier	33593	1842	5,5	En aval du barrage	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
100	Péage de roussilon	B	839122	6486711	39	0,5	56							Gravier grossier	67483	2860	4,2	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS

N°	Lieu	Qualité localisation	X	Y	PK	Pente (‰)	Dm de surface (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D70 (mm)	Approche qualitative	Débit charriage naturel (m3/an)	Débit charriage actuel (m3/an)	Transit sédimentaire (%)	Observations / Remarques	Sources
101	Péage de roussilon	B	837710	6485692	42	0,5	56				Gravier grossier	67483	0	0,0	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
102	Péage de roussilon	B	837538	6477203	51	0,5	56				Gravier grossier	98383	4926	5,0	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
103	SAINT-VALLIER	B	841410	6461184	69,5	0,5	63				Gravier grossier	29159	1822	6,2	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
104	SAINT-VALLIER	B	843343	6452956	79	0,6	63				Gravier grossier	109379	0	0,0	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
105	SAINT-VALLIER	B	843162	6446900	86,5	0,6	63				Gravier grossier	109379	2149	2,0	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
106	Bourg-les-Valence	B	844381	6442743	91	0,7	70				Galets	114540	1613	1,4	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
107	Bourg-les-Valence	B	845120	6439419	96	0,7	70				Galets	114540	327	0,3	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
108	Bourg-les-Valence	B	845646	6434867	101,5	0,7	70				Galets	114540	138	0,1	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
109	Bourg-les-Valence	B	847096	6430859	106	0,7	70				Galets	114540	262	0,2	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
110	BEAUCHASTEL	B	848704	6427865	109,5	0,7	77				Galets	196581	7437	3,8	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
111	BEAUCHASTEL	B	846962	6421629	116,5	0,7	77				Galets	196581	1147	0,6	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
112	BEAUCHASTEL	B	843854	6416320	123	0,7	77				Galets	196581	1874	1,0	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
113	Baix- Logis Neuf	B	839808	6410506	130,5	0,7	77				Galets	261026	13357	5,1	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
114	Baix- Logis Neuf	B	841259	6398517	143	0,8	77				Galets	493643	5368	1,1	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
115	MONTELIMAR	B	840546	6395501	146	0,8	77				Galets	336738	38690	11,5	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
116	MONTELIMAR	B	838435	6391500	150,5	0,8	77				Galets	336738	122	0,0	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
117	MONTELIMAR	B	834520	6386122	157	0,8	77				Galets	476186	20558	4,3	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
118	MONTELIMAR	B	834219	6379997	163,5	0,8	77				Galets	476186	3070	0,6	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
119	Donzère-Mondragon	B	835291	6375543	168	0,8	77				Galets	476186	43417	9,1	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
120	Donzère-Mondragon	B	834849	6373050	170,5	0,8	77				Galets	476186	480	0,1	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
121	Donzère-Mondragon	B	831269	6362618	182	0,7	63				Gravier grossier	292105	8790	3,0	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
122	Donzère-Mondragon	B	834048	6349641	196	0,7	63				Gravier grossier	398204	4766	1,2	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
123	CADEROUSSE	B	836394	6345253	203,5	0,5	56				Gravier grossier	368584	374	0,1	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
124	CADEROUSSE	B	837201	6339049	210	0,6	56				Gravier grossier	552448	0	0,0	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
125	CADEROUSSE	B	837710	6333931	215,5	0,6	56				Gravier grossier	552448	4441	0,8	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
126	AVIGNON	B	844040	6329187	226	0,5	49				Gravier grossier	346867	2	0,0	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
127	VALLABREGUES	B	844994	6318946	241,5	0,4	49				Gravier grossier	135024	0	0,0	amont durance	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
128	VALLABREGUES	B	836998	6312633	252	0,4	49				Gravier grossier	139524	257	0,2	Dans la retenue	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
129	VALLABREGUES	B	832292	6303445	266	0,3	49				Gravier grossier	40241	4124	10,2	Dans le RCC	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
130	PALIER-D'ARLES	B	830862	6296358	274	0,2	28				Gravier grossier	196872	45851	23,3	A l'amont du petit Rhône	EGR Synthèse Raccasi, ArcGIS
131	Secteur de Beaucaire	B	832226	6298828	271			14	**30**	195	Gravier grossier				1964 cnr	These Antonelli (2002)
132	Secteur de Beaucaire	B	832226	6298828	271			13	**25**	130	Gravier grossier				1964 cnr	These Antonelli (2002)
133	Secteur de Beaucaire	B	831084	6297237	273			16	**35**	11,5	Gravier grossier				1964 cnr	These Antonelli (2002)
134	Secteur de Beaucaire	B	830868	6296450	273,9			11	**30**	65	Gravier grossier				1964 cnr	These Antonelli (2002)
135	Secteur de Beaucaire	B	830867	6296020	274,3			12	**18**	45	Gravier grossier				1964 cnr	These Antonelli (2002)
136	Secteur de Beaucaire	B	830702	6295364	274,9			12	**20**	60	Gravier grossier				1964 cnr	These Antonelli (2002)
137	Secteur de Beaucaire	B	830398	6294701	275,6			11	**15,5**	32	Sable moyen				1964 cnr	These Antonelli (2002)
138	Secteur de Beaucaire	B	830223	6294335	276			15	**22,5**	45	Gravier grossier				1964 cnr	These Antonelli (2002)
139	Secteur de Beaucaire	B	829972	6293348	277			13	**21**	45	Gravier grossier				1964 cnr	These Antonelli (2002)
140	Secteur de Beaucaire	B	829953	6292418	277,9			12,5	**20**	55	Gravier grossier				1964 cnr	These Antonelli (2002)

N°	Lieu	Qualité localisation	X	Y	PK	D30 (mm)	D50 (mm)	D70 (mm)	D90 (mm)	Approche qualitative	Débit cours d'eau (m3/s)	Observations / Remarques	Sources
141	Secteur de Beaucaire	B	830075	6291768	278,5	13,5	**25**		68	Gravier grossier		1964 cnr	These Antonelli (2002)
142	Secteur de Beaucaire	B	830224	6291201	279,1	12,5	**18**		35	Gravier grossier		2000 CNR Antonelli Haut	These Antonelli (2002)
143	Secteur de Beaucaire	B	830202	6291242	279,1	22,5	**28**		54	Gravier grossier		2000 CNR Antonelli Haut	These Antonelli (2002)
144	Secteur de Beaucaire	B	830202	6291242	279,1	9,5	**13**		30	Sable moyen		1964 cnr	These Antonelli (2002)
145	Secteur de Beaucaire	B	830322	6291108	279,3	13	**21**		50	Gravier grossier		1964 cnr	These Antonelli (2002)
146	Secteur Grand Rhône	B	831015	6289870	280,6	13,5	**19**		37,5	Gravier grossier		1964 cnr	These Antonelli (2002)
147	Secteur Grand Rhône	B	831097	6289658	280,8	17	**27,5**		61	Gravier grossier		1964 cnr	These Antonelli (2002)
148	Secteur Grand Rhône	B	831156	6289561	280,9	11,5	**15**		32,5	Gravier moyen		1964 cnr	These Antonelli (2002)
149	Secteur Grand Rhône	B	829864	6283262	288	13	**17**		20	Gravier grossier		2002 Vella Antonelli	These Antonelli (2002)
150	Secteur Grand Rhône	B	833853	6279879	293,5	11,5	**24**		63,5	Gravier grossier		1990 cnr	These Antonelli (2002)
151	Secteur Grand Rhône	B	833881	6279370	294	6,5	**12**		40	Sable moyen		1990 cnr	These Antonelli (2002)
152	Secteur Grand Rhône	B	833881	6279370	294	14,5	**21**		50	Gravier grossier		1990 cnr	These Antonelli (2002)
153	Secteur Grand Rhône	B	833881	6279370	294	16	**21**		26	Gravier grossier		2001-2002 Vella Antonelli	These Antonelli (2002)
154	Secteur Grand Rhône	B	833881	6279370	294	18	**26**		31	Gravier grossier		2001-2002 Vella Antonelli	These Antonelli (2002)
155	Secteur Grand Rhône	B	834652	6277604	296	22	**26**		30	Gravier grossier		2001 Vella Antonelli	These Antonelli (2002)
156	Secteur Grand Rhône	B	839647	6271462	304	18	**28**		31	Gravier grossier		2001 Vella Antonelli	These Antonelli (2002)
157	Secteur Grand Rhône	A	838175	6274128	301		**0,32**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
158	Secteur Grand Rhône	A	838809	6273334	302		**Nul**			Nul	180		Master Petit Rhone Capanni
159	Secteur Grand Rhône	A	839234	6272361	303		**0,34**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
160	Secteur Grand Rhône	A	840226	6270633	305		**0,36**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
161	Secteur Grand Rhône	A	840489	6269683	306		**Nul**			Nul	180		Master Petit Rhone Capanni
162	Secteur Grand Rhône	A	840510	6268753	307		**0,39**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
163	Secteur Grand Rhône	A	840709	6267717	308		**0,4**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
164	Secteur Grand Rhône	A	841094	6266781	309		**0,2**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
165	Secteur littoral	A	841620	6263844	312		**0,4**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
166	Secteur littoral	A	840788	6261859	314		**0,37**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
167	Secteur littoral	A	840633	6261357	314,5		**0,33**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
168	Secteur littoral	A	840465	6260889	315		**0,31**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
169	Secteur littoral	A	841745	6258808	317,5		**0,34**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
170	Secteur littoral	A	842810	6257778	319		**0,33**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
171	Secteur littoral	A	845350	6256030	322		**Nul**			Nul	180		Master Petit Rhone Capanni
172	Secteur littoral	A	848802	6252526	327		**0,38**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
173	Secteur littoral	A	0	0	331		**0,33**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
174	Secteur littoral	A	0	0	333		**0,13**			Sable fin	180		Master Petit Rhone Capanni
175	Secteur littoral	A	0	0	334		**0,27**			Sable moyen	180		Master Petit Rhone Capanni
176	Petit Rhône	A	830974	6289976	280,5		**0,33**			sable moyen	450		Master Petit Rhone Capanni
177	Petit Rhône	A	830519	6287701	283		**Nul**			Nul	450		Master Petit Rhone Capanni
178	Petit Rhône	A	828987	6285282	285,8		**0,24**			Sable fin	450		Master Petit Rhone Capanni
179	Petit Rhône	A	829393	6283914	287,2		**0,27**			Sable moyen	450		Master Petit Rhone Capanni
180	Petit Rhône	A	830004	6283113	288,2		**Nul**			Nul	450		Master Petit Rhone Capanni

N°	Lieu	Qualité localisation	X	Y	PK	D50 (mm)	Approche qualitative	Débit cours d'eau (m3/s)	Sources
181	Petit Rhône	A	832086	6282236	290,4	**0,32**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
182	Petit Rhône	A	833873	6280393	293	**0,39**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
183	Petit Rhône	A	833859	6279981	293,4	**0,41**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
184	Petit Rhône	A	834551	6277781	295,8	**0,39**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
185	Petit Rhône	A	835278	6276826	297	**0,33**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
186	Petit Rhône	A	835594	6276586	297,4	**0,39**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
187	Petit Rhône	A	837190	6275185	299,5	**Nul**	Nul	450	Master Petit Rhone Capanni
188	Petit Rhône	A	838175	6274128	301	**0,4**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
189	Petit Rhône	A	838809	6273334	302	**Nul**	Nul	450	Master Petit Rhone Capanni
190	Petit Rhône	A	839234	6272361	303	**0,32**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
191	Petit Rhône	A	840226	6270633	305	**0,27**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
192	Petit Rhône	A	840489	6269683	306	**Nul**	Nul	450	Master Petit Rhone Capanni
193	Petit Rhône	A	840510	6268753	307	**0,39**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
194	Petit Rhône	A	840709	6267717	308	**0,38**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
195	Petit Rhône	A	841094	6266781	309	**0,38**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
196	Petit Rhône	A	841620	6263844	312	**0,31**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
197	Petit Rhône	A	840788	6261859	314	**0,3**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
198	Petit Rhône	A	840633	6261357	314,5	**0,34**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
199	Petit Rhône	A	840465	6260889	315	**0,24**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
200	Petit Rhône	A	841745	6258808	317,5	**0,34**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
201	Petit Rhône	A	842810	6257778	319	**0,3**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
202	Petit Rhône	A	845350	6256030	322	**Nul**	Nul	450	Master Petit Rhone Capanni
203	Petit Rhône	A	848802	6252526	327	**0,31**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
204	Petit Rhône	A	0	0	331	**0,32**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
205	Petit Rhône	A	0	0	333	**0,21**	Sable fin	450	Master Petit Rhone Capanni
206	Petit Rhône	A	0	0	334	**0,29**	Sable moyen	450	Master Petit Rhone Capanni
207	Petit Rhône	A	830974	6289976	280,5	**0,37**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
208	Petit Rhône	A	830519	6287701	283	**0,26**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
209	Petit Rhône	A	828987	6285282	285,8	**0,13**	Sable fin	95	Master Petit Rhone Capanni
210	Petit Rhône	A	829393	6283914	287,2	**0,28**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
211	Petit Rhône	A	830004	6283113	288,2	**Nul**	Nul	95	Master Petit Rhone Capanni
212	Petit Rhône	A	832086	6282236	290,4	**0,34**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
213	Petit Rhône	A	833873	6280393	293	**0,4**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
214	Petit Rhône	A	833859	6279981	293,4	**Nul**	Nul	95	Master Petit Rhone Capanni
215	Petit Rhône	A	834551	6277781	295,8	**0,35**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
216	Petit Rhône	A	835278	6276826	297	**0,2**	Sable fin	95	Master Petit Rhone Capanni
217	Petit Rhône	A	835594	6276586	297,4	**0,12**	Sable très fin	95	Master Petit Rhone Capanni
218	Petit Rhône	A	837190	6275185	299,5	**0,37**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
219	Petit Rhône	A	838175	6274128	301	**0,31**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
220	Petit Rhône	A	838809	6273334	302	**Nul**	Nul	95	Master Petit Rhone Capanni

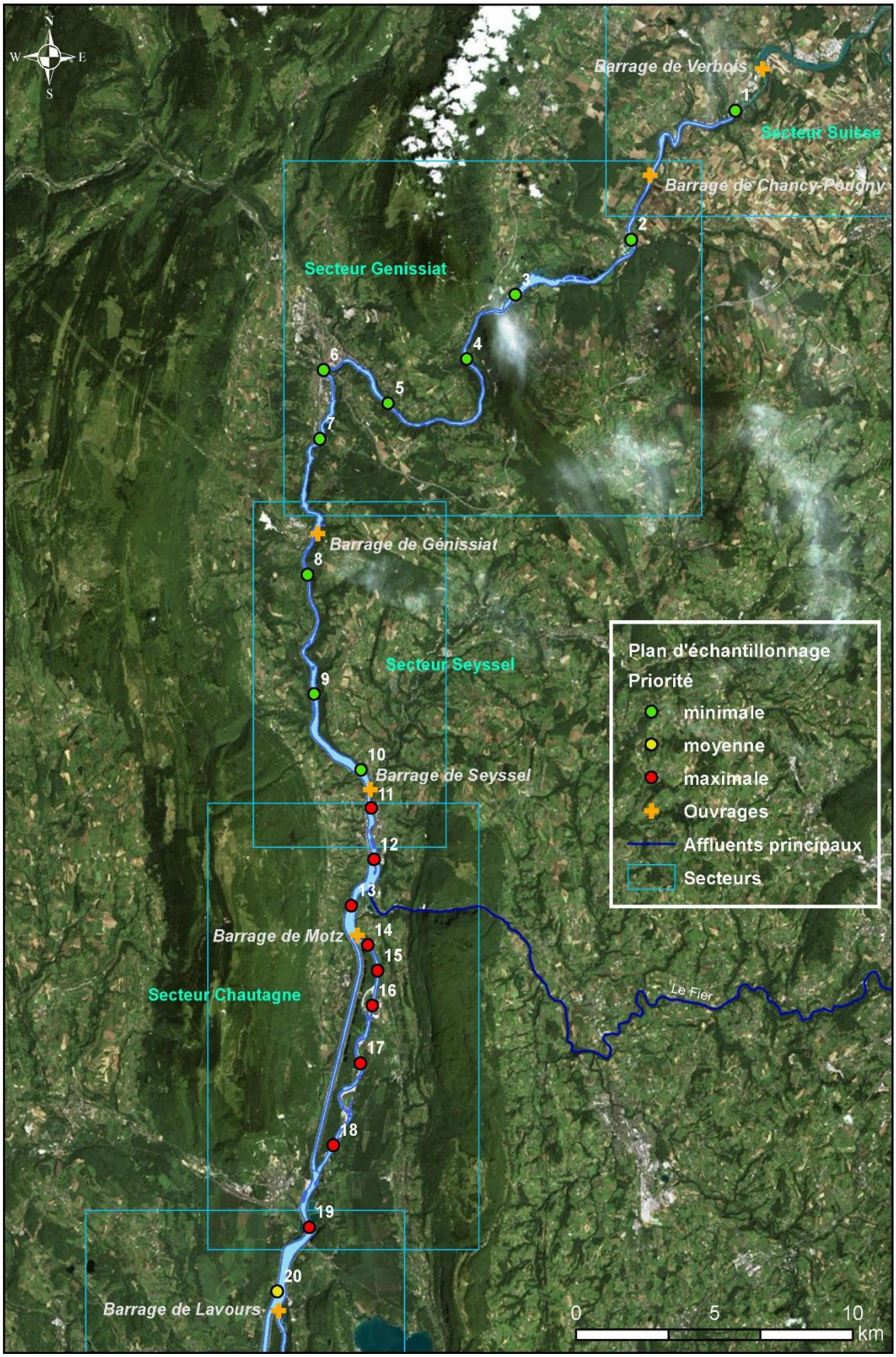
N°	Lieu	Qualité localisation	X	Y	PK	D50 (mm)	Approche qualitative	Débit cours d'eau (m3/s)	Sources
221	Petit Rhône	A	839234	6272361	303	**0,3**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
222	Petit Rhône	A	840226	6270633	305	**0,24**	Sable fin	95	Master Petit Rhone Capanni
223	Petit Rhône	A	840489	6269683	306	**Nul**	Nul	95	Master Petit Rhone Capanni
224	Petit Rhône	A	840510	6268753	307	**0,3**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
225	Petit Rhône	A	840709	6267717	308	**0,31**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
226	Petit Rhône	A	841094	6266781	309	**0,24**	Sable fin	95	Master Petit Rhone Capanni
227	Petit Rhône	A	841620	6263844	312	**0,38**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
228	Petit Rhône	A	840788	6261859	314	**0,31**	Sable moyen	95	Master Petit Rhone Capanni
229	Petit Rhône	A	840633	6261357	314,5	**0,14**	Sable fin	95	Master Petit Rhone Capanni
230	Petit Rhône	A	840465	6260889	315	**0,015**	Sable fin	95	Master Petit Rhone Capanni
231	Petit Rhône	A	830974	6289976	280,5	**0,32**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
232	Petit Rhône	A	830519	6287701	283	**0,27**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
233	Petit Rhône	A	828987	6285282	285,8	**Nul**	Nul	210	Master Petit Rhone Capanni
234	Petit Rhône	A	829393	6283914	287,2	**Nul**	Nul	210	Master Petit Rhone Capanni
235	Petit Rhône	A	830004	6283113	288,2	**Nul**	Nul	210	Master Petit Rhone Capanni
236	Petit Rhône	A	832086	6282236	290,4	**0,35**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
237	Petit Rhône	A	833873	6280393	293	**0,31**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
238	Petit Rhône	A	833859	6279981	293,4	**0,43**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
239	Petit Rhône	A	834551	6277781	295,8	**0,4**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
240	Petit Rhône	A	835278	6276826	297	**0,34**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
241	Petit Rhône	A	835594	6276586	297,4	**0,36**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
242	Petit Rhône	A	837190	6275185	299,5	**Nul**	Nul	210	Master Petit Rhone Capanni
243	Petit Rhône	A	838175	6274128	301	**0,33**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
244	Petit Rhône	A	838809	6273334	302	**Nul**	Nul	210	Master Petit Rhone Capanni
245	Petit Rhône	A	839234	6272361	303	**0,35**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
246	Petit Rhône	A	840226	6270633	305	**0,26**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
247	Petit Rhône	A	840489	6269683	306	**Nul**	Nul	210	Master Petit Rhone Capanni
248	Petit Rhône	A	840510	6268753	307	**0,36**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
249	Petit Rhône	A	840709	6267717	308	**0,4**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
250	Petit Rhône	A	841094	6266781	309	**0,33**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
251	Petit Rhône	A	841620	6263844	312	**0,27**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
252	Petit Rhône	A	840788	6261859	314	**0,36**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
253	Petit Rhône	A	840633	6261357	314,5	**0,36**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
254	Petit Rhône	A	840465	6260889	315	**0,26**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
255	Petit Rhône	A	841745	6258808	317,5	**0,023**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
256	Petit Rhône	A	842810	6257778	319	**0,34**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
257	Petit Rhône	A	845350	6256030	322	**0,25**	sable moyen	210	Master Petit Rhone Capanni
258	Petit Rhône	A	848802	6252526	327	**0,37**	Sable fin	210	Master Petit Rhone Capanni
259	Petit Rhône	A	0	0	331	**0,17**	Sable	210	Master Petit Rhone Capanni

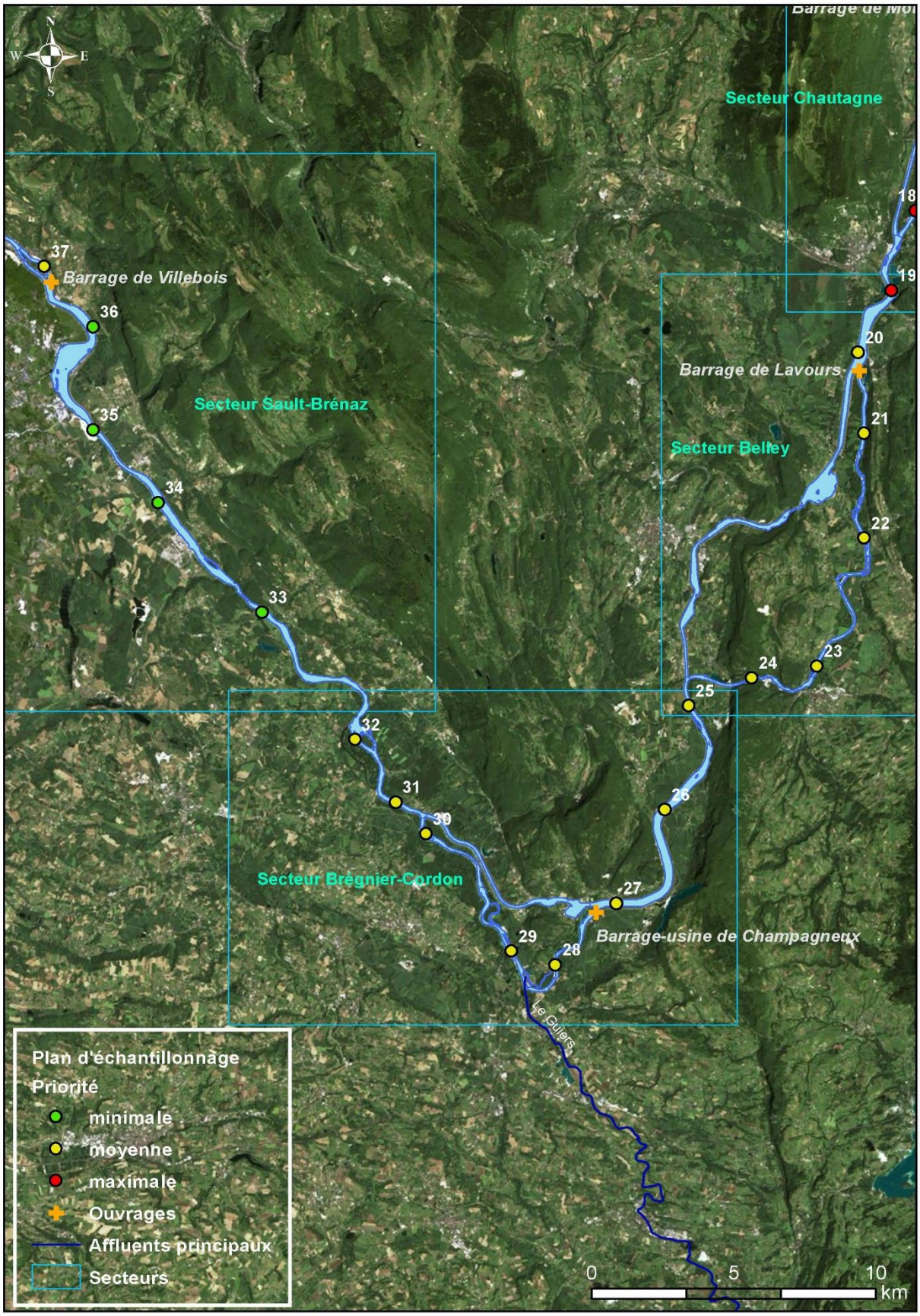
N°	Lieu	Qualité localisation	X	Y	PK	D50 (mm)	Approche qualitative	Méthode d'échantillonnage	Observations / Remarques	Sources
260	Secteur Beaucaire	A	830075	6291768	278,5		Galets 1 à 5 cm	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
261	Secteur Beaucaire	A	830202	6291242	279,05		galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
262	Grand Rhône	A	830705	6290473	280		vide	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
263	Grand Rhône	A	831197	6289456	281		galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
264	Grand Rhône	A	831333	6288337	282		sable et galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
265	Grand Rhône	A	830519	6287701	283		gros galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
266	Grand Rhône	A	829812	6286966	284		galets et sable	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
267	Grand Rhône	A	829212	6286144	285		graviers et moules vivantes	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
268	Grand Rhône	A	828973	6285040	286		petits et gros galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
269	Grand Rhône	A	829292	6284083	287		sable	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
270	Grand Rhône	A	829864	6283262	288		galets (5cm) graviers (1-2 cm) et sable en petite quantité	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
271	Grand Rhône	A	830699	6282663	289		coquilles et galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
272	Grand Rhône	A	831702	6282389	290		sables et beaucoup de vases	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
273	Grand Rhône	A	832590	6281918	291		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
274	Grand Rhône	A	833371	6281312	292		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
275	Grand Rhône	A	833873	6280393	293		galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
276	Grand Rhône	A	833881	6279370	294		galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
277	Grand Rhône	A	834123	6278440	295		vases fossiles compactes et galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
278	Grand Rhône	A	834652	6277604	296		galets et sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
279	Grand Rhône	A	835278	6276826	297		galets sables et coquilles	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
280	Grand Rhône	A	836043	6276195	298		sables et coquilles	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
281	Grand Rhône	A	836835	6275561	299		galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
282	Grand Rhône	A	837534	6274800	300		sables et galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
283	Grand Rhône	A	838175	6274128	301		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
284	Grand Rhône	A	838809	6273334	302		sables et galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
285	Grand Rhône	A	839234	6272361	303		galets	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
286	Grand Rhône	A	839647	6271462	304		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
287	Grand Rhône	A	840226	6270633	305		sable et galets de boue	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
288	Grand Rhône	A	840489	6269683	306		vases	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
289	Grand Rhône	A	840510	6268753	307		sables et coquilles	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
290	Grand Rhône	A	840709	6267717	308		creme de vase sur lit sableux	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
291	Grand Rhône	A	841094	6266781	309		vases et sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
292	Secteur littoral	A	841506	6265912	310		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
293	Secteur littoral	A	841716	6264845	311		creme de vase sur sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
294	Secteur littoral	A	841620	6263844	312		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
295	Secteur littoral	A	841250	6262788	313		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
296	Secteur littoral	A	840788	6261859	314		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
297	Secteur littoral	A	840465	6260889	315		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
298	Secteur littoral	A	841541	6259184	317		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
299	Secteur littoral	A	842021	6258316	318		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
300	Secteur littoral	A	842810	6257778	319		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
301	Secteur littoral	A	843789	6257162	320		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
302	Secteur littoral	A	844556	6256512	321		sables et coquilles	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
303	Secteur littoral	A	845350	6256030	322		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
304	Secteur littoral	A	846269	6255400	323		sables	Van Veen		Travaux de Raccasi - Vella
305	Saint maurice de gourdan	A				**21,69**	Graviers moyens		prélèvement dans l'Ain aval, surface	Thèse Anne-Julia ROLLET
306	Saint maurice de gourdan	A				**21,69**	Graviers moyens		prélèvement dans l'Ain aval, subsurface	Thèse Anne-Julia ROLLET

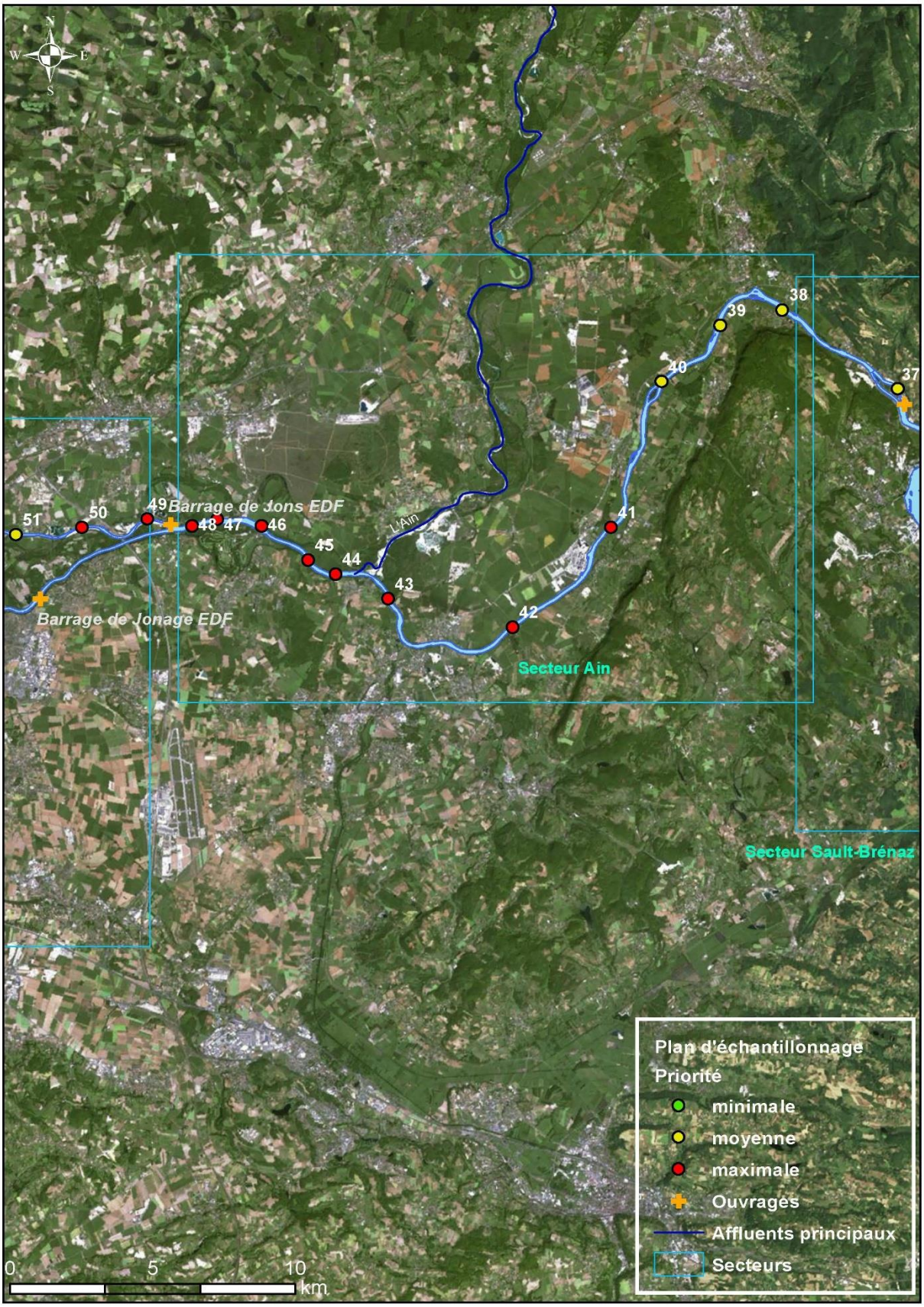
Annexe 19 : Bilan des échantillons prélevés à Donzère-Mondragon : Tests des Cooper Scoopers, la grande étant noté (G), comptage Wolman sur les bancs et dans le chenal en eau, échantillonnage volumétrique sur un banc

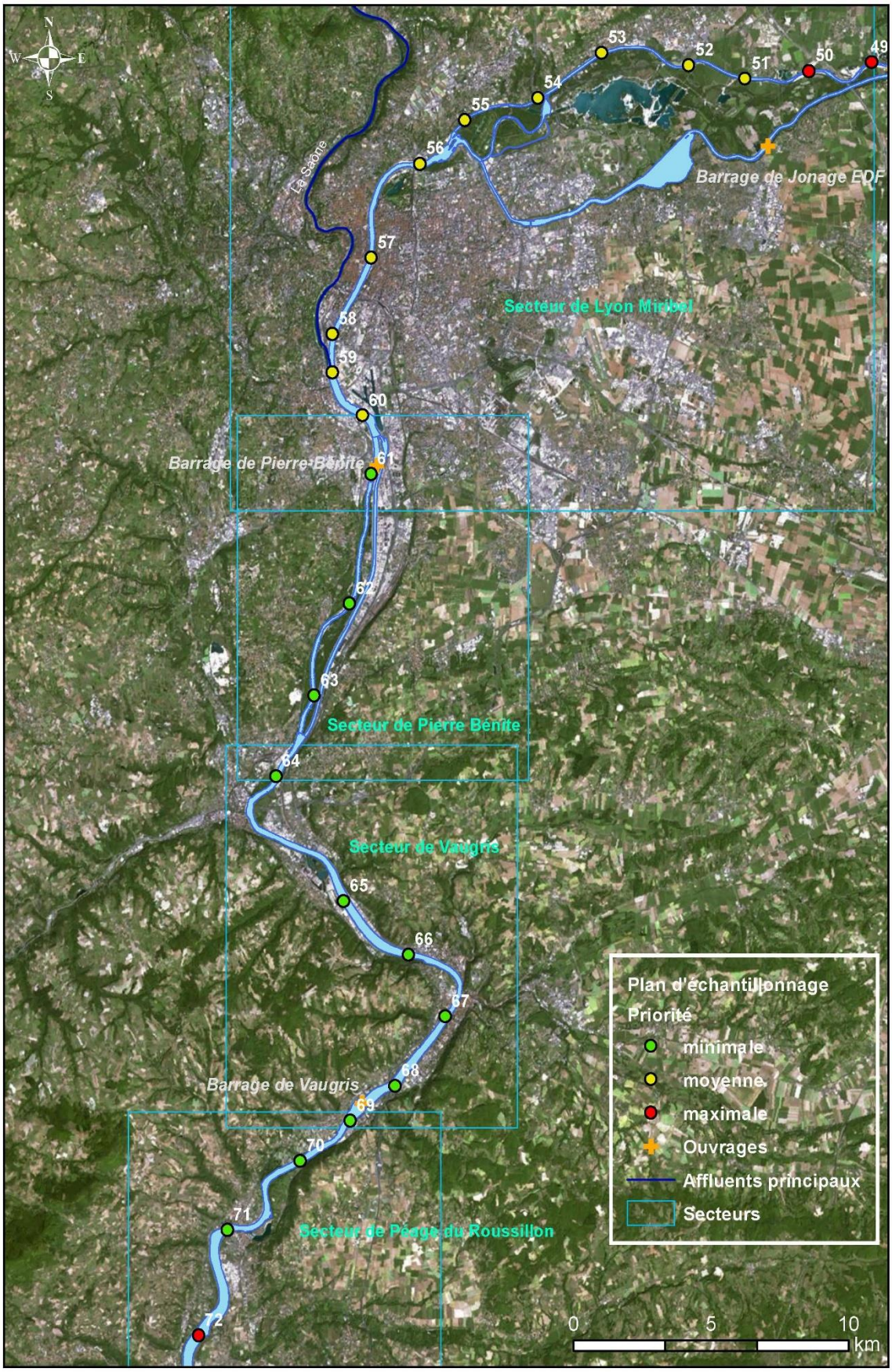
Lieu	PK	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)	Approche qualitative	Méthode d'échantillonnage	Observations / Remarques	Campagne 2011
Pont Saint Esprit	192,5	6,879	**24,45**	57,11	Graviers grossiers	Wolman	En face de Pont Saint Esprit, à l'amont du pont en rive gauche, comptage sur une partie du banc non végétalisée. Présence de blocs et graviers. Le bloc est partiellement végétalisé.	DZM-20110620-Wln BPSE1
Pont Saint Esprit	192,5	11,91	**29,27**	68,52	Graviers grossiers	Wolman	En face de Pont Saint Esprit, à côté du 1er Wolman, à l'amont du pont en rive gauche, comptage sur une partie du banc non végétalisée. Présence de blocs et graviers. Le bloc est partiellement végétalisé.	DZM-20110623-Wln BPSE2
Convexité am zone stockage	198,3	24,19	**50,24**	82,45	Graviers grossiers	Wolman	Test 26 : entre la zone de stockage et Pont St Esprit, proche banc, échantillonnage rive gauche	DZM-20110623-Wln CHE
Pont Saint Esprit	192,5	7,815	**53,43**	114,2	Graviers grossiers	Volumétrique	En face de Pont Saint Esprit, à côté du 1er Wolman, à l'amont du pont en rive gauche, comptage sur une partie du banc non végétalisée. Présence de blocs et graviers. Le bloc est partiellement végétalisé.	DZM-20110623-Volum BPSE
Convexité am zone stockage	198,5	16,1	**96,8**	121	Galets	Cooper Scooper	Test 4 sur données GPS. 2 échantillons additionnés : Test 4-1 à 1m de prof-présence de végétation-plrs tailles de grains, Test 4-2 à 1,2m de prof	DZM-20110621-T4
Convexité am zone stockage	198,7	8,016	**24,92**	55,01	Graviers grossiers	Cooper Scooper (G)	Test 7 et 8 combinés. Prof 1,4m, même endroit que le T4, peu de galets pour le T8	DZM-20110621-T7+8
Convexité am zone stockage	198,3	32,63	**52,36**	101,8	Graviers grossiers	Cooper Scooper (G)	Proche berge (filmé)	DZM-20110621-T10
Confluence canal-chenal	200,5	25,81	**38,61**	55,49	Graviers grossiers	Cooper Scooper	Milieu/rive droite du canal	DZM-20110622-T11
Amont zone stockage	200	22,93	**35,09**	42,82	Graviers grossiers	Cooper Scooper	Milieu/rive droite du canal	DZM-20110622-T12
Am stockage, début carrière	199,5	26,85	**50,28**	60,99	Graviers grossiers	Cooper Scooper	Rive droite	DZM-20110622-T13
Am stockage, début carrière	199,5	12,49	**23,03**	42,21	Graviers grossiers	Cooper Scooper	Milieu	DZM-20110622-T14
Am stockage, début carrière	199,5	16,12	**27,7**	55,2	Graviers grossiers	Cooper Scooper	Rive gauche	DZM-20110622-T15
Retenue aval confluence	201	8,26	**10,55**	19,02	Graviers moyens	Cooper Scooper	Rive droite	DZM-20110622-T16
Retenue	201,5	8,321	**17,93**	35,98	Graviers moyens	Cooper Scooper	Rive droite	DZM-20110622-T19
Retenue	201,5	45,24	**68,91**	85,32	Galets	Cooper Scooper	Milieu, 2ème mesure au GPS, faible quantité d'échantillon	DZM-20110622-T20
Av TGV, Am St Etienne Sorts	203	15,44	**34,42**	53,71	Graviers grossiers	Cooper Scooper	Rive gauche	DZM-20110623-T29
Am St Etienne des Sorts	203,5	32,16	**70,54**	85,72	Galets	Cooper Scooper	Milieu - Fin zone de retenue? Changement de faciès sédimentaire, sédiments semblent être plus meubles, prélèvements plus conséquents	DZM-20110623-T31
Am St Etienne des Sorts	203,5	23,81	**36,01**	52,16	Graviers grossiers	Cooper Scooper	Rive gauche	DZM-20110623-T32

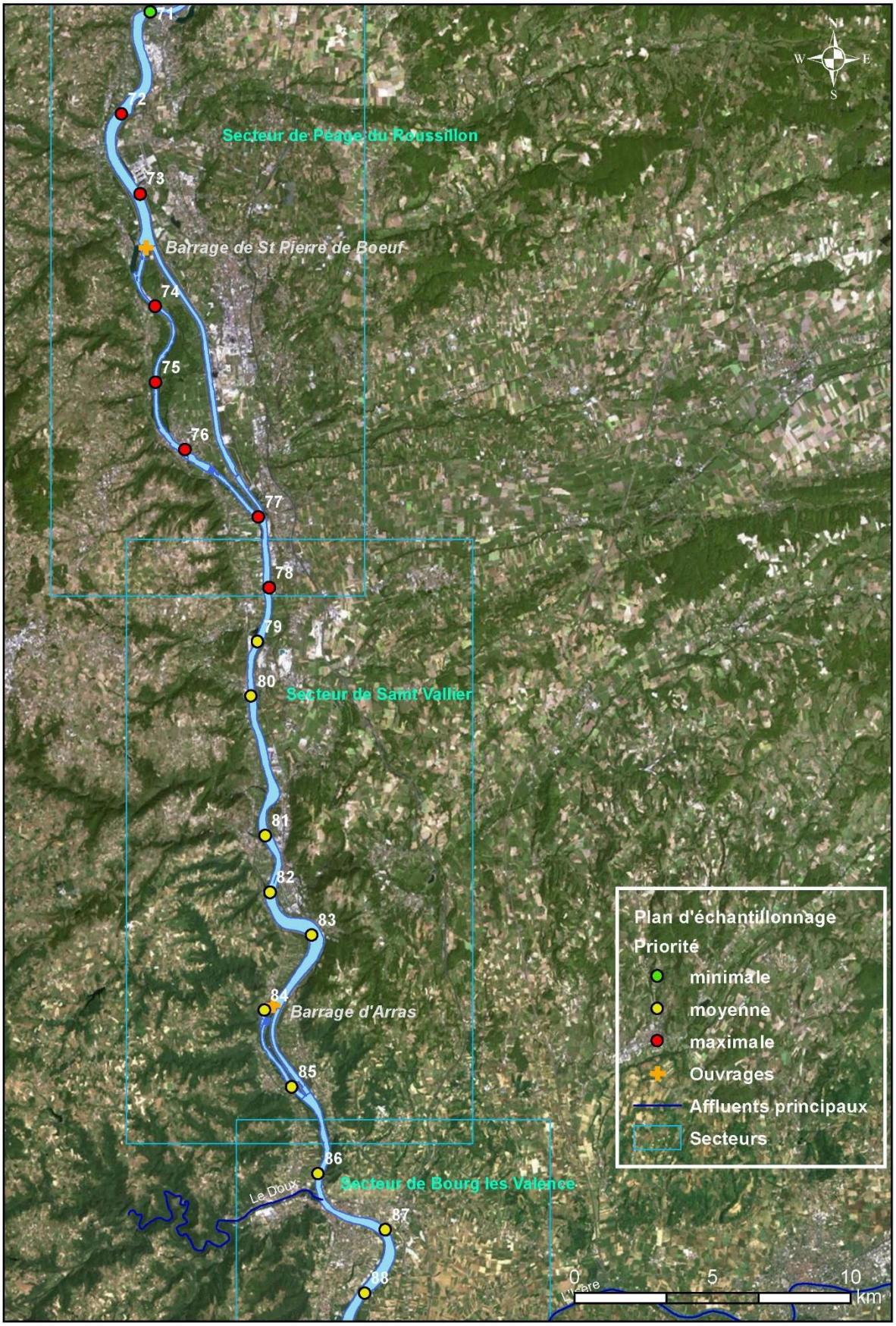
Annexe 20 : Plan d'échantillonnage établi selon le protocole de prélèvement systématique sur les points hauts du talweg du Léman à la mer

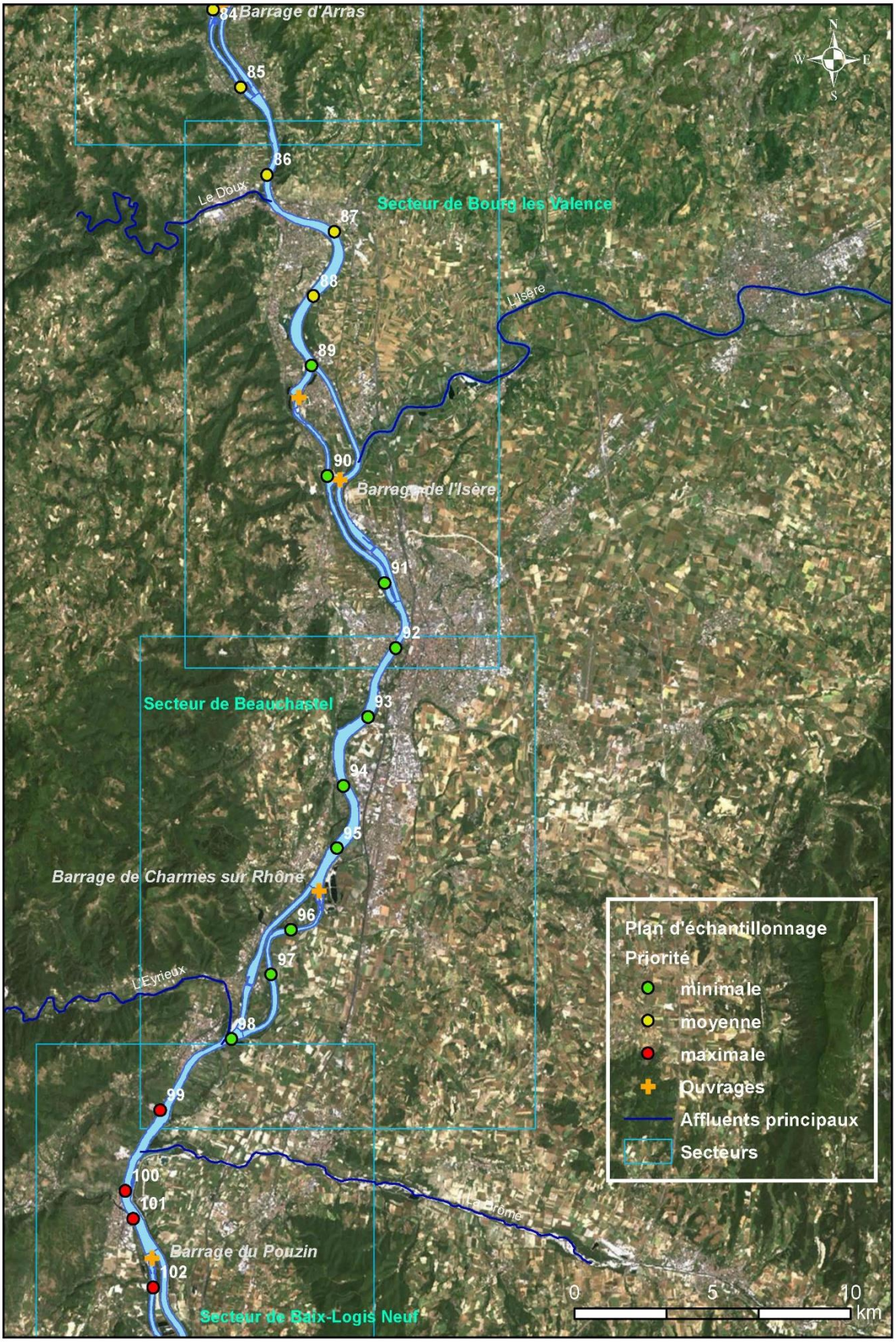


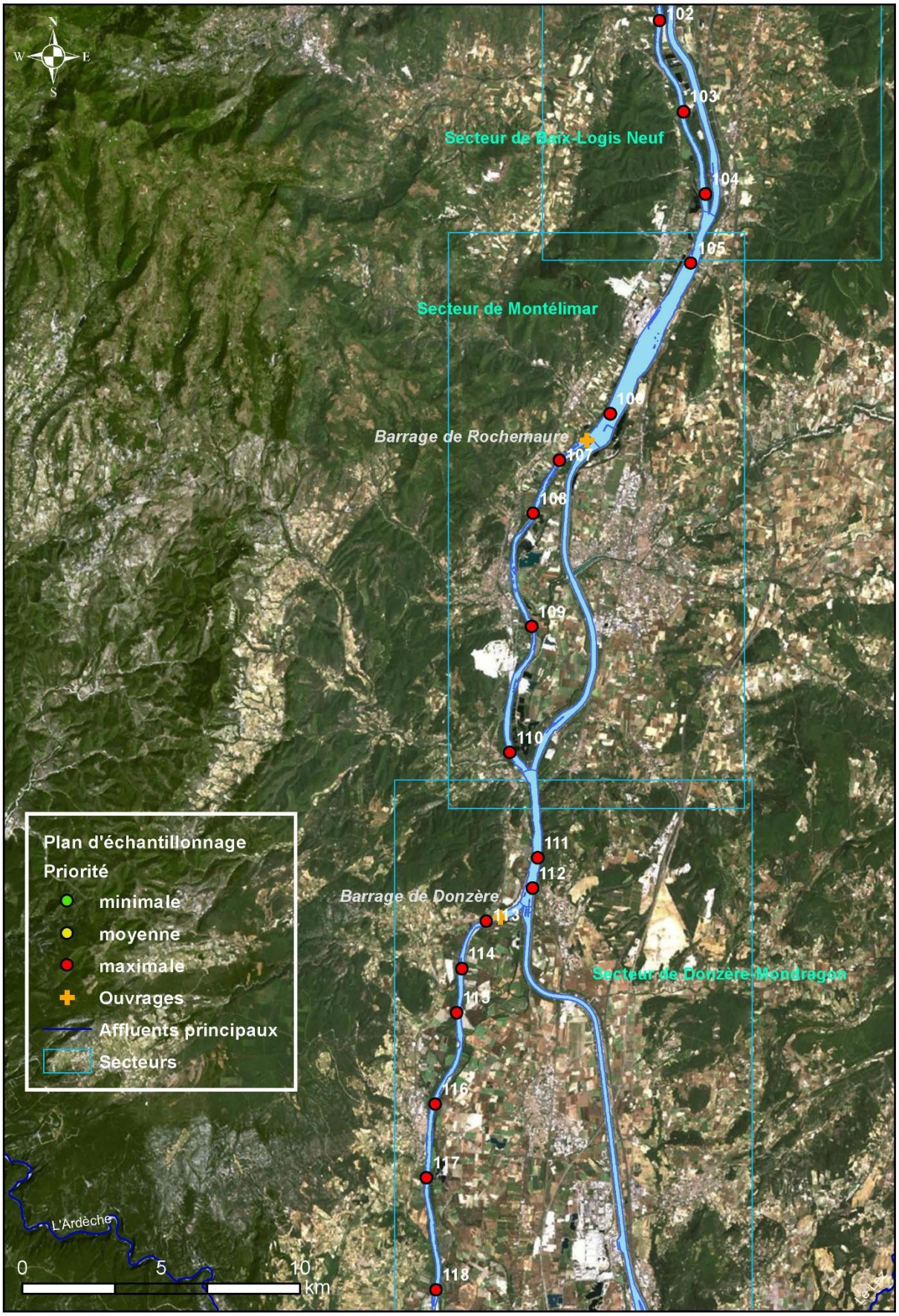

N
W
E
S
Secteur Chautagne
Barrage de Lavours
Secteur Belley
Secteur Sault-Brénaz
Barrage de Villebois
Secteur Brégnier-Cordon
Barrage-usine de Champagneux
Le Guiers
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
Plan d'échantillonnage
Priorité
minimale
moyenne
maximale
Ouvrages
Affluents principaux
Secteurs
0
5
10
km

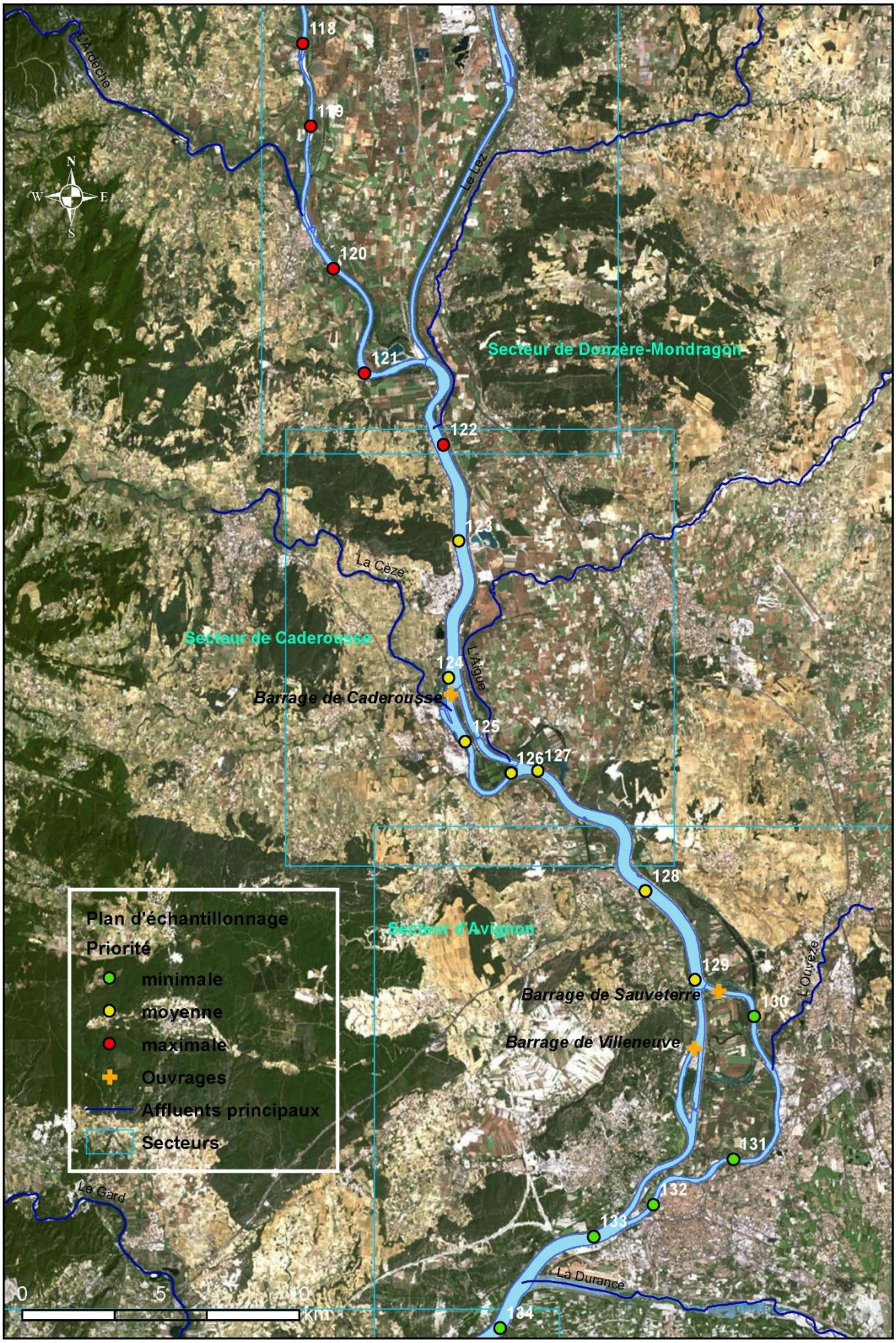

N
W
E
S
38
39
40
37
41
51
50
49
Barrage de Jons EDF
48
47
46
45
44
43
42
L'Ain
Barrage de Jonage EDF
Secteur Ain
Secteur Sault-Brénaz
Plan d'échantillonnage
Priorité
minimale
moyenne
maximale
Ouvrages
Affluents principaux
Secteurs
0
5
10
km

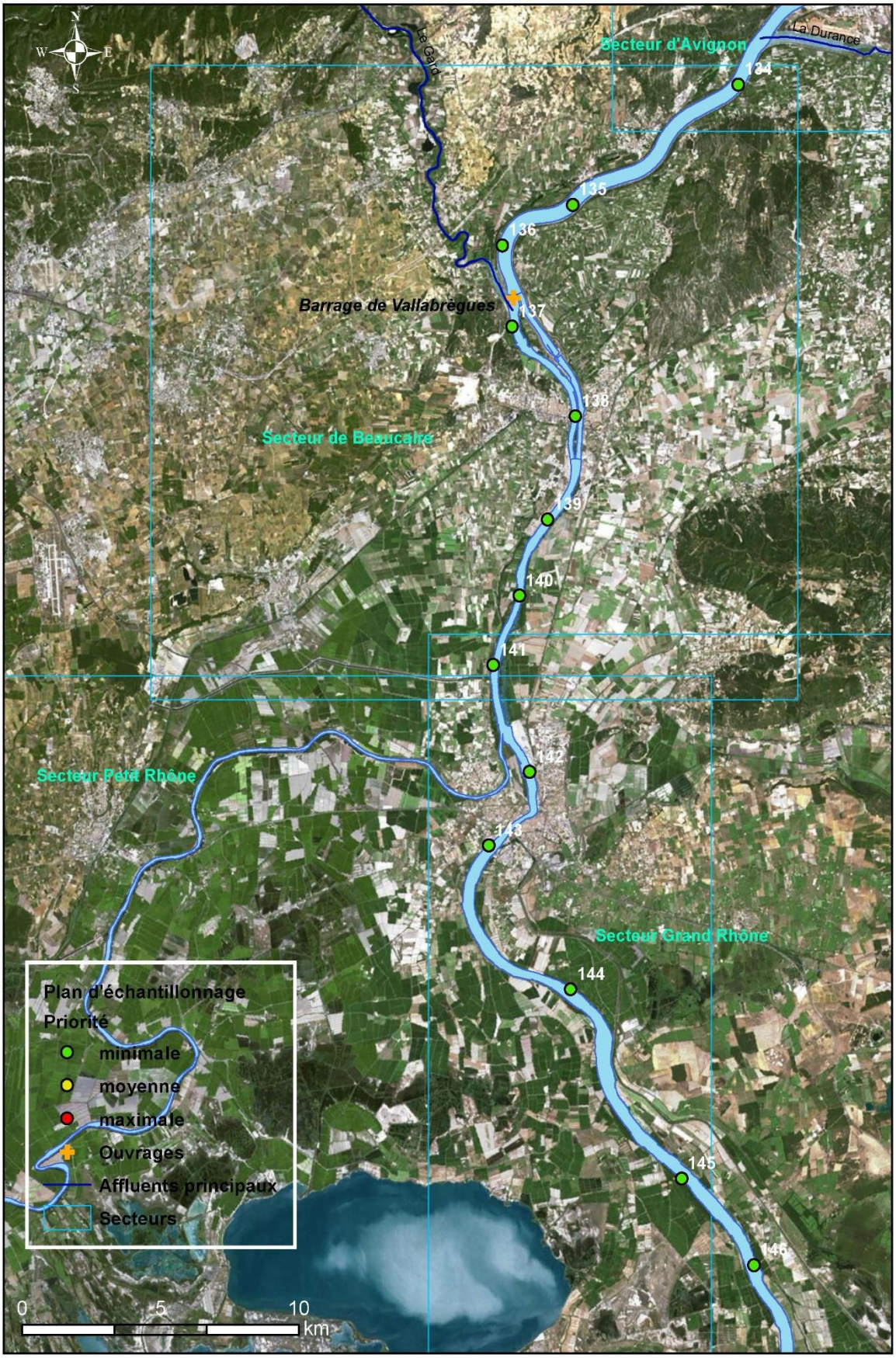

N
W
E
S
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
Le Saône
Barrage de Jonage EDF
Secteur de Lyon Miribel
Barrage de Pierre-Bénite
Secteur de Pierre Bénite
Secteur de Vaugris
Barrage de Vaugris
Secteur de Péage du Roussillon
Plan d'échantillonnage
Priorité
minimale
moyenne
maximale
Ouvrages
Affluents principaux
Secteurs
0
5
10
km


71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
Secteur de Péage du Roussillon
Barrage de St Pierre de Boeuf
Secteur de Saint Vallier
Barrage d'Arras
Secteur de Bourg les Valence
Le Doux
N
S
W
E
Plan d'échantillonnage
Priorité
minimale
moyenne
maximale
Ouvrages
Affluents principaux
Secteurs
0
5
10
km


Barrage d'Arras
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
Le Doux
Secteur de Bourg les Valence
L'Isère
Barrage de l'Isère
Secteur de Beauchastel
Barrage de Charmes sur Rhône
L'Eyrieux
La Drôme
Barrage du Pouzin
Secteur de Baix-Logis Neuf
Plan d'échantillonnage
Priorité
minimale
moyenne
maximale
Ouvrages
Affluents principaux
Secteurs
0
5
10
km


N
W
E
S
102
103
Secteur de Baix-Logis Neuf
104
105
Secteur de Montélimar
106
Barrage de Rochemaure
107
108
109
110
111
112
Barrage de Donzère
113
114
Secteur de Donzère-Mondragon
115
116
117
118
L'Ardèche
0
5
10
km
Plan d'échantillonnage
Priorité
minimale
moyenne
maximale
Ouvrages
Affluents principaux
Secteurs

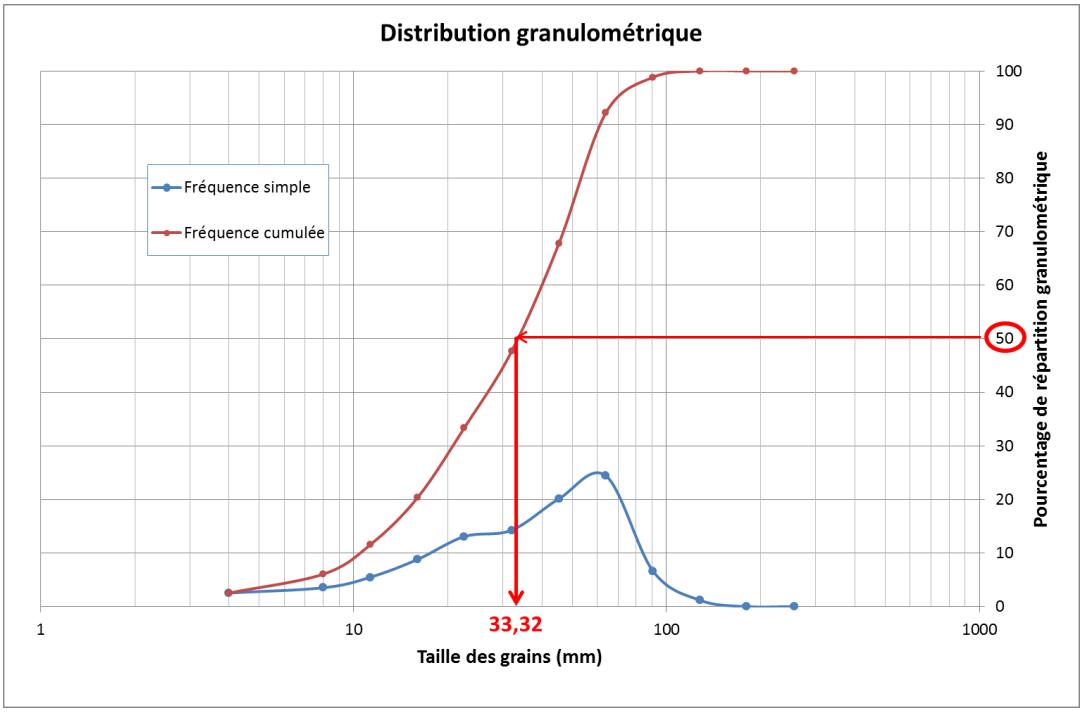

118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
L'Ardèche
La Lez
Secteur de Donzère-Mondragon
La Cèze
Secteur de Caderousse
L'Aigue
Barrage de Caderousse
Secteur d'Avignon
Barrage de Sauveterre
Barrage de Villeneuve
L'Ouvèze
Le Gard
La Durance
N
S
W
E
0
5
10
km
Plan d'échantillonnage
Priorité
minimale
moyenne
maximale
Ouvrages
Affluents principaux
Secteurs


N
W
E
S
Le Gard
La Durance
Secteur d'Avignon
134
135
136
Barrage de Vallabrègues
137
138
Secteur de Beaucaire
139
140
141
142
Secteur Petit Rhône
143
Secteur Grand Rhône
144
145
146
Plan d'échantillonnage
Priorité
minimale
moyenne
maximale
Ouvrages
Affluents principaux
Secteurs
0
5
10
km

144
145
146
147
148
149
150
Secteur Grand Rhône
Littoral
W
E
S
N
0
5
10
km
Plan d'échantillonnage
Priorité
minimale
moyenne
maximale
Ouvrages
Affluents principaux
Secteurs

Annexe 21 : Exemple d'analyse granulométrique : détermination graphique et calcul des percentiles

Outil mesure	Maille (mm)	Nombre sédiments	Cumul sédiments	% sediments	Cumul %
Gabarits	<8	13	13	2,5390625	2,5390625
Gabarits	8	18	31	3,515625	6,0546875
Gabarits	11,3	28	59	5,46875	11,5234375
Gabarits	16	45	104	8,7890625	20,3125
Gabarits	22,6	67	171	13,0859375	33,3984375
Gabarits	32	73	244	14,2578125	47,65625
Gabarits	45,3	103	347	20,1171875	67,7734375
Gabarits	64	125	472	24,4140625	92,1875
Gabarits	90,5	34	506	6,640625	98,828125
Gabarits	128	6	512	1,171875	100
Gabarits	180		512	0	100
Gabarits	256		512	0	100
	Total:	512	3483	100	680,2734375



Calcul des percentiles :

Convertir la taille des grains D en mm en Φ (unité phi) tel que : $\Phi_i = -\frac{\ln D_i}{\ln 2}$

Calculer pour chaque valeur la fraction massique de l'échantillon f_i : pourcentage cumulé (Cumul % dans le tableau) divisé par 100

Soit x la valeur du percentile recherché (D_x) tel que : $f_i \leq \frac{x}{100} \leq f_{i+1}$

Calculer la valeur Φ_x tel que : $\Phi_x = \Phi_i + \frac{\Phi_{i+1}-\Phi_{b,i}}{f_{f,i+1}-f_{f,i}}\left(\frac{x}{100} - f_{f,i}\right)$

Déduire la valeur du percentile recherché D_x selon la formule : $D_x = -2\Phi^x$

Annexe 22 : Données statistiques de la distribution granulométrique pour chaque échantillon issu des campagnes de 2012 à 2013 : prélèvements par comptage Wolman et par dragage (après fusion des 3 prélèvements effectués avec la drague de la CNR) – Les données grisées sont en-dessous de la limite de détection ; elles ont été déterminées à partir d'une courbe granulométrique de faible étendue

Prélèvement	Nom échantillon	PK	Bief	Masse total (g)	D50 moyen	D5	D10	D16	D25	D50	D75	D84	D95	D90	D99	Φ5	Φ10	Φ16	Φ25	Φ50	Φ75	Φ84	Φ90	Φ95	Φ99
Drague CNR	Génissiat CNR-6RD	-182,85	RC	27374	4,77					38,00															
Drague CNR	Génissiat CNR-6RG	-182,85	RC	33611						34,00															
Drague CNR	Génissiat CNR-7RD	-176,9	RC	1000						0,77															
Drague CNR	Génissiat CNR-7CHE	-176,9	RC	1000						0,47															
Drague CNR	Génissiat CNR-7RG	-176,9	RC	1000						0,40															
Drague CNR	Génissiat CNR-8RD	-176,05	RC	1000						0,40															
Drague CNR	Génissiat CNR-8CHE	-176,05	RC	1000						0,43															
Drague CNR	Génissiat CNR-5RD	-175,3	RC	1000						0,34															
Drague CNR	Génissiat CNR-5CHE	-175,3	RC	1000						0,33															
Drague CNR	Génissiat CNR-4CHE	-173,55	RC	2427						0,60															
Drague CNR	Génissiat CNR-9CHE	-172,05	RC	1000						0,38															
Drague CNR	Génissiat CNR-9RG	-172,05	RC	1000						0,09															
Drague CNR	Génissiat CNR-2RD	-165,93	RC	1000						0,02															
Drague CNR	Génissiat CNR-2RG	-165,93	RC	1000						0,02															
Drague CNR	Génissiat CNR-1CHE	-164,27	RC	1000						0,02															
Drague CNR	Génissiat CNR-1RD	-164,27	RC	1000						0,02															
Drague CNR	SEY-9-2013-07-11	-156	RC	74443,5	34,87	32,95	39,74	46,89	53,09	69,57	83,47	89,13	113,00	99,75	124,85	5,04	5,31	5,55	5,73	6,12	6,38	6,48	6,64	6,82	6,96
Drague CNR	SEY-10-2013-07-11	-152,5	RC	10237,67		0,13	0,13	0,14	0,15	0,17	0,19	0,19	0,22	0,20	0,25	-2,99	-2,92	-2,84	-2,72	-2,54	-2,41	-2,37	-2,33	-2,21	-2,02
Drague CNR	SEY-11-2012-08-21	-151	RC	82037,75	16,71	8,07	11,70	14,02	17,15	24,37	32,50	37,75	45,47	41,72	59,76	3,01	3,55	3,81	4,10	4,61	5,02	5,24	5,38	5,51	5,90
Drague CNR	SEY-12-2012-08-21	-149	RC	40712,90		0,20	0,55	0,97	4,89	25,55	36,03	44,15	54,29	52,13	61,23	-2,33	-0,87	-0,04	2,29	4,68	5,17	5,46	5,70	5,76	5,94
Drague CNR	SEY-13-a-2012-08-21	-147	RC	600,14		0,12	0,13	0,15	0,17	0,21	0,24	0,25	0,30	0,28	0,64	-3,00	-2,89	-2,76	-2,59	-2,28	-2,08	-2,00	-1,84	-1,71	-0,65
Wolman	CHA_2012-05-23_b1-t-ch	-143,75	RCC		31,22	7,22	9,51	16,00	18,94	27,59	38,85	44,26	78,33	54,78	221,06	2,85	3,25	4,00	4,24	4,79	5,28	5,47	5,78	6,29	7,79
Wolman	CHA_2012-05-23_b2-t-ch	-140,2	RCC			8,55	9,96	11,61	13,26	20,26	30,06	35,27	44,18	39,88	80,07	3,10	3,32	3,54	3,73	4,34	4,91	5,14	5,32	5,47	6,32
Drague CNR	CHA-18-2012-08-22	-138	RCC	133426,27		10,12	16,28	22,17	29,19	45,80	62,39	71,07	83,92	77,81	89,14	3,34	4,03	4,47	4,87	5,52	5,96	6,15	6,28	6,39	6,48
Drague CNR	CHA-19-2012-08-22	-135	RC	26931,17	14,16	0,26	0,31	12,13	18,05	28,22	36,87	40,07	44,28	42,34	55,28	-1,93	-1,67	3,60	4,17	4,82	5,20	5,32	5,40	5,47	5,79
Drague CNR	CHA-20-2012-08-22	-132,3	RC	4392,69		0,00	0,00	0,00	0,01	0,09	0,17	0,24	0,10	0,27	0,00	-10,07	-9,39	-8,58	-7,36	-3,41	-2,54	-2,04	-1,89	-3,29	-280,32
Wolman	BEY_2012-05-22_b2-t-ch	-128,9	RCC		34,57	12,48	14,12	16,17	17,92	23,72	30,64	35,70	47,55	40,99	63,74	3,64	3,82	4,01	4,16	4,57	4,94	5,16	5,36	5,57	5,99
Drague CNR	BEL-24-2012-08-22	-117	RCC	95952,46		8,26	11,98	17,15	24,90	45,42	74,81	88,42	113,80	101,18	125,02	3,05	3,58	4,10	4,64	5,51	6,23	6,47	6,66	6,83	6,97
Drague CNR	BEL-25-2012-08-22	-113,6	RC	89355,81	69,54	23,01	26,16	43,21	36,00	73,61	71,02	111,86	90,24	120,20	119,00	4,52	4,71	5,43	5,17	6,20	6,15	6,81	6,91	6,50	6,89
Drague CNR	BEL-26-a2-2012-08-23	-109	RC	4068,5		28,05	33,39	36,48	41,66	65,48	76,98	81,60	87,62	84,83	89,92	4,81	5,06	5,19	5,38	6,03	6,27	6,35	6,41	6,45	6,49
Drague CNR	BRC-28-2013-02-21	-100,5	RCC	79385,29	23,68	12,39	15,40	17,42	20,21	28,12	40,00	46,29	57,84	52,27	62,72	3,63	3,95	4,12	4,34	4,81	5,32	5,53	5,71	5,85	5,97
Wolman	BRC_2012-05-11_b1-t-ch	-100,4	RCC			6,54	8,36	10,13	13,13	18,95	25,35	29,61	41,59	34,01	56,76	2,71	3,06	3,34	3,71	4,24	4,66	4,89	5,09	5,38	5,83
Wolman	BRC_2012-05-11_b1-m-ch	-100,1	RCC			6,34	7,28	8,39	9,92	14,75	20,31	22,78	31,36	27,12	55,39	2,66	2,86	3,07	3,31	3,88	4,34	4,51	4,76	4,97	5,79
Wolman	BRC_2012-05-11_b1-q-ch	-99,95	RCC			5,61	6,29	7,30	9,11	15,68	24,11	28,78	38,81	32,67	44,54	2,49	2,65	2,87	3,19	3,97	4,59	4,85	5,03	5,28	5,48
Drague CNR	BRC-29-2013-02-21	-97,7	RCC	46953,04		16,62	20,89	25,17	31,55	42,09	56,19	62,41	79,86	70,46	88,26	4,06	4,38	4,65	4,98	5,40	5,81	5,96	6,14	6,32	6,46
Wolman	BRC_2012-05-11_b2-t-ch	-97,5	RCC			7,00	8,41	9,65	11,63	16,34	21,33	24,69	34,01	28,67	54,83	2,81	3,07	3,27	3,54	4,03	4,41	4,63	4,84	5,09	5,78
Drague CNR	BRC-29,5-2013-02-21	-97,4	RCC	47639,83		11,00	12,82	15,08	17,58	24,61	34,65	41,12	54,63	46,63	62,01	3,46	3,68	3,91	4,14	4,62	5,11	5,36	5,54	5,77	5,95
Wolman	BRC_2012-05-11_b2-m-ch	-97,2	RCC			5,94	7,40	9,56	12,58	19,42	28,59	33,72	43,33	38,66	60,56	2,57	2,89	3,26	3,65	4,28	4,84	5,08	5,27	5,44	5,92
Wolman	BRC_2012-05-11_b2-q-ch	-97	RCC			5,55	6,16	7,30	10,37	23,64	34,47	41,59	58,20	48,54	78,24	2,47	2,62	2,87	3,37	4,56	5,11	5,38	5,60	5,86	6,29
Drague CNR	BRC-30-2013-02-21	-92,2	RCC	76190,69		8,72	12,04	15,12	19,22	33,17	47,86	54,38	63,57	59,22	83,83	3,12	3,59	3,92	4,26	5,05	5,58	5,77	5,89	5,99	6,39
Drague CNR	BRC-31-2012-08-23	-90,5	RC	82582,53	12,27	9,11	11,38	12,64	14,79	20,40	29,01	34,28	46,77	40,20	60,11	3,19	3,51	3,66	3,89	4,35	4,86	5,10	5,33	5,55	5,91
Drague CNR	BRC-32-2012-08-23	-87,5	RC	49057,65		4,41	6,58	7,93	9,87	16,06	22,63	26,22	31,38	28,92	42,64	2,14	2,72	2,99	3,30	4,01	4,50	4,71	4,85	4,97	5,41
Drague CNR	BRC-33-2012-08-24	-80	RC	10158,45		0,04	0,20	0,23	0,27	0,35	0,84	6,82	8,66	8,47	10,98	-4,54	-2,30	-2,10	-1,91	-1,50	-0,26	2,77	3,08	3,11	3,46
Drague CNR	SBZ-34-2012-08-24	-74,6	RC	1718,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,09	0,13	1,51	0,16	7,62	-10,66	-10,18	-9,60	-8,74	-6,35	-3,55	-2,98	-2,62	0,59	2,93
Drague CNR	SBZ-36bis-a-2012-08-24	-66	RC	442,92		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05	0,03	0,16	-15,25	-14,64	-13,92	-12,83	-9,80	-6,77	-5,68	-4,95	-4,35	-2,64
Wolman	SBR_2012-05-10_b1-t-ch	-63,32	RCC		32,32	7,60	9,63	12,14	15,88	29,05	52,49	63,38	82,23	73,01	90,44	2,93	3,27	3,60	3,99	4,86	5,71	5,99	6,19	6,36	6,50
Wolman	SBR_2012-05-10_b1-m-ch	-63,22	RCC			5,43	5,90	7,15	12,57	35,59	52,84	58,63	73,66	62,84	86,85	2,44	2,56	2,84	3,65	5,15	5,72	5,87	5,97	6,20	6,44

Prélèvement	Nom échantillon	PK	Bief	Skewness (Sk)	$(Sk/\Phi50)_{CR}$	Kurtosis (K)	$(K/\Phi50)_{CR}$	Moyenne (M)	$(M/\Phi50)_{CR}$	Classement (So)	$(So/\Phi50)_{CR}$
Drague CNR	Génissiat CNR-6RD	-182,85	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-6RG	-182,85	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-7RD	-176,9	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-7CHE	-176,9	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-7RG	-176,9	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-8RD	-176,05	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-8CHE	-176,05	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-5RD	-175,3	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-5CHE	-175,3	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-4CHE	-173,55	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-9CHE	-172,05	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-9RG	-172,05	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-2RD	-165,93	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-2RG	-165,93	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-1CHE	-164,27	RC								
Drague CNR	Génissiat CNR-1RD	-164,27	RC								
Drague CNR	SEY-9-2013-07-11	-156	RC	-0,22	-0,01	1,12	-0,19	-6,05	0,15	11,90	-0,35
Drague CNR	SEY-10-2013-07-11	-152,5	RC	-0,19	-1,54	1,04	1,33	2,58	0,36	-0,10	1,53
Drague CNR	SEY-11-2012-08-21	-151	RC	-0,20	0,08	1,11	-0,33	-4,55	0,14	5,31	0,43
Drague CNR	SEY-12-2012-08-21	-149	RC	-0,72	1,60	1,15	-0,35	-3,37	-1,97	6,82	0,13
Drague CNR	SEY-13-a-2012-08-21	-147	RC	-0,18	-1,59	1,02	1,42	2,35	0,46	-0,16	1,51
Drague CNR	SEY-13-c2-2012-08-21	-147	RC								
Drague CNR	*SEY-13-2012-08-21*	*-147*	*RC*								
Wolman	CHA_2012-05-23_b1-t-ch	-143,75	RCC	-0,10	-0,22	1,36	-0,45	-4,75	0,18	10,41	-0,58
Wolman	CHA_2012-05-23_b2-t-ch	-140,2	RCC	-0,03	-0,41	0,82	-0,20	-4,34	0,24	5,00	0,44
Drague CNR	CHA-18-2012-08-22	-138	RCC	-0,34	0,33	1,14	-0,25	-5,38	0,04	10,76	-0,35
Drague CNR	CHA-19-2012-08-22	-135	RC	-0,62	1,25	2,94	-1,28	-4,58	-0,15	6,24	0,29
Drague CNR	CHA-20-2012-08-22	-132,3	RC	-0,77	-3,58	0,58	0,71	4,68	3,18	-1,62	1,11
Wolman	BEY_2012-05-22_b2-t-ch	-128,9	RCC	0,04	-0,61	1,02	-0,29	-4,58	0,26	5,03	0,49
Drague CNR	BEL-24-2012-08-22	-117	RCC	-0,24	0,10	0,98	-0,17	-5,36	0,03	15,40	-1,19
Drague CNR	BEL-25-2012-08-22	-113,6	RC	-0,41	0,40	0,82	-0,06	-6,15	0,17	9,84	0,00
Drague CNR	BEL-26-a2-2012-08-23	-109	RC	-0,47	0,56	0,76	-0,04	-5,86	0,01	8,74	0,14
Drague CNR	BRC-28-2013-02-21	-100,5	RCC	-0,02	-0,44	0,92	-0,21	-4,82	0,25	6,53	0,23
Wolman	BRC_2012-05-11_b1-t-ch	-100,4	RCC	-0,16	0,01	1,15	-0,41	-4,16	0,08	4,92	0,43
Wolman	BRC_2012-05-11_b1-m-ch	-100,1	RCC	-0,09	-0,17	0,91	-0,32	-3,82	0,11	3,43	0,70
Wolman	BRC_2012-05-11_b1-q-ch	-99,95	RCC	-0,09	-0,19	0,81	-0,24	-3,89	0,09	4,54	0,44
Drague CNR	BRC-29-2013-02-21	-97,7	RCC	-0,16	-0,10	1,11	-0,25	-5,34	0,15	9,25	-0,12
Wolman	BRC_2012-05-11_b2-t-ch	-97,5	RCC	-0,10	-0,17	1,07	-0,40	-3,98	0,13	3,75	0,65
Drague CNR	BRC-29,5-2013-02-21	-97,4	RCC	0,01	-0,53	0,97	-0,25	-4,63	0,26	6,25	0,24
Wolman	BRC_2012-05-11_b2-m-ch	-97,2	RCC	-0,16	0,00	0,99	-0,31	-4,20	0,10	5,21	0,37
Wolman	BRC_2012-05-11_b2-q-ch	-97	RCC	-0,29	0,37	0,80	-0,17	-4,27	-0,27	7,35	-0,02
Drague CNR	BRC-30-2013-02-21	-92,2	RCC	-0,29	0,27	0,89	-0,17	-4,91	0,02	7,85	0,04
Drague CNR	BRC-31-2012-08-23	-90,5	RC	0,03	-0,58	0,99	-0,30	-4,37	0,27	5,35	0,36
Drague CNR	BRC-32-2012-08-23	-87,5	RC	-0,25	0,35	0,97	-0,34	-3,90	0,04	3,66	0,67
Drague CNR	BRC-33-2012-08-24	-80	RC	0,48	3,86	1,90	3,52	0,28	-6,21	0,09	1,63
Drague CNR	SBZ-34-2012-08-24	-74,6	RC	0,13	-0,23	0,89	0,64	6,31	0,19	-1,43	1,35
Drague CNR	SBZ-36bis-a-2012-08-24	-66	RC	0,00	-0,50	0,74	0,47	9,80	0,24	-2,05	1,37
Wolman	SBR_2012-05-10_b1-t-ch	-63,32	RCC	-0,09	-0,24	0,82	-0,15	-4,82	0,17	10,71	-0,61
Wolman	SBR_2012-05-10_b1-m-ch	-63,22	RCC	-0,48	0,78	0,74	-0,09	-4,62	-0,58	9,58	-0,26

Prélèvement	Nom échantillon	PK	Bief	Masse total (g)	D50 moyen	D5	D10	D16	D25	D50	D75	D84	D95	D90	D99	Φ5	Φ10	Φ16	Φ25	Φ50	Φ75	Φ84	Φ90	Φ95	Φ99
Drague CNR	AIN-38-2012-08-27	-58	RC	110067,66		16,26	18,56	21,76	24,66	32,73	41,34	44,97	63,24	53,71	83,98	4,02	4,21	4,44	4,62	5,03	5,37	5,49	5,75	5,98	6,39
Drague CNR	AIN-39-2012-08-27	-55	RC	117909,61		0,87	2,39	5,92	9,09	16,17	21,57	25,09	31,61	28,46	54,01	-0,20	1,26	2,57	3,18	4,02	4,43	4,65	4,83	4,98	5,76
Drague CNR	AIN-40-2012-08-27	-52,1	RC	117959		16,74	19,80	23,29	26,55	36,76	49,86	56,77	72,21	61,89	86,50	4,06	4,31	4,54	4,73	5,20	5,64	5,83	5,95	6,17	6,43
Wolman	AIN_2012-05-14_b1-t-ch	-49,8	RC			8,05	9,80	12,22	16,11	20,23	27,17	30,91	41,35	35,62	53,57	3,01	3,29	3,61	4,01	4,34	4,76	4,95	5,15	5,37	5,74
Drague CNR	AIN-41-2012-08-27	-46,4	RC	143688,4		17,01	21,79	26,13	32,92	49,02	68,69	80,71	106,86	89,86	123,46	4,09	4,45	4,71	5,04	5,62	6,10	6,33	6,49	6,74	6,95
Drague CNR	AIN-42-2012-08-28	-41,3	RC	84205,1		13,48	17,06	19,47	23,13	29,83	38,79	42,68	60,25	46,25	82,73	3,75	4,09	4,28	4,53	4,90	5,28	5,42	5,53	5,91	6,37
Drague CNR	AIN-43-2012-08-28	-35,4	RC	100627,71	32,67	27,30	37,66	46,33	53,76	77,74	106,69	118,87	151,36	127,75	173,87	4,77	5,23	5,53	5,75	6,28	6,74	6,89	7,00	7,24	7,44
Drague CNR	AIN-44-2012-08-28	-33,1	RC	116981,02		24,43	30,93	34,66	39,71	51,96	64,27	74,48	89,18	82,17	117,63	4,61	4,95	5,12	5,31	5,70	6,01	6,22	6,36	6,48	6,88
Drague CNR	AIN-45-2012-08-28	-32	RC	153565,33		13,68	17,21	20,20	24,48	36,49	56,81	70,12	95,99	81,75	120,84	3,77	4,10	4,34	4,61	5,19	5,83	6,13	6,35	6,58	6,92
Drague CNR	AIN-46-2012-08-29	-29,9	RC	131128,69		5,53	6,44	7,13	8,36	13,55	21,47	26,55	38,34	31,02	50,73	2,47	2,69	2,83	3,06	3,76	4,42	4,73	4,96	5,26	5,66
Drague CNR	AIN-47-2012-08-29	-28,3	RC	26881,37		8,47	9,60	11,16	12,13	14,94	18,51	20,01	22,01	21,08	26,82	3,08	3,26	3,48	3,60	3,90	4,21	4,32	4,40	4,46	4,75
Drague CNR	AIN-48-2012-08-29	-27,4	RC	51133,85		6,34	7,33	8,38	9,65	12,62	15,18	16,72	21,55	19,20	55,67	2,66	2,87	3,07	3,27	3,66	3,92	4,06	4,26	4,43	5,80
Drague CNR	LYM-51-2013-03-20	-21	RCC	172357,33		16,02	20,93	25,82	32,94	48,20	60,47	67,33	82,51	75,22	88,84	4,00	4,39	4,69	5,04	5,59	5,92	6,07	6,23	6,37	6,47
Drague CNR	LYM-52-2013-03-20	-18,8	RCC	90709,39		20,56	24,76	28,81	34,41	50,67	76,91	89,40	114,26	102,00	125,13	4,36	4,63	4,85	5,10	5,66	6,27	6,48	6,67	6,84	6,97
Wolman	LYM_2012-05-03_b1-t-ch	-18,2	RCC			7,63	9,31	11,38	12,60	16,91	24,46	28,36	41,67	31,30	58,50	2,93	3,22	3,51	3,66	4,08	4,61	4,83	4,97	5,38	5,87
Wolman	LYM_2012-05-03_b1-m-ch	-18,1	RCC			6,32	7,07	8,10	10,18	16,44	26,76	32,42	42,95	37,79	56,84	2,66	2,82	3,02	3,35	4,04	4,74	5,02	5,24	5,42	5,83
Wolman	LYM_2012-05-03_b1-q-ch	-18	RCC		27,16	6,47	7,20	8,26	10,90	17,09	22,43	26,83	37,31	30,37	53,20	2,69	2,85	3,05	3,45	4,10	4,49	4,75	4,92	5,22	5,73
Wolman	LYM_2012-05-03_b2-t-ch	-17,4	RCC			10,16	12,09	13,72	16,49	25,19	36,05	40,62	55,16	43,98	80,35	3,34	3,60	3,78	4,04	4,66	5,17	5,34	5,46	5,79	6,33
Wolman	LYM_2012-05-03_b2-m-ch	-17,2	RCC			10,01	13,72	16,67	18,95	25,19	31,24	36,91	50,98	42,36	64,22	3,32	3,78	4,06	4,24	4,66	4,97	5,21	5,40	5,67	6,00
Wolman	LYM_2012-05-03_b2-q-ch	-17	RCC			7,67	9,54	12,02	16,09	21,61	29,60	34,71	50,95	41,14	75,32	2,94	3,25	3,59	4,01	4,43	4,89	5,12	5,36	5,67	6,23
Drague CNR	LYM-53-2013-03-20	-15,4	RCC	162639,67		10,22	12,24	14,01	16,67	23,16	32,21	38,58	53,73	43,51	75,67	3,35	3,61	3,81	4,06	4,53	5,01	5,27	5,44	5,75	6,24
Drague CNR	LYM-56-2012-08-30	-7,6	RC	123793,6		15,92	23,95	33,64	46,47	77,88	106,21	116,47	140,01	123,85	171,18	3,99	4,58	5,07	5,54	6,28	6,73	6,86	6,95	7,13	7,42
Drague CNR	LYM-57-2012-08-30	-3,3	RC	106990,79		26,10	32,63	35,88	41,39	52,83	65,57	82,80	111,51	97,15	124,52	4,71	5,03	5,17	5,37	5,72	6,04	6,37	6,60	6,80	6,96
Drague CNR	LYM-58-2012-08-30	-0,3	RC	18262,77	37,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	21,43	33,60	53,89	45,38	61,84	-17,43	-15,96	-14,20	-11,55	-3,90	4,42	5,07	5,50	5,75	5,95
Drague CNR	LYM-59-2012-08-30	1	RC	111381,28		0,33	1,84	17,50	21,59	35,38	52,49	61,73	89,53	75,86	111,69	-1,59	0,88	4,13	4,43	5,14	5,71	5,95	6,25	6,48	6,80
Drague CNR	LYM-60-2012-08-30	3	RC	13861,65		0,00	0,00	0,00	0,01	21,63	21,61	64,73	29,81	73,40	31,73	-13,47	-11,92	-10,05	-7,25	4,43	4,43	6,02	6,20	4,90	4,99
Wolman	PBN_2012-04-25_b1-t-ch	9,5	RCC			6,22	13,14	20,56	27,74	54,31	77,92	86,71	111,29	96,76	124,47	2,64	3,72	4,36	4,79	5,76	6,28	6,44	6,60	6,80	6,96
Drague CNR	PBN-62-2012-08-31	10	RCC	136372,38		1,53	6,13	17,11	12,72	74,45	32,51	104,36	58,25	112,67	78,96	0,61	2,62	4,10	3,67	6,22	5,02	6,71	6,82	5,86	6,30
Wolman	PBN_2012-04-25_b1-m-ch	10,3	RCC			6,93	9,19	12,43	22,60	46,23	61,45	72,44	98,12	83,08	127,12	2,79	3,20	3,64	4,50	5,53	5,94	6,18	6,38	6,62	6,99
Wolman	PBN_2012-04-25_b1-q-ch	10,7	RCC			14,17	17,67	20,27	28,26	44,67	57,48	62,84	81,36	71,36	90,37	3,82	4,14	4,34	4,82	5,48	5,85	5,97	6,16	6,35	6,50
Wolman	PBN_2012-05-02_b2-t-ch	11,115	RCC		44,57	15,77	19,02	23,26	28,74	43,30	60,59	76,35	109,80	94,19	124,13	3,98	4,25	4,54	4,85	5,44	5,92	6,25	6,56	6,78	6,96
Wolman	PBN_2012-05-02_b2-t2-ch	11,25	RCC			9,76	16,48	23,31	31,57	50,83	71,49	79,73	93,69	85,75	120,26	3,29	4,04	4,54	4,98	5,67	6,16	6,32	6,42	6,55	6,91
Wolman	PBN_2012-05-02_b2-m-ch	11,5	RCC			12,24	17,50	23,85	29,18	47,23	64,28	75,47	95,06	84,00	120,60	3,61	4,13	4,58	4,87	5,56	6,01	6,24	6,39	6,57	6,91
Wolman	PBN_2012-05-02_b2-q-ch	12,5	RCC			7,20	8,68	11,36	12,73	17,16	22,13	26,38	35,75	30,16	43,20	2,85	3,12	3,51	3,67	4,10	4,47	4,72	4,91	5,16	5,43
Drague CNR	PBN-63-2012-08-31	13,5	RCC	129653,62		1,53	6,13	8,61	12,72	22,93	32,51	40,61	58,25	48,11	78,96	0,61	2,62	3,11	3,67	4,52	5,02	5,34	5,59	5,86	6,30
Drague CNR	PBN-64-2012-08-31	16,5	RC	58210,6		45,55	48,55	52,42	58,81	73,84	89,71	101,47	119,04	110,70	126,16	5,51	5,60	5,71	5,88	6,21	6,49	6,66	6,79	6,90	6,98
Drague CNR	VAU-65-2013-01-23	23	RC	63998,2		0,26	0,40	0,95	7,30	29,69	64,59	77,95	105,04	88,32	122,90	-1,97	-1,30	-0,07	2,87	4,89	6,01	6,28	6,46	6,71	6,94
Drague CNR	VAU-66-2013-01-23	26	RC	66464,1	57,56	35,42	43,15	46,97	50,30	60,84	76,28	83,14	100,43	88,06	121,94	5,15	5,43	5,55	5,65	5,93	6,25	6,38	6,46	6,65	6,93
Drague CNR	VAU-67-a-2013-01-23	29,5	RC	34919,40		25,14	32,58	36,08	42,03	58,76	79,13	87,86	112,53	98,93	124,75	4,65	5,03	5,17	5,39	5,88	6,31	6,46	6,63	6,81	6,96
Drague CNR	VAU-69-2013-01-24	34,5	RC	117023,74		16,97	23,26	29,43	37,47	64,68	93,18	104,47	120,13	112,74	126,38	4,08	4,54	4,88	5,23	6,02	6,54	6,71	6,50	6,91	6,98
Drague CNR	VAU-70-2013-01-24	37	RC	111063,55		26,56	33,63	38,00	45,47	58,55	76,49	84,46	107,10	90,23	123,52	4,73	5,07	5,25	5,51	5,87	6,26	6,40	6,26	6,74	6,95
Drague CNR	VAU-71-2013-01-24	42	RC	101476,79		17,22	21,32	24,84	29,83	43,05	56,87	62,61	97,24	76,54	121,15	4,11	4,41	4,63	4,90	5,43	5,83	5,97	6,26	6,60	6,92
Drague CNR	VAU-72-a-2013-01-24	46	RC	3143,4	32,53	0,44	0,57	2,90	7,04	11,53	19,20	33,04	41,04	37,19	44,41	-1,18	-0,82	1,53	2,82	3,53	4,26	5,05	5,22	5,36	5,47
Drague CNR	VAU-72-a2-2013-01-24	46	RC	11577,2		9,01	11,31	12,29	13,94	18,17	22,43	25,40	29,77	27,70	31,54	3,17	3,50	3,62	3,80	4,18	4,49	4,67	4,79	4,90	4,98
Drague CNR	VAU-73-a-2013-01-24	49	RC	1981,72		7,33	10,24	14,81	24,43	31,35	37,79	40,34	43,69	42,13	44,97	2,87	3,36	3,89	4,61	4,97	5,24	5,33	5,40	5,45	5,49

Prélèvement	Nom échantillon	PK	Bief	Skewness (Sk)	$(Sk/\Phi50)_{CR}$	Kurtosis (K)	$(K/\Phi50)_{CR}$	Moyenne (M)	$(M/\Phi50)_{CR}$	Classement (So)	$(So/\Phi50)_{CR}$
Drague CNR	AIN-38-2012-08-27	-58	RC	-0,08	-0,29	1,08	-0,27	-4,99	0,17	6,86	0,23
Drague CNR	AIN-39-2012-08-27	-55	RC	-0,51	1,23	1,70	-0,80	-3,74	-0,30	4,14	0,56
Drague CNR	AIN-40-2012-08-27	-52,1	RC	-0,05	-0,37	0,95	-0,19	-5,19	0,22	8,08	0,04
Wolman	AIN_2012-05-14_b1-t-ch	-49,8	RC	-0,11	-0,16	1,28	-0,47	-4,30	0,17	4,71	0,50
Drague CNR	AIN-41-2012-08-27	-46,4	RC	-0,13	-0,17	1,02	-0,19	-5,55	0,15	13,21	-0,75
Drague CNR	AIN-42-2012-08-28	-41,3	RC	-0,07	-0,29	1,19	-0,34	-4,87	0,19	6,80	0,20
Drague CNR	AIN-43-2012-08-28	-35,4	RC	-0,16	-0,15	1,02	-0,14	-6,24	0,18	18,46	-1,33
Drague CNR	AIN-44-2012-08-28	-33,1	RC	-0,11	-0,23	1,10	-0,21	-5,68	0,21	9,53	-0,08
Drague CNR	AIN-45-2012-08-28	-32	RC	0,02	-0,56	0,95	-0,19	-5,22	0,28	12,02	-0,72
Drague CNR	AIN-46-2012-08-29	-29,9	RC	0,05	-0,67	0,84	-0,29	-3,77	0,27	4,50	0,39
Drague CNR	AIN-47-2012-08-29	-28,3	RC	-0,09	-0,17	0,93	-0,33	-3,90	0,24	1,84	1,11
Drague CNR	AIN-48-2012-08-29	-27,4	RC	-0,16	0,08	1,11	-0,49	-3,60	0,11	2,05	1,02
Drague CNR	LYM-51-2013-03-20	-21	RCC	-0,32	0,29	1,11	-0,22	-5,45	0,04	9,73	-0,15
Drague CNR	LYM-52-2013-03-20	-18,8	RCC	-0,02	-0,44	0,87	-0,11	-5,66	0,24	13,79	-0,83
Wolman	LYM_2012-05-03_b1-t-ch	-18,2	RCC	0,10	-0,82	1,05	-0,38	-4,14	0,35	4,83	0,40
Wolman	LYM_2012-05-03_b1-m-ch	-18,1	RCC	-0,01	-0,47	0,81	-0,23	-4,03	0,21	5,05	0,34
Wolman	LYM_2012-05-03_b1-q-ch	-18	RCC	-0,17	0,07	1,00	-0,34	-3,96	-0,02	4,25	0,55
Wolman	LYM_2012-05-03_b2-t-ch	-17,4	RCC	-0,10	-0,22	0,89	-0,21	-4,59	0,13	6,43	0,21
Wolman	LYM_2012-05-03_b2-m-ch	-17,2	RCC	-0,09	-0,25	1,33	-0,45	-4,64	0,21	5,92	0,32
Wolman	LYM_2012-05-03_b2-q-ch	-17	RCC	-0,10	-0,19	1,27	-0,45	-4,38	0,14	6,17	0,20
Drague CNR	LYM-53-2013-03-20	-15,4	RCC	0,01	-0,53	1,03	-0,30	-4,54	0,25	6,23	0,22
Drague CNR	LYM-56-2012-08-30	-7,6	RC	-0,41	0,38	1,08	-0,16	-6,07	-0,02	18,35	-1,32
Drague CNR	LYM-57-2012-08-30	-3,3	RC	0,05	-0,62	1,29	-0,30	-5,75	0,28	12,64	-0,61
Drague CNR	LYM-58-2012-08-30	-0,3	RC	-0,12	-0,91	0,59	0,67	4,34	1,13	3,35	2,42
Drague CNR	LYM-59-2012-08-30	1	RC	-0,39	0,54	2,58	-1,00	-5,07	0,13	13,06	-0,94
Drague CNR	LYM-60-2012-08-30	3	RC	-0,88	2,19	0,64	-0,09	-0,13	-7,43	0,50	1,46
Wolman	PBN_2012-04-25_b1-t-ch	9,5	RCC	-0,43	0,51	1,14	-0,23	-5,52	-0,09	15,40	-1,07
Drague CNR	PBN-62-2012-08-31	10	RCC	-0,88	1,43	1,59	-0,37	-5,67	-0,45	7,94	0,31
Wolman	PBN_2012-04-25_b1-m-ch	10,3	RCC	-0,46	0,64	1,09	-0,22	-5,12	-0,35	13,18	-0,78
Wolman	PBN_2012-04-25_b1-q-ch	10,7	RCC	-0,36	0,38	1,01	-0,19	-5,27	-0,07	9,77	-0,19
Wolman	PBN_2012-05-02_b2-t-ch	11,115	RCC	-0,04	-0,39	1,07	-0,22	-5,41	0,20	13,82	-0,94
Wolman	PBN_2012-05-02_b2-t2-ch	11,25	RCC	-0,36	0,37	1,13	-0,23	-5,51	0,02	12,27	-0,57
Wolman	PBN_2012-05-02_b2-m-ch	11,5	RCC	-0,25	0,12	1,06	-0,21	-5,46	0,09	12,13	-0,58
Wolman	PBN_2012-05-02_b2-q-ch	12,5	RCC	-0,03	-0,39	1,19	-0,46	-4,11	0,26	4,02	0,60
Drague CNR	PBN-63-2012-08-31	13,5	RCC	-0,38	0,63	1,59	-0,62	-4,32	-0,10	8,04	-0,18
Drague CNR	PBN-64-2012-08-31	16,5	RC	-0,02	-0,45	0,93	-0,10	-6,19	0,22	10,90	-0,16
Drague CNR	VAU-65-2013-01-23	23	RC	-0,57	1,09	1,13	-0,31	-3,70	-1,68	14,29	-1,32
Drague CNR	VAU-66-2013-01-23	26	RC	0,03	-0,56	1,03	-0,16	-5,95	0,27	9,64	-0,04
Drague CNR	VAU-67-a-2013-01-23	29,5	RC	-0,11	-0,23	0,97	-0,14	-5,84	0,18	12,92	-0,60
Drague CNR	VAU-69-2013-01-24	34,5	RC	-0,31	0,19	0,88	-0,09	-5,87	0,04	15,17	-0,92
Drague CNR	VAU-70-2013-01-24	37	RC	-0,11	-0,25	1,10	-0,20	-5,84	0,20	11,91	-0,43
Drague CNR	VAU-71-2013-01-24	42	RC	-0,12	-0,19	1,10	-0,24	-5,34	0,12	11,79	-0,57
Drague CNR	VAU-72-a-2013-01-24	46	RC	-0,29	0,61	1,85	-1,06	-3,37	-0,11	5,27	0,10
Drague CNR	VAU-72-a2-2013-01-24	46	RC	-0,13	-0,09	1,03	-0,35	-4,16	0,19	2,88	0,89
Drague CNR	VAU-73-a-2013-01-24	49	RC	-0,56	1,04	1,68	-0,58	-4,73	-0,14	5,15	0,55

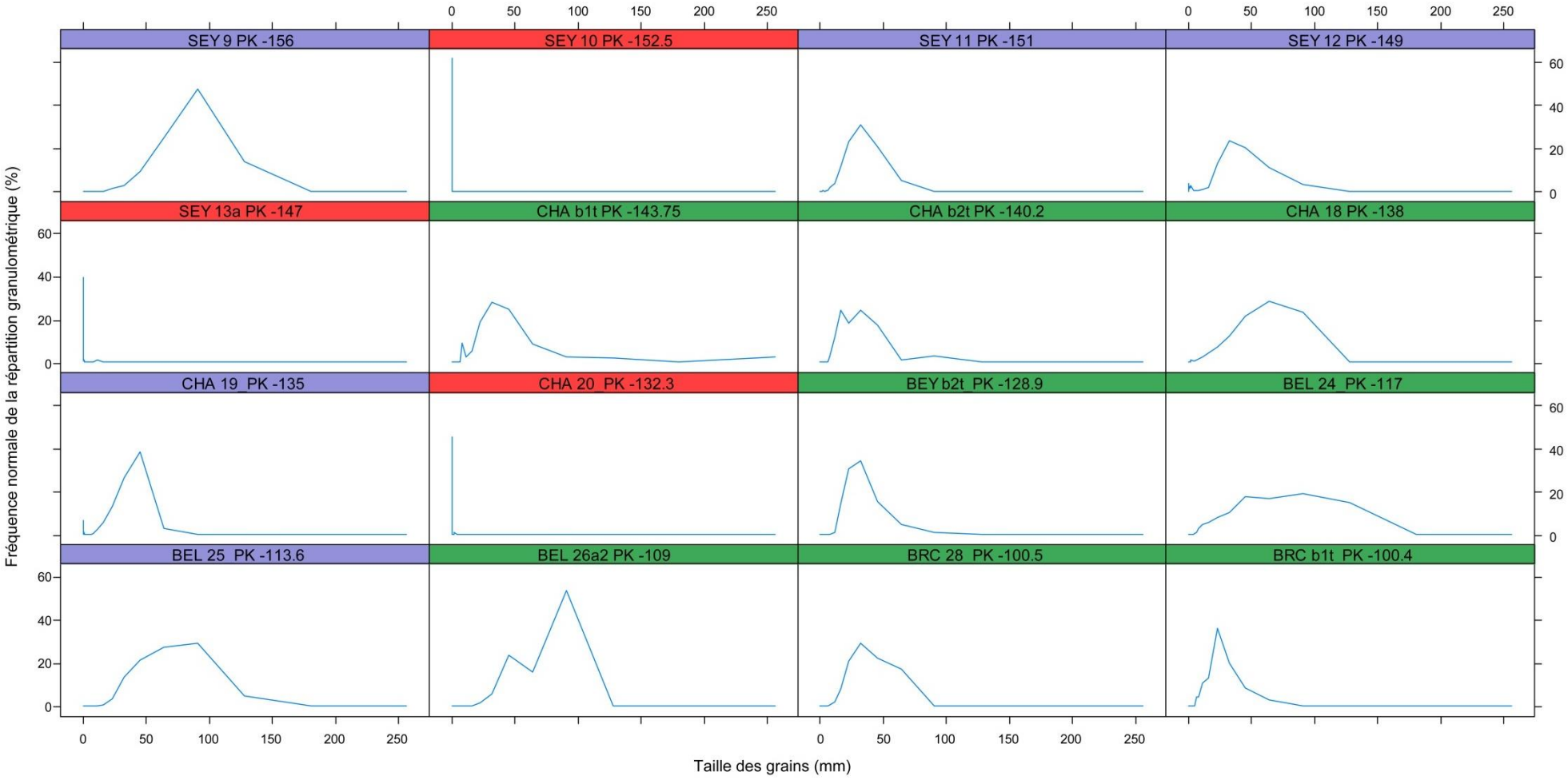
Prélèvement	Nom échantillon	PK	Bief	Masse total (g)	D50 moyen	D5	D10	D16	D25	D50	D75	D84	D95	D90	D99	Φ5	Φ10	Φ16	Φ25	Φ50	Φ75	Φ84	Φ90	Φ95	Φ99
Drague CNR	PDR-74-2013-03-21	53,5	RCC	120739,2		36,04	42,92	47,77	53,18	71,15	95,10	108,05	126,30	117,65	165,50	5,17	5,42	5,58	5,73	6,15	6,57	6,76	6,88	6,98	7,37
Wolman	PDR_2012-08-07_b-q-ch	53,6	RCC			8,54	16,40	22,95	32,99	50,74	69,23	77,44	88,80	83,44	115,86	3,09	4,04	4,52	5,04	5,67	6,11	6,27	6,38	6,47	6,86
Drague CNR	PDR-75-2013-03-21	56,5	RCC	116500	44,08	64,01	66,14	68,78	72,95	85,90	130,84	150,74	179,21	165,66	237,60	6,00	6,05	6,10	6,19	6,42	7,03	7,24	7,37	7,49	7,89
Drague CNR	PDR-76-2013-03-21	59,5	RCC	63323,6		7,47	8,63	9,80	11,67	16,74	29,84	44,21	60,66	52,77	80,87	2,90	3,11	3,29	3,55	4,07	4,90	5,47	5,72	5,92	6,34
Wolman	PDR_2012-06-07_b2-t-ch	60,7	RCC			10,19	12,91	15,80	18,37	25,87	35,74	42,15	57,37	48,54	74,02	3,35	3,69	3,98	4,20	4,69	5,16	5,40	5,60	5,84	6,21
Drague CNR	PDR-77-a-2012-10-09	63	RCC	1737,15		0,40	0,49	4,23	7,34	14,11	21,74	24,98	29,62	27,41	31,51	-1,31	-1,03	2,08	2,88	3,82	4,44	4,64	4,78	4,89	4,98
Drague CNR	PDR-78-2012-10-09	65,5	RC	92353,33		17,50	21,88	24,66	28,63	39,30	51,84	57,19	66,73	61,06	85,15	4,13	4,45	4,62	4,84	5,30	5,70	5,84	5,93	6,06	6,41
Drague CNR	VAL-79-2012-10-09	67,5	RC	182135,3		34,32	42,38	47,38	51,91	66,83	85,51	95,95	116,97	106,90	125,71	5,10	5,41	5,57	5,70	6,06	6,42	6,58	6,74	6,87	6,97
Drague CNR	VAL-80-2012-10-08	69,5	RC	165872,8	48,99	45,23	53,72	64,56	70,59	90,43	107,60	114,54	123,63	119,41	127,11	5,50	5,75	6,01	6,14	6,50	6,75	6,84	6,90	6,95	6,99
Drague CNR	VAL-81-2012-10-08	74,5	RC	76249,04		20,74	25,30	30,24	34,90	47,86	69,51	79,10	98,52	86,22	121,47	4,37	4,66	4,92	5,13	5,58	6,12	6,31	6,43	6,62	6,92
Drague CNR	VAL-82-a-2012-10-08	77	RC	932,35		0,40	0,41	0,42	0,44	0,49	0,58	0,62	0,78	0,69	1,15	-1,32	-1,29	-1,25	-1,19	-1,04	-0,79	-0,69	-0,54	-0,35	0,20
Drague CNR	VAL-83-2012-10-08	79,5	RC	118251,52		19,92	25,72	32,12	35,90	49,05	70,29	85,52	112,47	98,83	124,73	4,32	4,68	5,01	5,17	5,62	6,14	6,42	6,63	6,81	6,96
Wolman	VAL_2012-08-07_b-m-ch	83	RCC		51,95	5,97	8,09	10,74	16,90	37,03	59,98	74,30	109,51	86,36	156,52	2,58	3,02	3,43	4,08	5,21	5,91	6,22	6,43	6,77	7,29
Drague CNR	BLV-85-2013-01-30	86	RCC	32647,28		24,94	32,09	36,85	45,33	66,87	89,50	101,63	119,10	110,81	126,17	4,64	5,00	5,20	5,50	6,06	6,48	6,67	6,79	6,90	6,98
Drague CNR	BLV-86-2013-01-30	89,5	RC	124509,2		39,80	50,25	60,59	68,29	85,41	107,65	117,11	138,51	123,88	170,81	5,31	5,65	5,92	6,09	6,42	6,75	6,87	6,95	7,11	7,42
Drague CNR	BLV-87-2013-01-30	93	RC	82722,4		32,28	37,97	45,76	53,74	77,43	106,60	119,91	154,16	132,03	174,51	5,01	5,25	5,52	5,75	6,27	6,74	6,91	7,04	7,27	7,45
Drague CNR	BLV-88-b-2013-01-30	95,5	RC	4571,74	57,30	0,34	0,41	0,44	0,49	10,69	15,56	18,72	25,49	21,44	30,57	-1,54	-1,28	-1,17	-1,02	3,42	3,96	4,23	4,42	4,67	4,93
Drague CNR	BLV-88-c-2013-01-30	95,5	RC	11511,22		2,46	6,94	9,75	14,39	97,39	111,65	117,28	124,55	121,19	127,30	1,30	2,80	3,29	3,85	6,61	6,80	6,87	6,92	6,96	6,99
Drague CNR	BLV-89-2013-01-30	98	RC	19970,12		0,75	1,37	5,83	8,77	15,59	23,25	29,44	46,07	36,44	59,92	-0,42	0,46	2,54	3,13	3,96	4,54	4,88	5,19	5,53	5,91
Wolman	BLV_2012-08-07_b-q-ch	100,5	RCC		27,05	11,91	13,39	15,41	18,37	27,05	41,74	51,68	76,63	60,00	112,98	3,57	3,74	3,95	4,20	4,76	5,38	5,69	5,91	6,26	6,82
Drague CNR	BEA-92-2013-01-29	110	RC	137728,9		56,52	66,64	72,78	83,06	99,62	112,92	118,13	124,83	121,74	127,36	5,82	6,06	6,19	6,38	6,64	6,82	6,88	6,93	6,96	6,99
Drague CNR	BEA-93-2013-01-29	112,5	RC	80850	57,73	56,09	66,72	74,26	87,19	105,57	124,89	139,39	166,18	153,42	177,15	5,81	6,06	6,21	6,45	6,72	6,96	7,12	7,26	7,38	7,47
Drague CNR	BEA-94-2013-01-29	115,5	RC	18646,2		0,47	9,17	13,40	17,48	25,68	36,38	44,44	57,09	50,94	62,54	-1,08	3,20	3,74	4,13	4,68	5,19	5,47	5,67	5,84	5,97
Drague CNR	BEA-95-2013-01-29	118	RC	1970,31		0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,19	0,41	0,64	0,48	1,19	-5,25	-5,18	-5,09	-4,96	-4,59	-2,42	-1,29	-1,05	-0,65	0,24
Drague CNR	BLN-99-2012-10-05	130	RC	132900		56,30	66,97	74,27	86,73	103,50	120,12	126,74	159,82	141,90	175,77	5,81	6,07	6,21	6,44	6,69	6,91	6,99	7,15	7,32	7,46
Drague CNR	BLN-99,5-a-b-c-2012-10-05	132	RC	10671,11	49,87	17,65	25,12	33,14	40,41	95,43	110,52	116,52	124,30	120,70	127,25	4,14	4,65	5,05	5,34	6,58	6,79	6,86	6,92	6,96	6,99
Drague CNR	BLN-101-a-2012-10-05	134	RC	1579,10		0,08	0,16	0,23	0,29	0,42	0,67	0,92	22,94	1,09	27,96	-3,66	-2,62	-2,10	-1,80	-1,25	-0,58	-0,13	0,12	4,52	4,81
Drague CNR	BLN-101,5-2012-10-05	134,5	RC	1190,99		0,01	0,01	0,02	0,03	0,14	0,19	0,21	0,44	0,24	0,89	-6,61	-6,28	-5,87	-5,27	-2,86	-2,42	-2,26	-2,05	-1,19	-0,18
Drague CNR	BLN-103,5-a-2012-10-04	140,5	RCC	5106,9	99,67	20,07	28,62	37,03	47,67	66,35	77,49	81,94	87,73	85,05	89,94	4,33	4,84	5,21	5,58	6,05	6,28	6,36	6,41	6,46	6,49
Drague CNR	BLN-104-a-2012-10-04	143	RCC	106610,20		72,57	86,67	95,24	104,85	133,00	154,72	163,39	174,63	169,43	178,91	6,18	6,44	6,57	6,71	7,06	7,27	7,35	7,40	7,45	7,48
Drague CNR	MON-105-a-2012-10-04	145,5	RC	20888,38	59,41	8,38	11,29	64,93	77,43	118,66	149,09	159,55	173,34	166,93	178,65	3,07	3,50	6,02	6,27	6,89	7,22	7,32	7,38	7,44	7,48
Drague CNR	MON-106-2012-10-04	151,5	RC	7225,61		0,03	0,04	0,11	0,13	0,16	0,20	0,22	0,26	0,24	0,31	-5,09	-4,50	-3,25	-2,99	-2,69	-2,30	-2,16	-2,06	-1,94	-1,69
Drague CNR	DZM-110-a-bis-3-2012-10-02	161,5	RCC	15004,40	83,78	38,95	48,07	54,18	64,43	83,78	104,46	112,39	122,90	118,01	126,96	5,28	5,59	5,76	6,01	6,39	6,71	6,81	6,88	6,94	6,99
Drague CNR	DZM-111-a2-2012-10-02	169	RC	13450	91,42	70,25	77,11	86,24	93,01	103,45	115,07	119,57	125,30	122,66	127,46	6,13	6,27	6,43	6,54	6,69	6,85	6,90	6,94	6,97	6,99
Drague CNR	DZM-112-2012-10-02	170	RC	134350		38,22	47,06	52,76	62,64	79,38	103,17	115,48	144,58	124,49	172,28	5,26	5,56	5,72	5,97	6,31	6,69	6,85	6,96	7,18	7,43
Wolman	DZM_2012-05-30_b2-t-ch	172,5	RCC			11,04	15,63	22,11	31,00	51,74	79,31	102,12	215,93	182,13	247,43	3,47	3,97	4,47	4,95	5,69	6,31	6,67	7,51	7,75	7,95
Wolman	DZM_2012-05-30_b2-m-ch	173,2	RCC			8,14	12,91	18,46	26,36	48,21	68,64	77,66	90,32	84,33	119,18	3,02	3,69	4,21	4,72	5,59	6,10	6,28	6,40	6,50	6,90
Wolman	DZM_2012-05-30_b1-t-ch	188,55	RCC			16,08	21,73	26,91	33,84	47,92	61,23	69,05	83,16	76,42	88,98	4,01	4,44	4,75	5,08	5,58	5,94	6,11	6,26	6,38	6,48
Wolman	DZM_2012-05-30_b1-m-ch	189	RCC		49,94	16,34	20,22	24,52	30,47	47,46	70,81	85,82	112,59	99,04	124,76	4,03	4,34	4,62	4,93	5,57	6,15	6,42	6,63	6,81	6,96
Wolman	DZM_2012-05-30_b1-q-ch	189,5	RCC			10,28	15,78	21,53	26,26	43,00	66,35	77,35	115,36	85,67	166,08	3,36	3,98	4,43	4,71	5,43	6,05	6,27	6,42	6,85	7,38
Drague CNR	DZM-120-2012-10-03	194	RCC	151021,18		12,78	16,78	20,33	25,40	40,06	57,39	65,26	81,71	73,77	88,67	3,68	4,07	4,35	4,67	5,32	5,84	6,03	6,20	6,35	6,47
Drague CNR	DZM-121-2012-10-03	198,5	RCC	105850		41,63	47,45	51,24	57,51	71,18	83,49	88,43	111,27	96,73	124,46	5,38	5,57	5,68	5,85	6,15	6,38	6,47	6,60	6,80	6,96
Drague CNR	DZM-122-2012-10-03	204	RC	116823,7	63,03	34,90	41,05	46,86	51,94	69,93	104,86	132,01	163,38	148,29	176,54	5,13	5,36	5,55	5,70	6,13	6,71	7,04	7,21	7,35	7,46
Drague CNR	DZM-123-2012-10-03	207,5	RC	118579,7		31,38	35,15	39,57	46,08	56,12	74,42	87,55	153,32	130,60	174,32	4,97	5,14	5,31	5,53	5,81	6,22	6,45	7,03	7,26	7,45
Drague CNR	CAD-125-2013-04-26	215	RCC	53693,3	64,65	23,10	25,22	28,02	32,39	39,93	53,76	62,80	80,57	71,72	88,42	4,53	4,66	4,81	5,02	5,32	5,75	5,97	6,16	6,33	6,47
Drague CNR	CAD-126-2013-04-26	218	RCC	60555,94		1,55	27,18	38,25	50,30	89,38	113,19	123,00	155,00	134,31	174,24	0,63	4,76	5,26	5,65	6,48	6,82	6,94	7,07	7,28	7,44

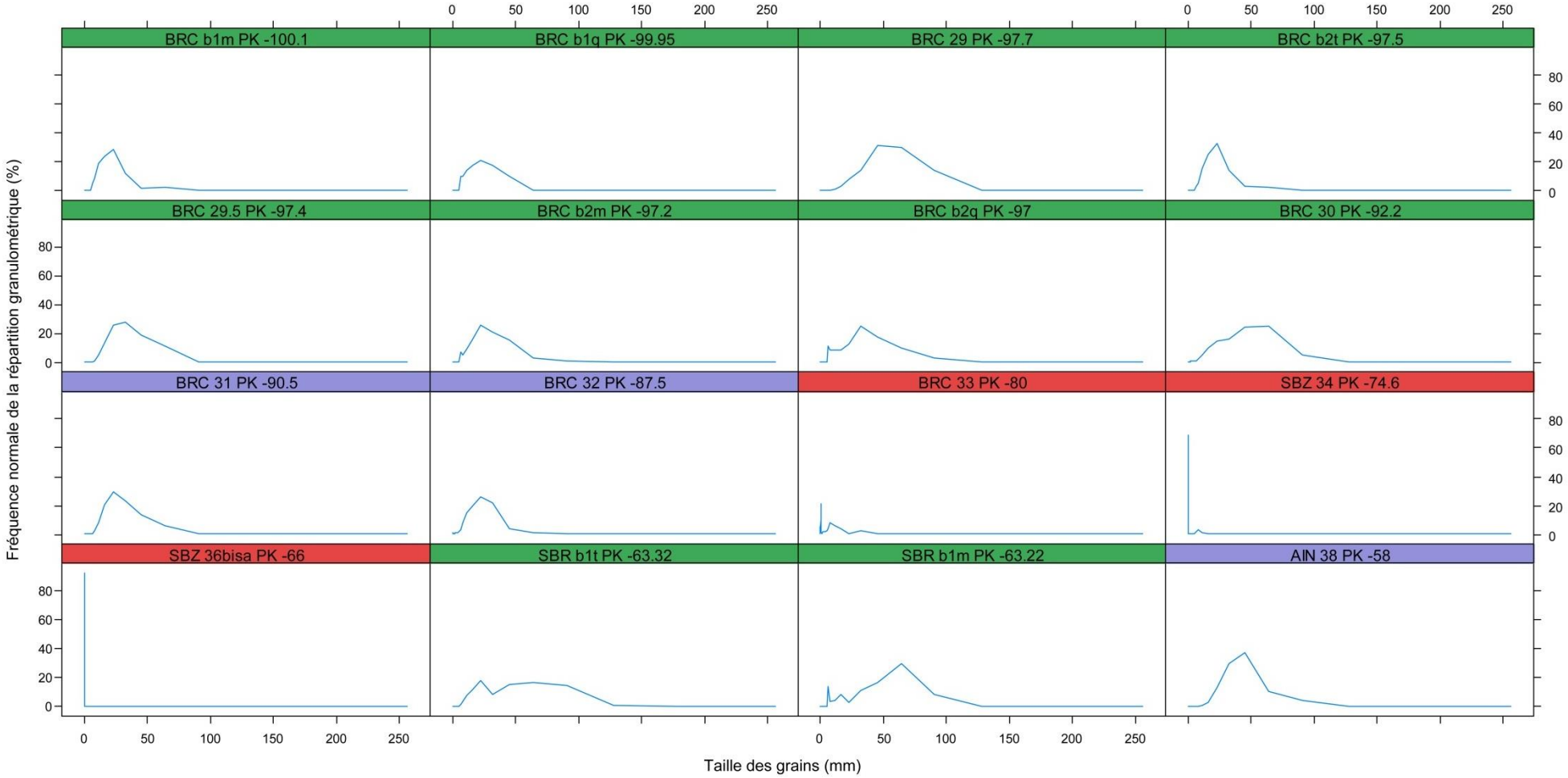
Prélèvement	Nom échantillon	PK	Bief	Skewness (Sk)	$(Sk/\Phi50)_{CR}$	Kurtosis (K)	$(K/\Phi50)_{CR}$	Moyenne (M)	$(M/\Phi50)_{CR}$	Classement (So)	$(So/\Phi50)_{CR}$
Drague CNR	PDR-74-2013-03-21	53,5	RCC	-0,03	-0,43	0,88	-0,09	-6,16	0,25	13,38	-0,58
Wolman	PDR_2012-08-07_b-q-ch	53,6	RCC	-0,41	0,50	1,30	-0,30	-5,49	-0,01	11,72	-0,47
Drague CNR	PDR-75-2013-03-21	56,5	RCC	0,43	-1,41	0,72	-0,01	-6,59	0,44	17,17	-1,07
Drague CNR	PDR-76-2013-03-21	59,5	RCC	0,26	-1,37	0,91	-0,29	-4,27	0,65	7,52	-0,25
Wolman	PDR_2012-06-07_b2-t-ch	60,7	RCC	-0,04	-0,38	1,06	-0,30	-4,69	0,24	6,79	0,14
Drague CNR	PDR-77-a-2012-10-09	63	RCC	-0,51	1,31	1,62	-0,80	-3,51	-0,39	3,79	0,59
Drague CNR	PDR-78-2012-10-09	65,5	RC	-0,16	-0,09	0,92	-0,16	-5,25	0,17	7,16	0,24
Drague CNR	VAL-79-2012-10-09	67,5	RC	-0,03	-0,43	1,01	-0,14	-6,07	0,25	12,27	-0,43
Drague CNR	VAL-80-2012-10-08	69,5	RC	-0,28	0,08	0,98	-0,10	-6,45	0,18	11,67	-0,20
Drague CNR	VAL-81-2012-10-08	74,5	RC	-0,01	-0,46	0,93	-0,14	-5,60	0,27	11,44	-0,45
Drague CNR	VAL-82-a-2012-10-08	77	RC	0,33	3,84	0,98	2,70	0,99	-0,10	-0,08	1,50
Drague CNR	VAL-83-2012-10-08	79,5	RC	0,05	-0,61	1,06	-0,20	-5,68	0,33	13,67	-0,83
Wolman	VAL_2012-08-07_b-m-ch	83	RCC	-0,27	0,20	0,94	-0,18	-4,95	-0,16	14,99	-1,27
Drague CNR	BLV-85-2013-01-30	86	RCC	-0,22	-0,01	0,94	-0,12	-5,98	0,13	13,90	-0,69
Drague CNR	BLV-86-2013-01-30	89,5	RC	-0,13	-0,22	1,12	-0,17	-6,40	0,22	14,72	-0,69
Drague CNR	BLV-87-2013-01-30	93	RC	-0,11	-0,27	0,94	-0,10	-6,23	0,19	18,12	-1,28
Drague CNR	BLV-88-b-2013-01-30	95,5	RC	-0,65	2,08	0,51	-0,10	-2,16	-2,68	2,46	0,86
Drague CNR	BLV-88-c-2013-01-30	95,5	RC	-0,86	1,28	0,78	-0,02	-5,59	-0,98	17,60	-1,06
Drague CNR	BLV-89-2013-01-30	98	RC	-0,34	0,69	1,73	-0,84	-3,80	-0,09	6,28	0,01
Wolman	BLV_2012-08-07_b-q-ch	100,5	RCC	0,09	-0,77	0,93	-0,22	-4,80	0,31	9,37	-0,37
Drague CNR	BEA-92-2013-01-29	110	RC	-0,36	0,25	1,06	-0,13	-6,57	0,16	10,18	0,06
Drague CNR	BEA-93-2013-01-29	112,5	RC	-0,14	-0,21	1,24	-0,19	-6,69	0,20	16,45	-0,85
Drague CNR	BEA-94-2013-01-29	115,5	RC	-0,38	0,59	2,68	-1,18	-4,63	0,16	8,15	-0,15
Drague CNR	BEA-95-2013-01-29	118	RC	0,73	1,66	0,74	0,69	3,66	-1,37	-0,86	1,39
Drague CNR	BLN-99-2012-10-05	130	RC	-0,20	-0,08	1,31	-0,22	-6,63	0,17	15,49	-0,72
Drague CNR	BLN-99,5-a-b-c-2012-10-05	132	RC	-0,71	0,96	0,80	-0,03	-6,16	-0,26	15,70	-0,79
Drague CNR	BLN-101-a-2012-10-05	134	RC	0,27	2,49	2,74	5,88	1,16	-0,34	2,97	3,93
Drague CNR	BLN-101,5-2012-10-05	134,5	RC	-0,52	-2,99	0,78	0,97	3,66	2,45	-0,84	1,29
Drague CNR	BLN-103,5-a-2012-10-04	140,5	RCC	-0,54	0,73	1,24	-0,24	-5,87	0,01	9,97	-0,05
Drague CNR	BLN-104-a-2012-10-04	143	RCC	-0,31	0,10	0,93	-0,05	-6,99	0,17	15,27	-0,57
Drague CNR	MON-105-a-2012-10-04	145,5	RC	-0,55	0,58	1,89	-0,42	-6,74	0,07	24,67	-1,97
Drague CNR	MON-106-2012-10-04	151,5	RC	-0,28	-1,90	1,86	2,05	2,70	0,27	-0,24	1,49
Drague CNR	DZM-110-a-bis-3-2012-10-02	161,5	RCC	-0,26	0,06	0,97	-0,11	-6,32	0,15	12,46	-0,35
Drague CNR	DZM-111-a2-2012-10-02	169	RC	-0,23	-0,04	1,11	-0,14	-6,67	0,22	8,22	0,36
Drague CNR	DZM-112-2012-10-02	170	RC	-0,07	-0,35	1,09	-0,16	-6,29	0,22	15,83	-0,91
Wolman	DZM_2012-05-30_b2-t-ch	172,5	RCC	-0,08	-0,32	1,30	-0,30	-5,61	0,13	30,49	-3,73
Wolman	DZM_2012-05-30_b2-m-ch	173,2	RCC	-0,41	0,49	1,03	-0,19	-5,36	-0,09	11,93	-0,54
Wolman	DZM_2012-05-30_b1-t-ch	188,55	RCC	-0,28	0,18	1,14	-0,24	-5,48	0,10	9,82	-0,17
Wolman	DZM_2012-05-30_b1-m-ch	189	RCC	-0,08	-0,30	0,94	-0,15	-5,54	0,19	14,13	-0,94
Wolman	DZM_2012-05-30_b1-q-ch	189,5	RCC	-0,13	-0,17	1,07	-0,22	-5,38	0,17	15,46	-1,24
Drague CNR	DZM-120-2012-10-03	194	RCC	-0,20	0,01	0,93	-0,17	-5,23	0,10	10,02	-0,29
Drague CNR	DZM-121-2012-10-03	198,5	RCC	-0,15	-0,17	1,08	-0,17	-6,10	0,17	10,35	-0,09
Drague CNR	DZM-122-2012-10-03	204	RC	0,16	-0,86	0,90	-0,09	-6,24	0,39	19,09	-1,51
Drague CNR	DZM-123-2012-10-03	207,5	RC	0,19	-0,95	1,36	-0,32	-5,86	0,30	18,19	-1,52
Drague CNR	CAD-125-2013-04-26	215	RCC	0,12	-0,81	1,01	-0,20	-5,37	0,31	8,42	0,01
Drague CNR	CAD-126-2013-04-26	218	RCC	-0,61	0,78	2,33	-0,64	-6,23	-0,07	22,83	-1,91

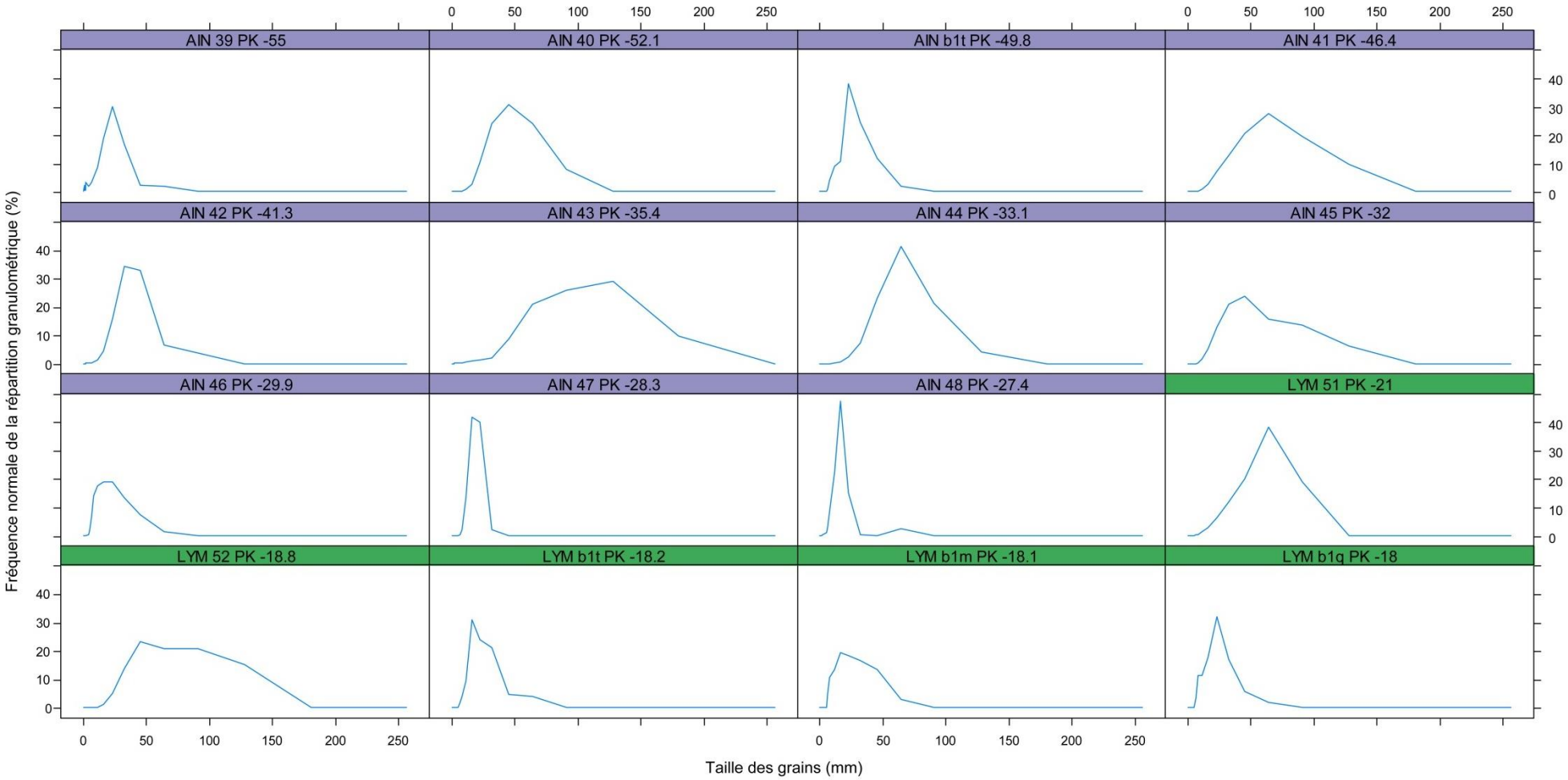
Prélèvement	Nom échantillon	PK	Bief	Masse total (g)	D50 moyen	D5	D10	D16	D25	D50	D75	D84	D95	D90	D99	Φ5	Φ10	Φ16	Φ25	Φ50	Φ75	Φ84	Φ90	Φ95	Φ99
Drague CNR	AVI-127-2013-04-26	219	RC	40678,4	64,35	39,64	47,51	52,18	60,05	75,43	92,63	104,07	119,98	112,47	126,35	5,31	5,57	5,71	5,91	6,24	6,53	6,70	6,81	6,91	6,98
Drague CNR	AVI-128-2013-04-26	226	RC	57296,1		36,44	43,27	48,45	55,15	72,50	89,67	101,50	119,05	110,72	126,16	5,19	5,44	5,60	5,79	6,18	6,49	6,67	6,79	6,90	6,98
Drague CNR	AVI-129-2013-04-26	230	RC	8326,56		0,07	0,13	1,14	25,44	45,13	53,77	57,28	61,75	59,71	63,48	-3,82	-2,95	0,19	4,67	5,50	5,75	5,84	5,90	5,95	5,99
Drague CNR	AVI-131-2013-04-25	239	RCC	87584,4	23,74	5,89	6,91	7,94	9,87	21,84	42,45	52,51	72,40	60,65	86,55	2,56	2,79	2,99	3,30	4,45	5,41	5,71	5,92	6,18	6,44
Drague CNR	AVI-132-2013-04-25	242,7	RCC	23996,82		8,93	11,34	12,90	15,64	25,65	40,57	47,01	58,12	52,77	62,78	3,16	3,50	3,69	3,97	4,68	5,34	5,55	5,72	5,86	5,97
Drague CNR	AVI-133-2013-04-25	245	RC	51947,7	21,92	7,72	10,36	12,90	16,49	25,74	39,98	47,65	66,00	56,39	84,96	2,95	3,37	3,69	4,04	4,69	5,32	5,57	5,82	6,04	6,41
Drague CNR	AVI-134-2013-04-25	250	RC	35887,79		15,48	20,24	24,13	28,13	39,82	56,36	64,60	81,45	73,30	88,61	3,95	4,34	4,59	4,81	5,32	5,82	6,01	6,20	6,35	6,47
Drague CNR	AVI-135-2013-04-25	257,5	RC	4312,44		0,12	0,13	0,15	0,18	0,22	0,24	0,26	0,30	0,29	0,36	-3,10	-2,89	-2,69	-2,48	-2,20	-2,03	-1,92	-1,81	-1,72	-1,46
Drague CNR	GRO-139-2013-04-24	271,5	RC	44980,92	38,18	17,81	23,63	28,74	33,98	44,21	54,65	58,87	67,44	61,86	85,33	4,15	4,56	4,84	5,09	5,47	5,77	5,88	5,95	6,08	6,42
Drague CNR	GRO-140-a-2013-04-24	274,5	RC	9371,9		8,99	10,66	12,09	13,94	19,95	29,15	35,04	49,89	41,53	60,89	3,17	3,41	3,60	3,80	4,32	4,87	5,13	5,38	5,64	5,93
Drague CNR	GRO-141-2013-04-24	277	RC	67280,78		15,68	20,12	25,27	32,96	50,38	114,00	141,83	167,08	155,09	177,34	3,97	4,33	4,66	5,04	5,65	6,83	7,15	7,28	7,38	7,47
Drague CNR	GRO-142-2013-04-24	281	RC	22586,43	28,64	12,92	16,37	18,97	23,06	30,22	39,56	43,58	55,67	48,43	62,24	3,69	4,03	4,25	4,53	4,92	5,31	5,45	5,60	5,80	5,96
Drague CNR	GRO-143-2013-04-23	284	RC	11138,5		18,64	24,94	30,82	42,45	67,10	77,93	82,24	87,83	85,24	89,96	4,22	4,64	4,95	5,41	6,07	6,28	6,36	6,41	6,46	6,49
Drague CNR	GRO-144-2013-04-23	291	RC	3201,68		0,13	0,16	0,18	0,20	0,26	0,32	0,40	31,73	0,46	41,87	-2,91	-2,61	-2,48	-2,29	-1,93	-1,62	-1,34	-1,11	4,99	5,39
Drague CNR	GRO-145-2013-04-23	299	RC	31442,35		37,19	46,43	49,99	55,84	69,02	79,03	82,98	88,08	85,73	90,01	5,22	5,54	5,64	5,80	6,11	6,30	6,37	6,42	6,46	6,49
Drague CNR	GRO-146-2013-04-23	303	RC	10438,15		33,06	45,80	47,89	51,21	61,68	74,66	80,02	87,08	83,80	89,81	5,05	5,52	5,58	5,68	5,95	6,22	6,32	6,39	6,44	6,49
Drague CNR	GRO-148-2013-04-22	314	RC	3549,94		0,22	0,25	0,26	0,27	0,32	0,38	0,40	0,47	0,42	0,50	-2,21	-2,00	-1,95	-1,87	-1,66	-1,41	-1,32	-1,26	-1,09	-1,01
Drague CNR	GRO-149-2013-04-22	322	RC	4074,86		0,21	0,25	0,26	0,27	0,32	0,38	0,40	0,47	0,43	0,50	-2,24	-2,02	-1,95	-1,87	-1,65	-1,41	-1,33	-1,21	-1,10	-1,01
Drague CNR	GRO-150-2013-04-22	330	RC	1976,01		0,04	0,07	0,11	0,14	0,22	0,28	0,30	0,44	0,32	0,86	-4,49	-3,76	-3,19	-2,81	-2,15	-1,83	-1,73	-1,63	-1,19	-0,22

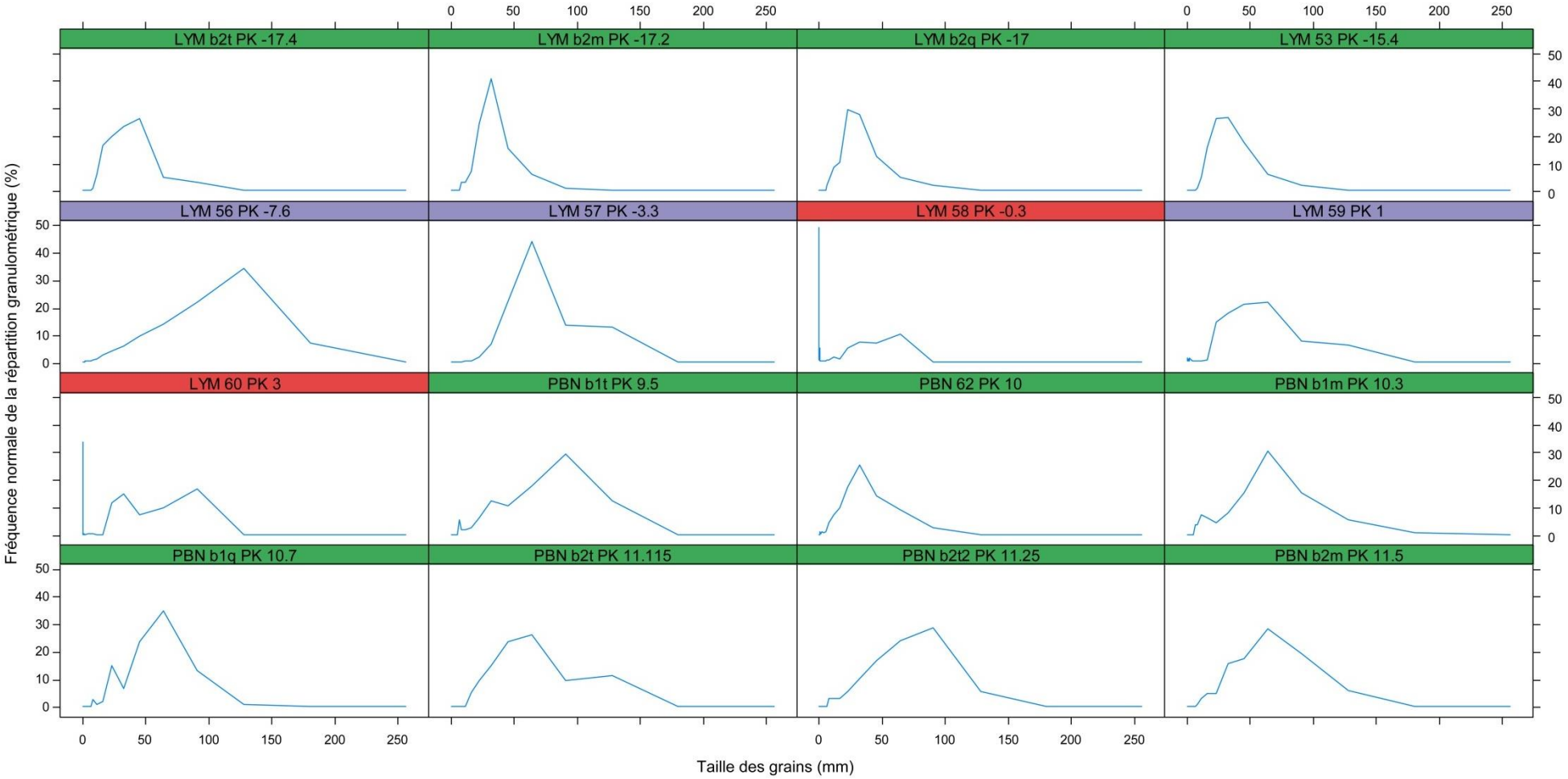
Prélèvement	Nom échantillon	PK	Bief	Skewness (Sk)	$(Sk/\Phi50)_{CR}$	Kurtosis (K)	$(K/\Phi50)_{CR}$	Moyenne (M)	$(M/\Phi50)_{CR}$	Classement (So)	$(So/\Phi50)_{CR}$
Drague CNR	AVI-127-2013-04-26	219	RC	-0,11	-0,25	1,05	-0,15	-6,21	0,21	11,92	-0,32
Drague CNR	AVI-128-2013-04-26	226	RC	-0,13	-0,22	1,00	-0,13	-6,15	0,20	12,25	-0,39
Drague CNR	AVI-129-2013-04-26	230	RC	-0,89	1,71	3,71	-1,44	-3,84	-2,14	7,93	0,15
Drague CNR	AVI-131-2013-04-25	239	RCC	-0,06	-0,32	0,70	-0,12	-4,38	0,12	9,40	-0,51
Drague CNR	AVI-132-2013-04-25	242,7	RCC	-0,09	-0,22	0,81	-0,16	-4,64	0,17	6,99	0,10
Drague CNR	AVI-133-2013-04-25	245	RC	-0,09	-0,24	0,99	-0,26	-4,65	0,18	8,36	-0,19
Drague CNR	AVI-134-2013-04-25	250	RC	-0,08	-0,30	0,98	-0,19	-5,31	0,23	9,64	-0,22
Drague CNR	AVI-135-2013-04-25	257,5	RC	-0,29	-2,27	1,26	1,74	2,27	0,49	-0,16	1,50
Drague CNR	GRO-139-2013-04-24	271,5	RC	-0,28	0,21	1,15	-0,26	-5,40	0,14	7,26	0,26
Drague CNR	GRO-140-a-2013-04-24	274,5	RC	0,06	-0,70	0,95	-0,28	-4,35	0,29	5,81	0,24
Drague CNR	GRO-141-2013-04-24	277	RC	0,11	-0,76	0,78	-0,07	-5,82	0,47	22,32	-2,33
Drague CNR	GRO-142-2013-04-24	281	RC	-0,14	-0,11	1,11	-0,30	-4,87	0,16	6,18	0,33
Drague CNR	GRO-143-2013-04-23	284	RC	-0,62	0,89	1,05	-0,16	-5,79	-0,12	10,13	-0,08
Drague CNR	GRO-144-2013-04-23	291	RC	0,39	2,28	4,81	6,65	1,91	0,18	4,50	3,89
Drague CNR	GRO-145-2013-04-23	299	RC	-0,35	0,29	1,02	-0,14	-6,04	0,15	7,53	0,36
Drague CNR	GRO-146-2013-04-23	303	RC	-0,14	-0,19	1,05	-0,17	-5,95	0,24	8,00	0,24
Drague CNR	GRO-148-2013-04-22	314	RC	0,05	-0,05	1,00	1,81	1,64	0,15	-0,12	1,51
Drague CNR	GRO-149-2013-04-22	322	RC	0,00	-0,47	1,02	1,86	1,64	0,20	-0,12	1,51
Drague CNR	GRO-150-2013-04-22	330	RC	-0,42	-3,13	1,37	1,91	2,36	0,99	-0,31	1,43

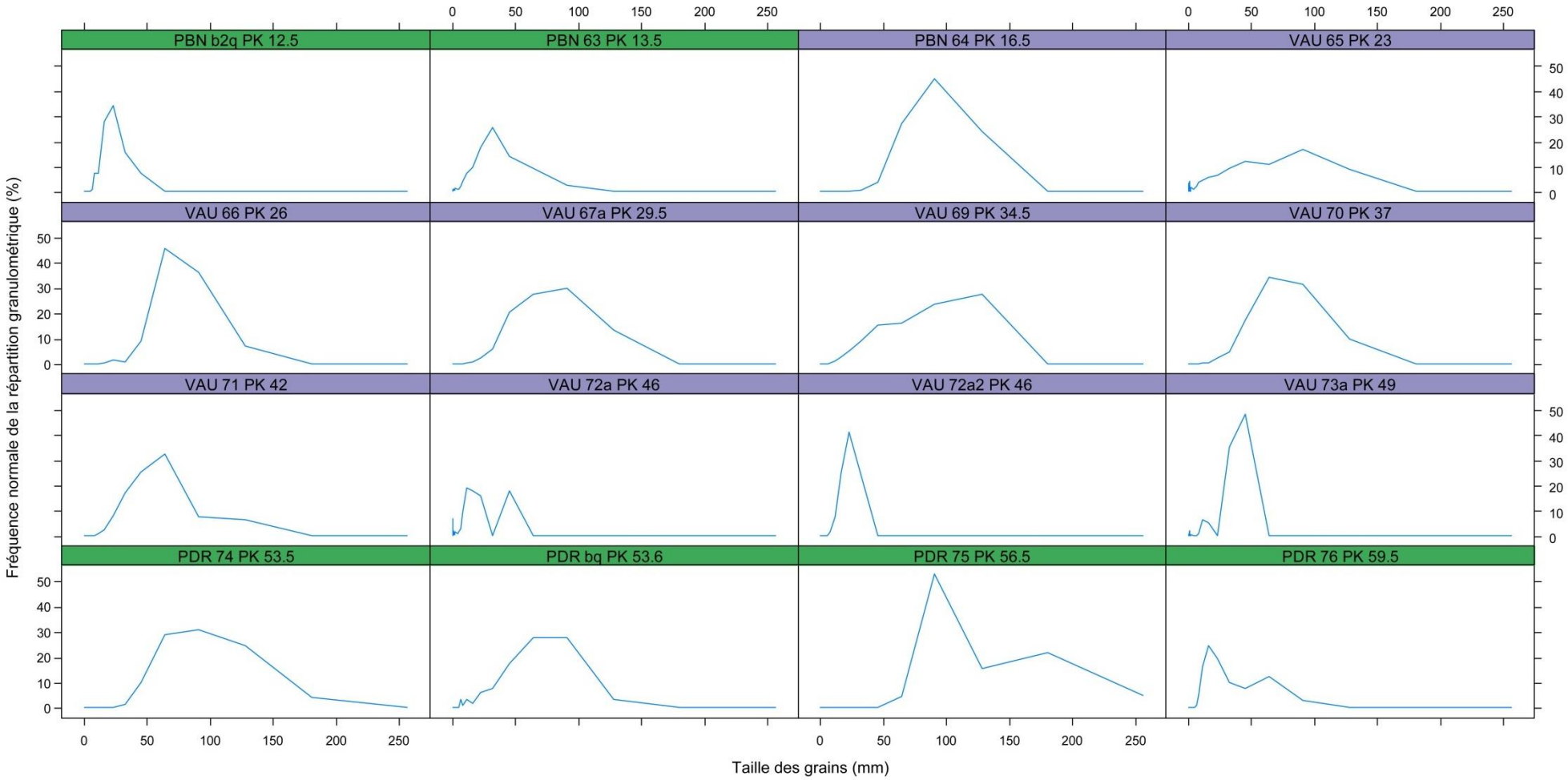
Annexe 23 : Distribution granulométrique normale en fréquence de chaque échantillon prélevé à la drague et par comptage sur l'ensemble du linéaire du Rhône (prélèvements de Génissiat exclu)

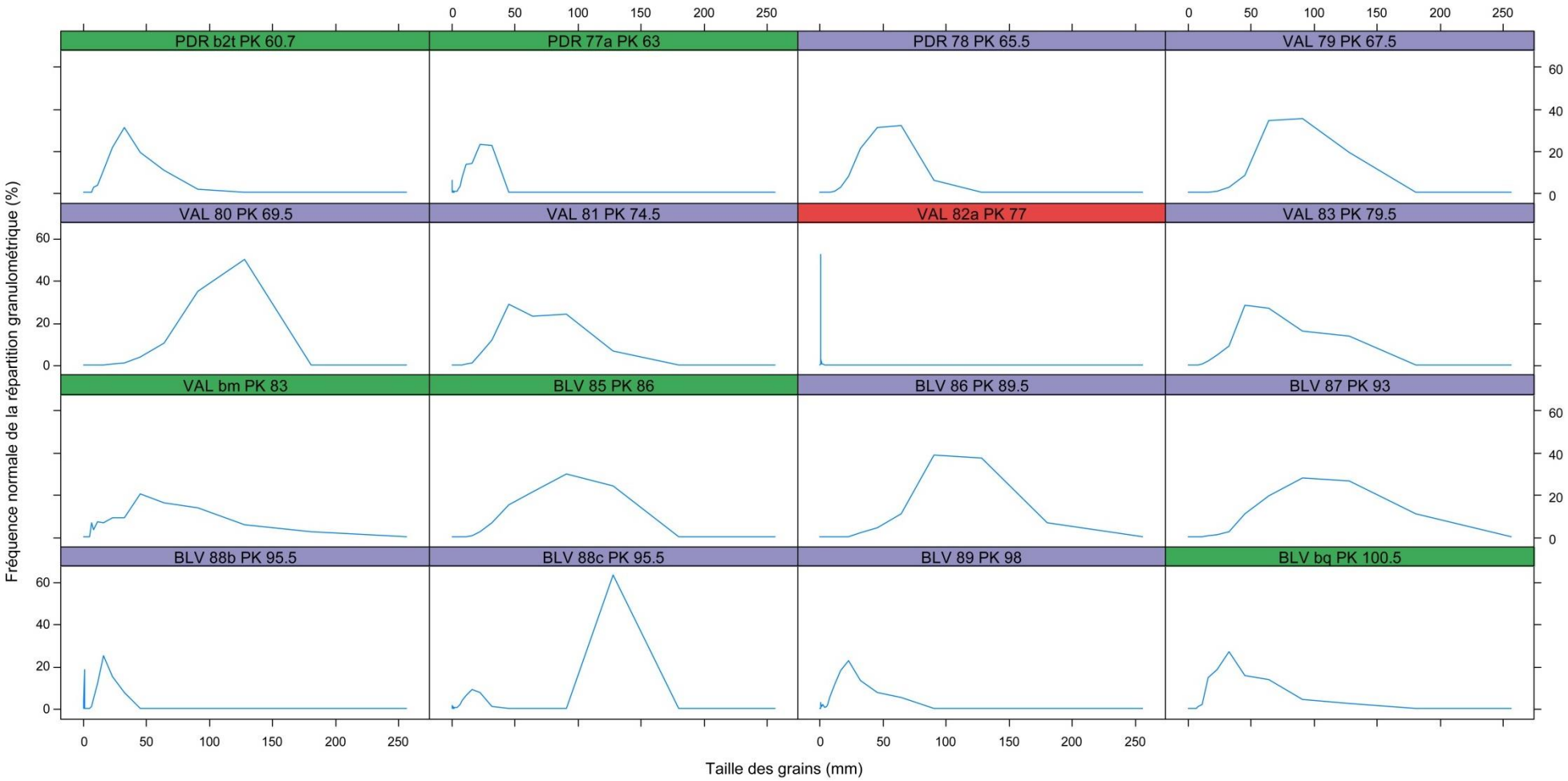


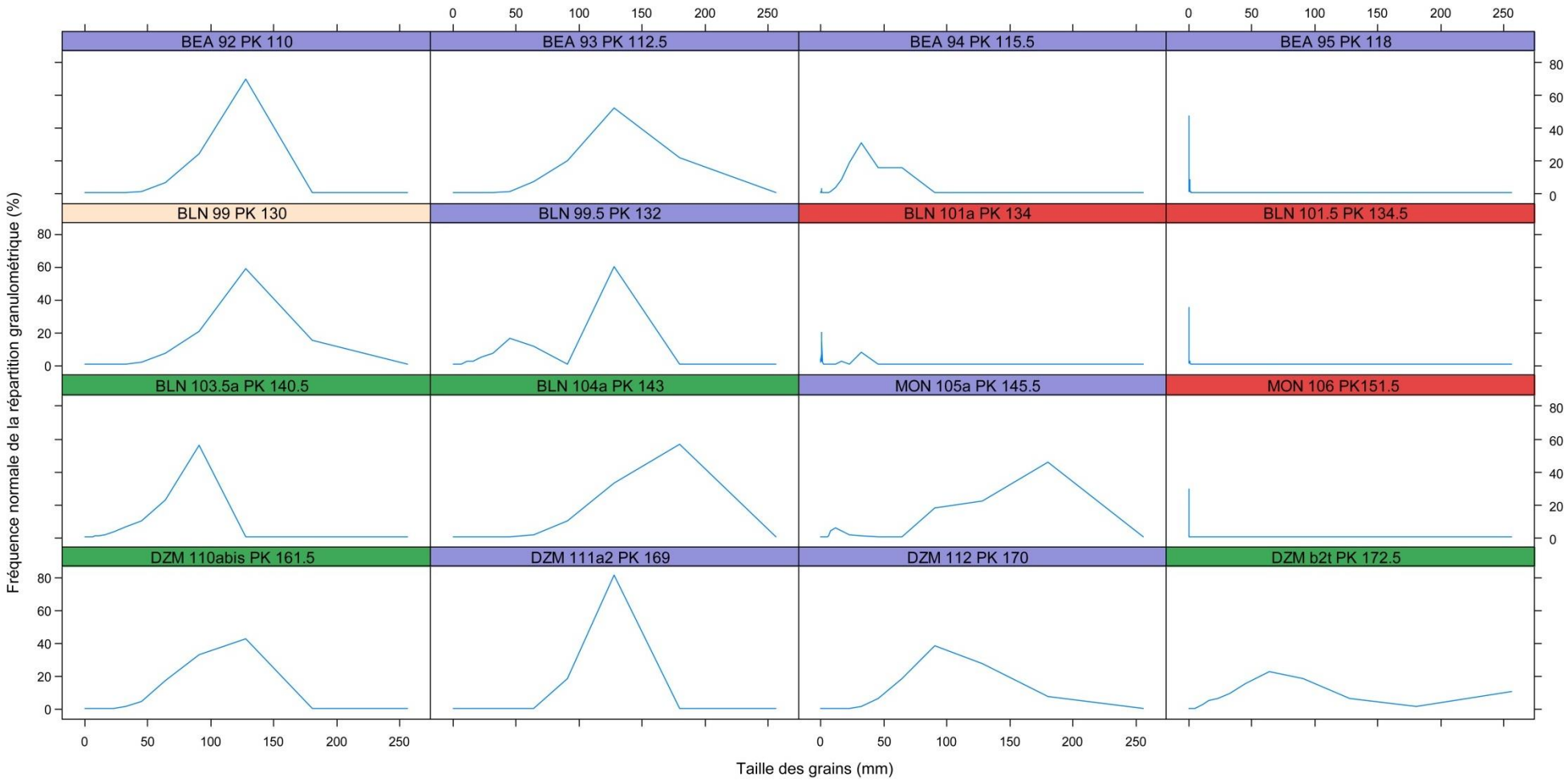

BRC b1m PK -100.1
BRC b1q PK -99.95
BRC 29 PK -97.7
BRC b2t PK -97.5
BRC 29.5 PK -97.4
BRC b2m PK -97.2
BRC b2q PK -97
BRC 30 PK -92.2
BRC 31 PK -90.5
BRC 32 PK -87.5
BRC 33 PK -80
SBZ 34 PK -74.6
SBZ 36bisa PK -66
SBR b1t PK -63.32
SBR b1m PK -63.22
AIN 38 PK -58
Fréquence normale de la répartition granulométrique (%)
Taille des grains (mm)

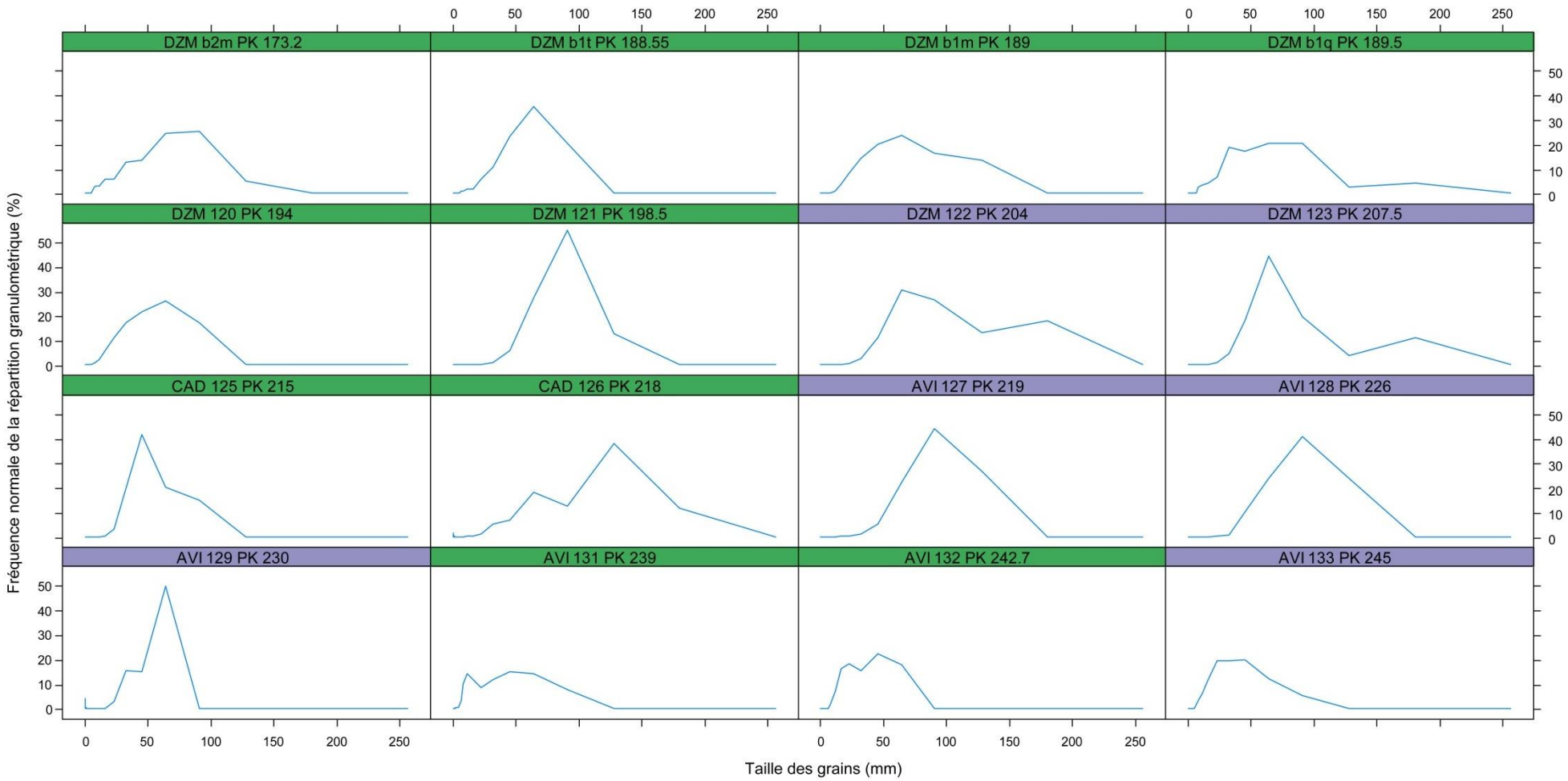

AIN 39 PK -55
AIN 40 PK -52.1
AIN b1t PK -49.8
AIN 41 PK -46.4
AIN 42 PK -41.3
AIN 43 PK -35.4
AIN 44 PK -33.1
AIN 45 PK -32
AIN 46 PK -29.9
AIN 47 PK -28.3
AIN 48 PK -27.4
LYM 51 PK -21
LYM 52 PK -18.8
LYM b1t PK -18.2
LYM b1m PK -18.1
LYM b1q PK -18
Fréquence normale de la répartition granulométrique (%)
Taille des grains (mm)

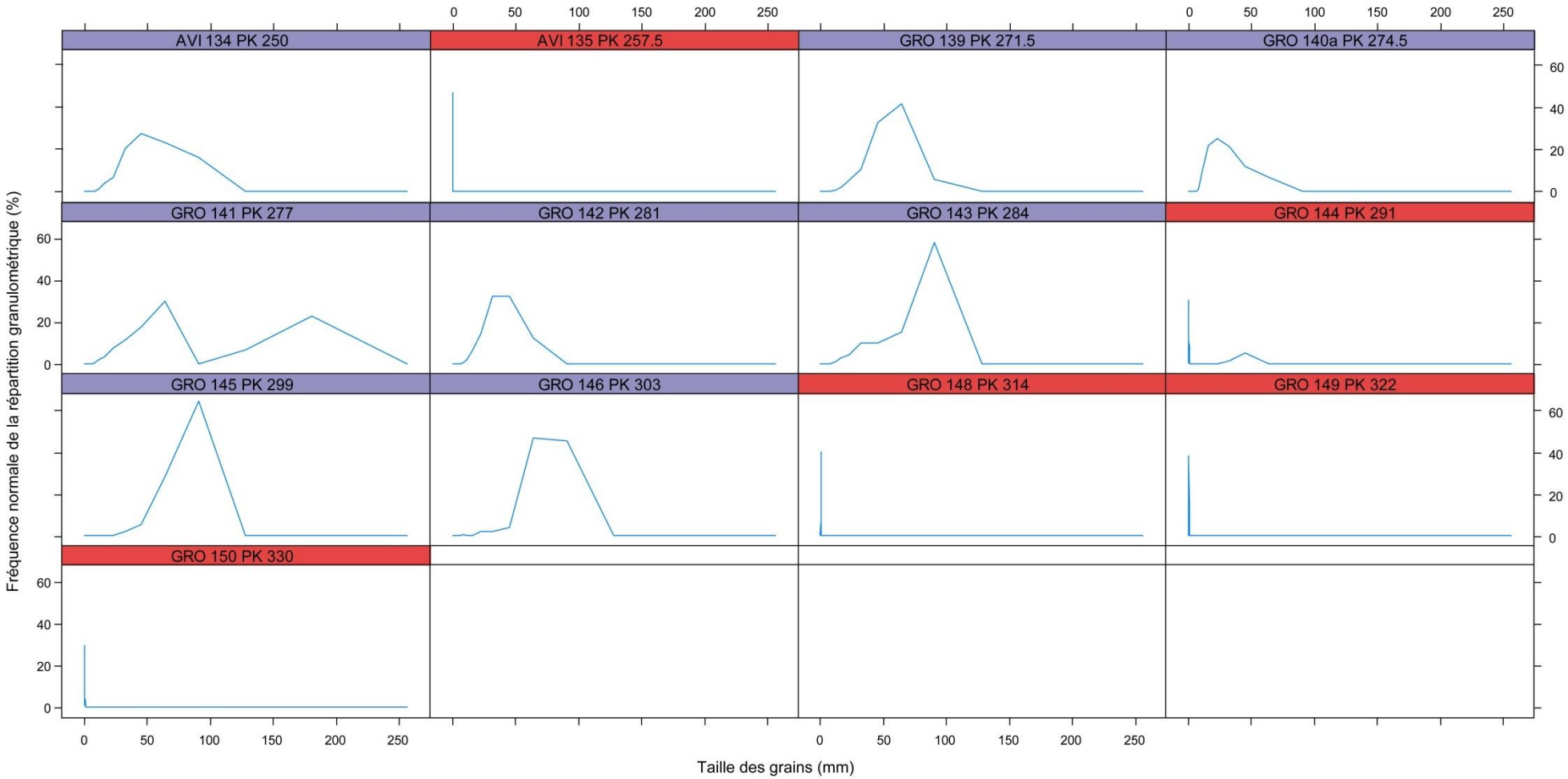

LYM b2t PK -17.4
LYM b2m PK -17.2
LYM b2q PK -17
LYM 53 PK -15.4
LYM 56 PK -7.6
LYM 57 PK -3.3
LYM 58 PK -0.3
LYM 59 PK 1
LYM 60 PK 3
PBN b1t PK 9.5
PBN 62 PK 10
PBN b1m PK 10.3
PBN b1q PK 10.7
PBN b2t PK 11.115
PBN b2t2 PK 11.25
PBN b2m PK 11.5
Fréquence normale de la répartition granulométrique (%)
Taille des grains (mm)


PBN b2q PK 12.5
PBN 63 PK 13.5
PBN 64 PK 16.5
VAU 65 PK 23
VAU 66 PK 26
VAU 67a PK 29.5
VAU 69 PK 34.5
VAU 70 PK 37
VAU 71 PK 42
VAU 72a PK 46
VAU 72a2 PK 46
VAU 73a PK 49
PDR 74 PK 53.5
PDR bq PK 53.6
PDR 75 PK 56.5
PDR 76 PK 59.5
Fréquence normale de la répartition granulométrique (%)
Taille des grains (mm)


PDR b2t PK 60.7
PDR 77a PK 63
PDR 78 PK 65.5
VAL 79 PK 67.5
VAL 80 PK 69.5
VAL 81 PK 74.5
VAL 82a PK 77
VAL 83 PK 79.5
VAL bm PK 83
BLV 85 PK 86
BLV 86 PK 89.5
BLV 87 PK 93
BLV 88b PK 95.5
BLV 88c PK 95.5
BLV 89 PK 98
BLV bq PK 100.5
Fréquence normale de la répartition granulométrique (%)
Taille des grains (mm)
0
20
40
60
0
50
100
150
200
250


BEA 92 PK 110
BEA 93 PK 112.5
BEA 94 PK 115.5
BEA 95 PK 118
BLN 99 PK 130
BLN 99.5 PK 132
BLN 101a PK 134
BLN 101.5 PK 134.5
BLN 103.5a PK 140.5
BLN 104a PK 143
MON 105a PK 145.5
MON 106 PK151.5
DZM 110abis PK 161.5
DZM 111a2 PK 169
DZM 112 PK 170
DZM b2t PK 172.5
Fréquence normale de la répartition granulométrique (%)
Taille des grains (mm)

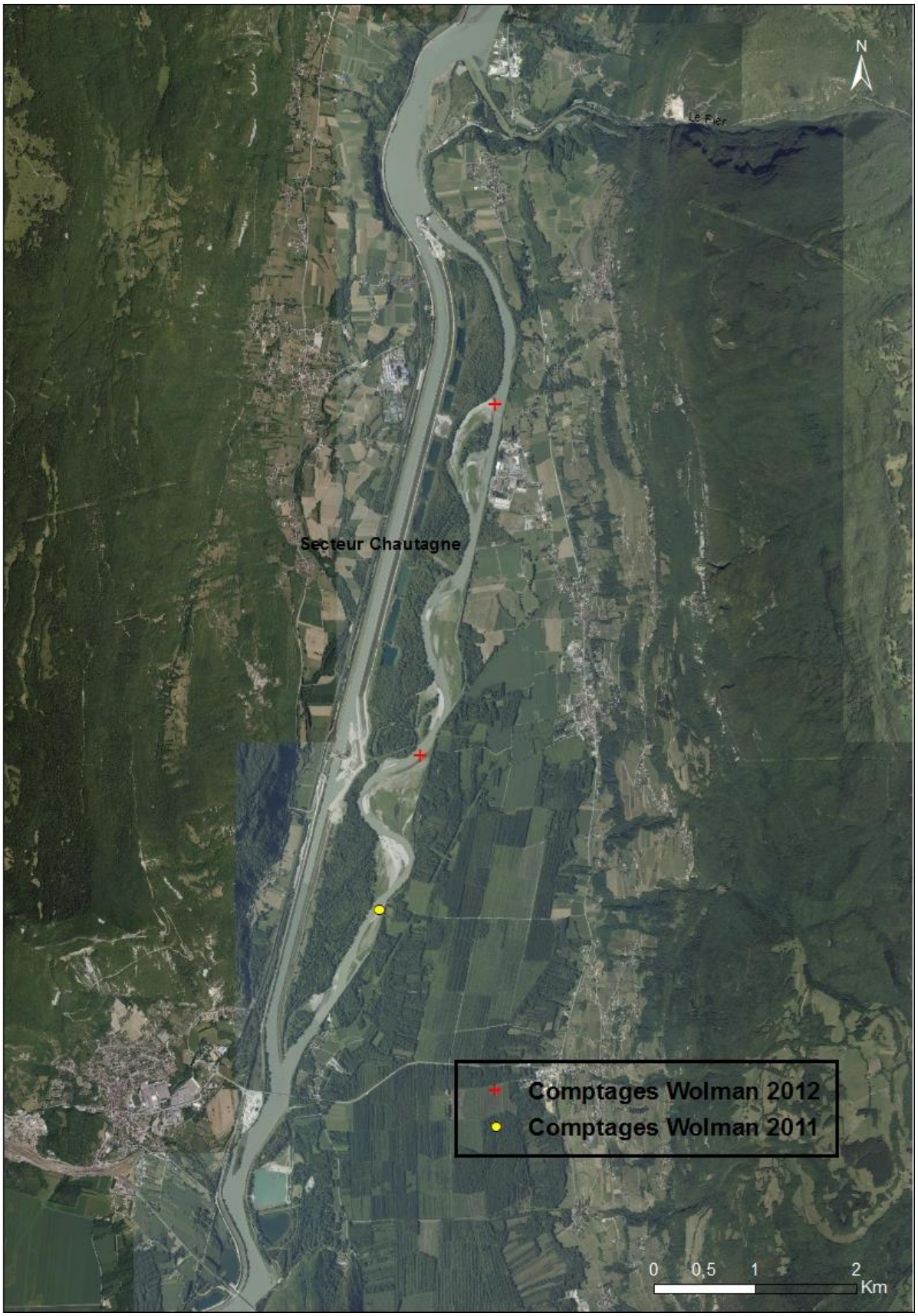

DZM b2m PK 173.2
DZM b1t PK 188.55
DZM b1m PK 189
DZM b1q PK 189.5
DZM 120 PK 194
DZM 121 PK 198.5
DZM 122 PK 204
DZM 123 PK 207.5
CAD 125 PK 215
CAD 126 PK 218
AVI 127 PK 219
AVI 128 PK 226
AVI 129 PK 230
AVI 131 PK 239
AVI 132 PK 242.7
AVI 133 PK 245
Fréquence normale de la répartition granulométrique (%)
Taille des grains (mm)


AVI 134 PK 250
AVI 135 PK 257.5
GRO 139 PK 271.5
GRO 140a PK 274.5
GRO 141 PK 277
GRO 142 PK 281
GRO 143 PK 284
GRO 144 PK 291
GRO 145 PK 299
GRO 146 PK 303
GRO 148 PK 314
GRO 149 PK 322
GRO 150 PK 330
Fréquence normale de la répartition granulométrique (%)
Taille des grains (mm)
0
20
40
60
0
50
100
150
200
250

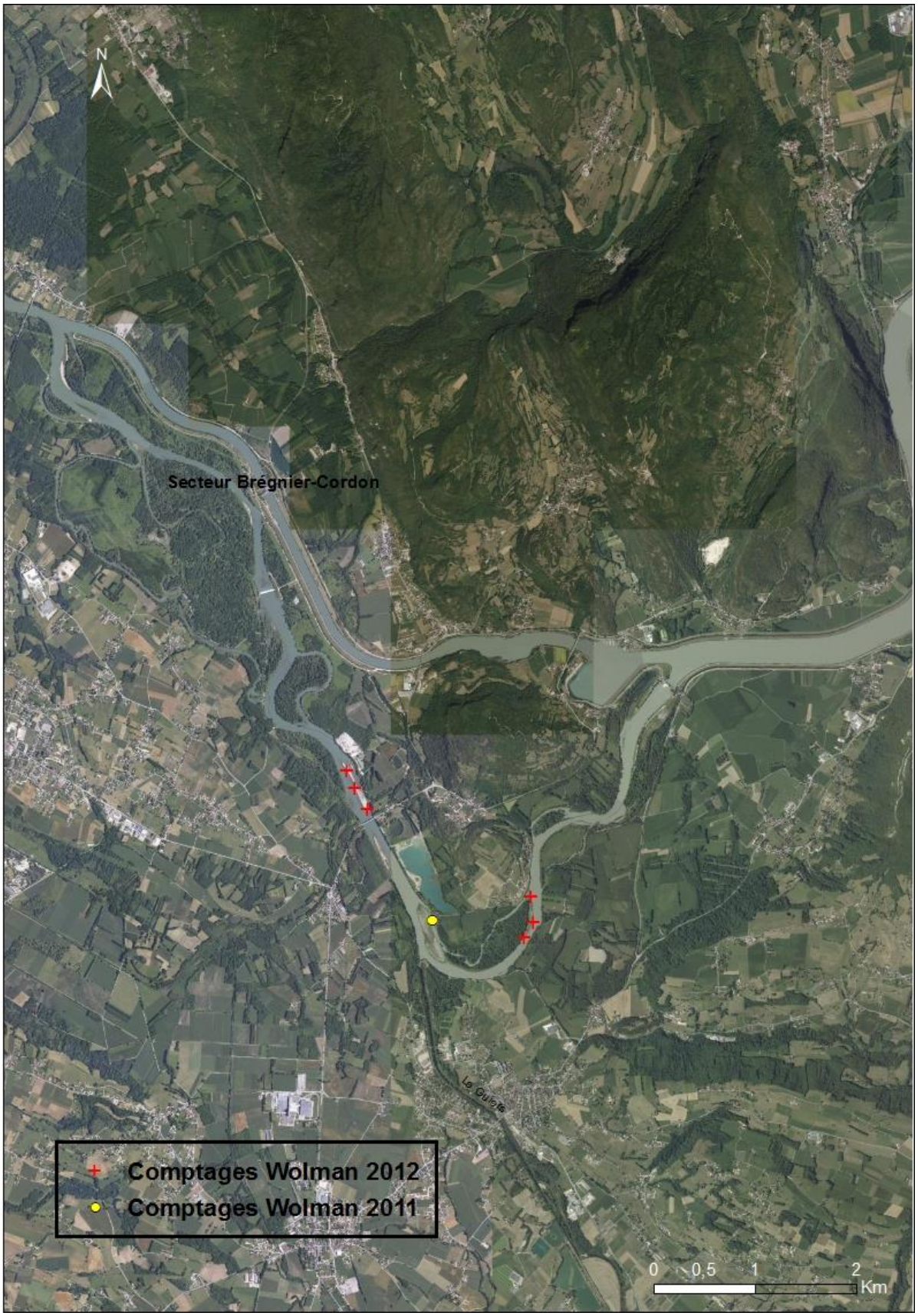
Annexe 24 : Mesures granulométriques réalisées sur les bancs des vieux Rhône de Chautagne à Donzère-Mondragon lors de la campagne de 2011

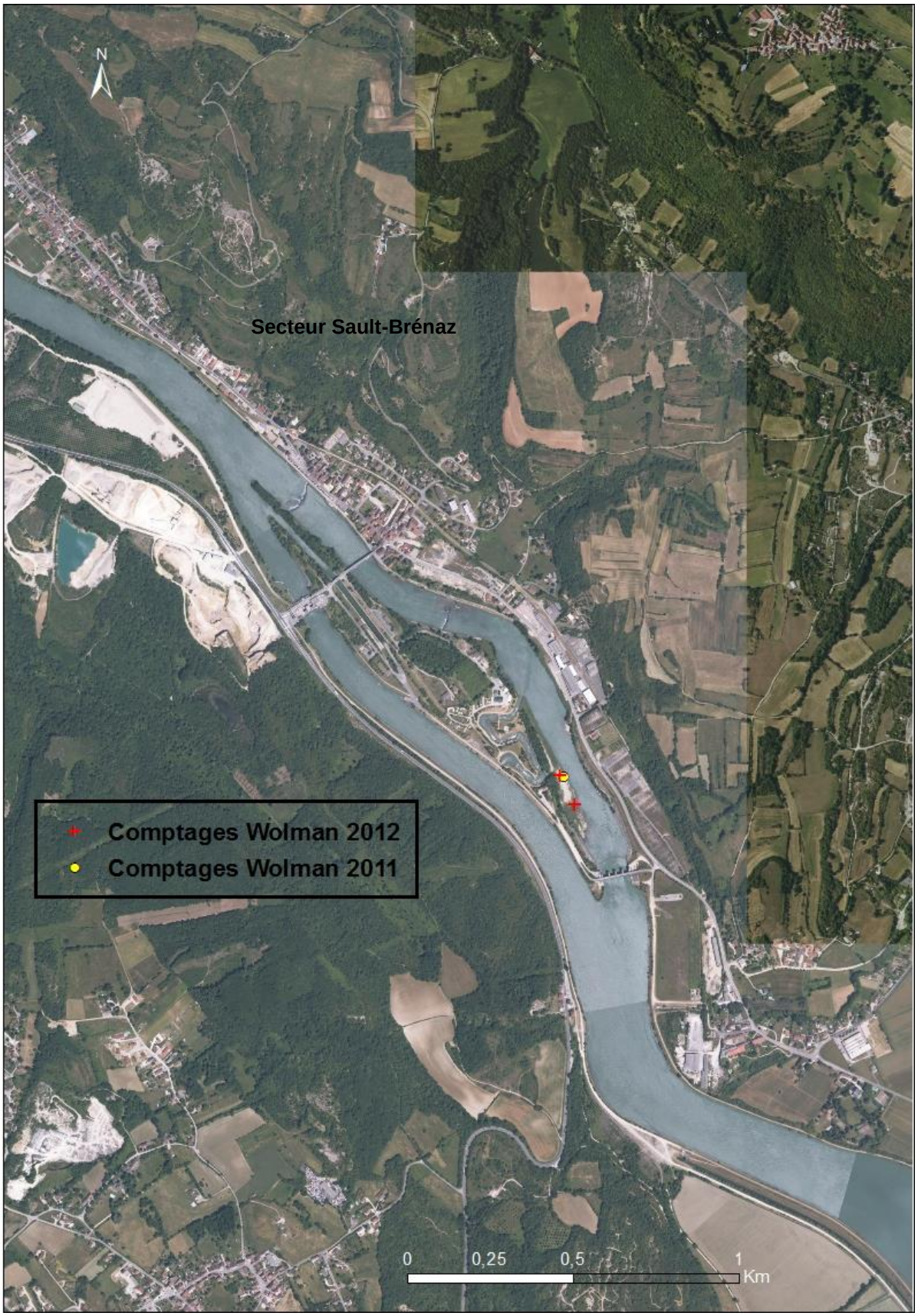
Lieu	PK	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)	Approche qualitative	Méthode d'échantillonnage	Observations / Remarques	Sources
Chautagne RCC	-138,9	9,86	**23,46**	39,96	Graviers grossiers	Wolman	En aval de Serrières, rive gauche. Amont du banc de convexité végétalisé, tuilage. Proche chenal, 2m du bord de l'eau	Mesures 2011
Brégnier-Cordon RCC	-98,75	6,06	**10,86**	26,56	Graviers moyens	Wolman	Banc latéral en rive droite, dans la convexité du méandre en aval du barrage et en amont du pont. Banc herssé et végétalisé (graminés). Crue récente, présence de laisse	Mesures 2011
Sault Brenaz aval barrage	-63,2	8,74	**27,84**	52,69	Graviers grossiers	Wolman	En rive gauche, sur l'île de la Serre, à 1 m du bord environ	Mesures 2011
Canal Miribel aval pont TGV	-24,5	5,86	**12,95**	24,99	Graviers moyens	Wolman	Banc de convexité, en rive droite, non végétalisé, à 2 m du bord de l'eau. Sédiments meubles	Mesures 2011
Canal Miribel aval MIR1	-23,3	8,16	**21,27**	70,66	Graviers grossiers	Wolman	Aval du premier banc, en rive gauche, à 2 m du bord de l'eau. Banc de convexité, début d'une végétalisation	Mesures 2011
Aval du Pont de Vernaison	11,3	8,45	**18,45**	36,21	Graviers moyens	Wolman	Banc connecté au chenal. En rive gauche, sédiments meubles non pavés et non armurés. Banc majoritairement végétalisé. Secteur Pierre Bénite	Mesures 2011 - DZM-20110624-Wln APV
Aval du Seuil de Serrière	60,7	5,64	**30,72**	73,09	Graviers grossiers	Wolman	En partie dans le chenal, en rive gauche. Secteur Péage de Roussillon	Mesures 2011 - DZM-20110624-Wln ASS
Roche de Glun	100,5	11,04	**34,43**	92,41	Graviers grossiers	Wolman	En aval du barrage, à environ 1m du bord du niveau d'eau, en rive gauche. Pavage du banc partiellement végétalisé. Secteur Bourg-lès-Valence	Mesures 2011 - DZM-20110624-Wln RdG
Baix au PK 139	139	4,61	**19,02**	60,71	Graviers moyens	Wolman	Prospection sur les 2/3 amont du banc, en rive droite, non loin du terrain de foot	Mesures 2011 - DZM-20110624-Wln BAIX
La Rouvière	161	6,07	**36,47**	83,35	Graviers grossiers	Wolman	En amont de la cité Lafarge, en rive droite. Banc de convexité, milieu-aval. Banc végétalisé (herbacée+qqs arbustes jeunes 1 à 2 ans), végétation de l'année. Sans doute un peu de mobilité. Echantillonnage sur la partie active émergée du banc	Mesures 2011 - DZM-20110624-Wln ROUV
Pont Saint Esprit	192,5	6,88	**24,45**	57,11	Graviers grossiers	Wolman	En face de Pont Saint Esprit, à l'amont du pont en rive gauche, comptage sur une partie du banc non végétalisée. Présence de blocs et graviers. Le bloc est partiellement végétalisé.	Mesures 2011 - DZM-20110620-Wln BPSE1
Pont Saint Esprit	192,5	11,91	**29,27**	68,52	Graviers grossiers	Wolman	En face de Pont Saint Esprit, à côté du 1er Wolman, à l'amont du pont en rive gauche, comptage sur une partie du banc non végétalisée. Présence de blocs et graviers. Le bloc est partiellement végétalisé.	Mesures 2011 - DZM-20110623-Wln BPSE2
Convexité am zone stockage	198,3	24,19	**50,24**	82,45	Graviers grossiers	Wolman	Test 26 : entre la zone de stockage et Pont St Esprit, proche banc, échantillonnage rive gauche	Mesures 2011 - DZM-20110623-Wln CHE

Annexe 25 : Localisation des comptages Wolman réalisés sur les bancs et dans le chenal en eau des vieux Rhône de Chautagne à Donzère-Mondragon – Campagnes de 2011 et 2012



Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
N
Secteur Belley
0 0,5 1 2
Km


N
Secteur Brégnier-Cordon
Le Guiers
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
0 0,5 1 2
Km


N
Secteur Sault-Brénaz
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
0
0,25
0,5
1
Km

N
Secteur Ain
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
0
1
2
4
Km

N
Secteur de Lyon Miribel
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
0
1
2
4
Km

N
Secteur de Pierre Bénite
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
0 0,3 0,6 1,2
Km

N
Secteur de Péage du Roussillon
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
0
0,5
1
2
Km

N
Secteur de Saint Vallier
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
0
0,5
1
2
Km

N
Secteur de Bourg les Valence
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
0
0,5
1
2
Km

N
Secteur de Donzère-Mondragon
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
0
1
2
4
Km

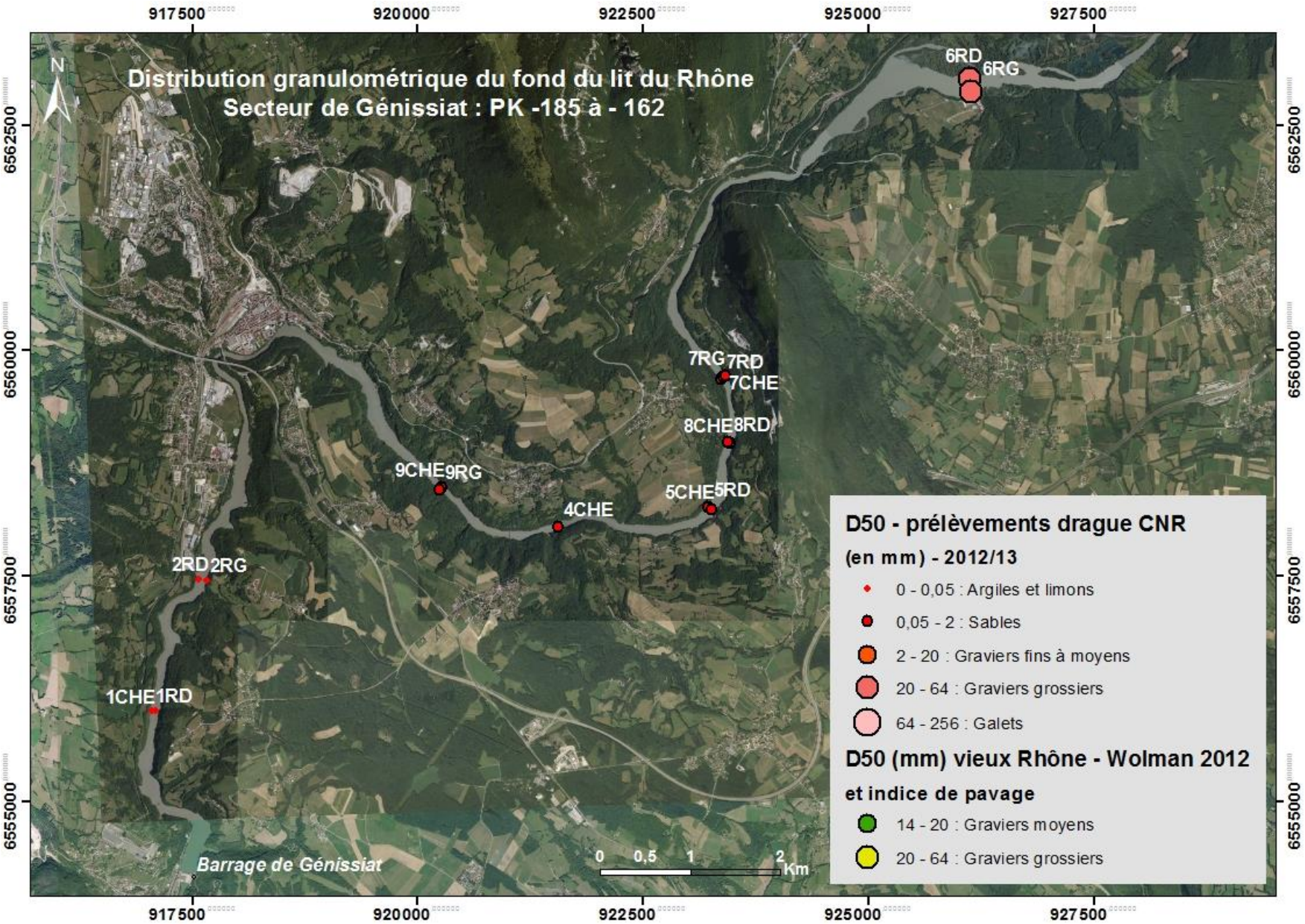
N
Comptages Wolman 2012
Comptages Wolman 2011
Secteur de Donzère-Mondragon
Le Lez
0
1
2
4
Km

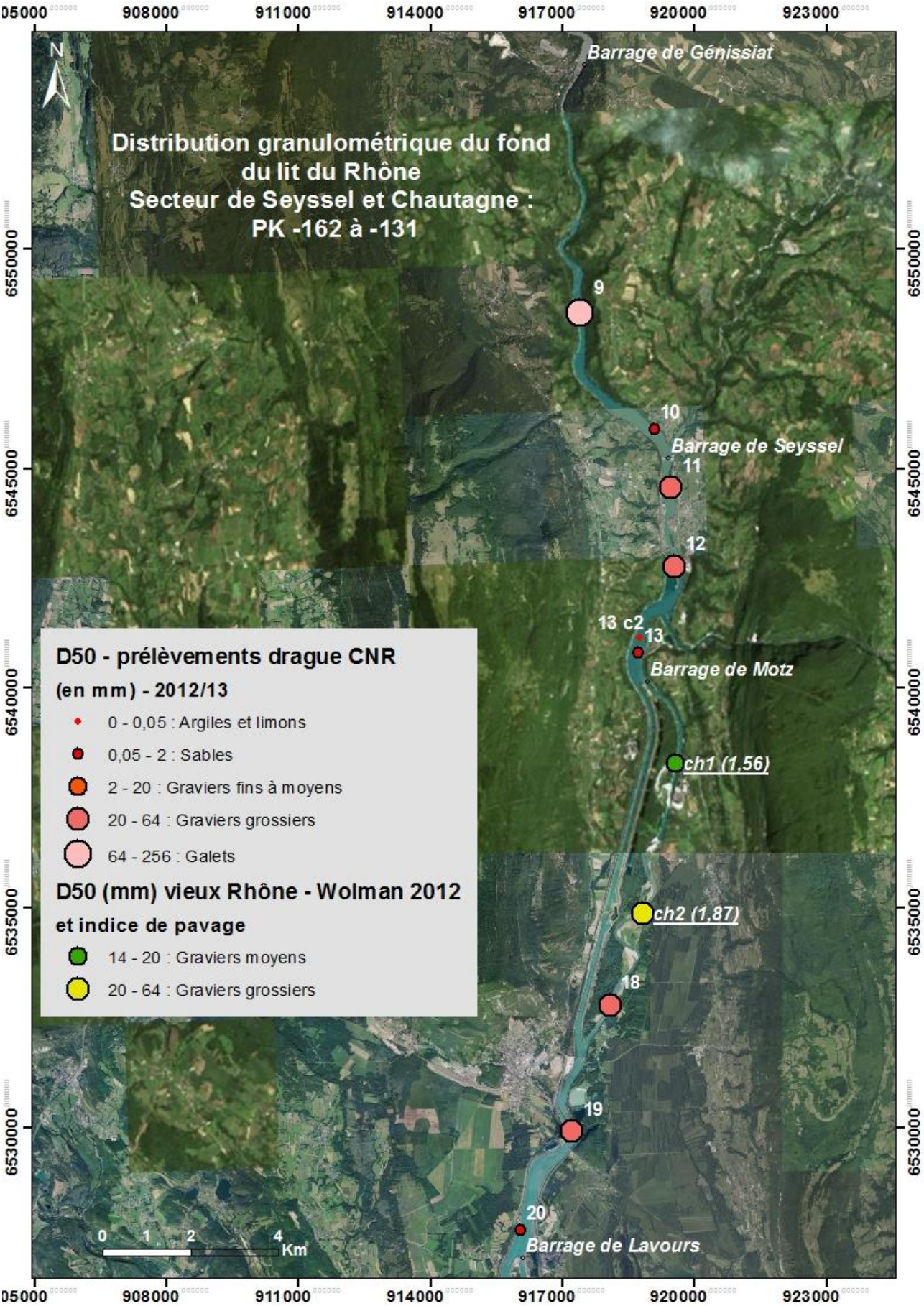
Annexe 26 : Caractérisation granulométrique (D_{10}, D_{50} et D_{90}) à partir de prélèvements effectués selon la méthode Wolman sur les bancs (b) et dans le chenal du Rhône (e) majoritairement dans les vieux Rhône. Détermination des indices de pavage sur les bancs et dans le chenal – Campagnes 2012 réalisées à pied. Colonne 1 : localisation par rapport à t=tête, m=milieu, q=queue du banc. Colonne 2 : prélèvement en s=surface, ss=subsurface, ch=chenal. Colonne 3 : mesure réalisée sur b=banc, e=chenal en eau

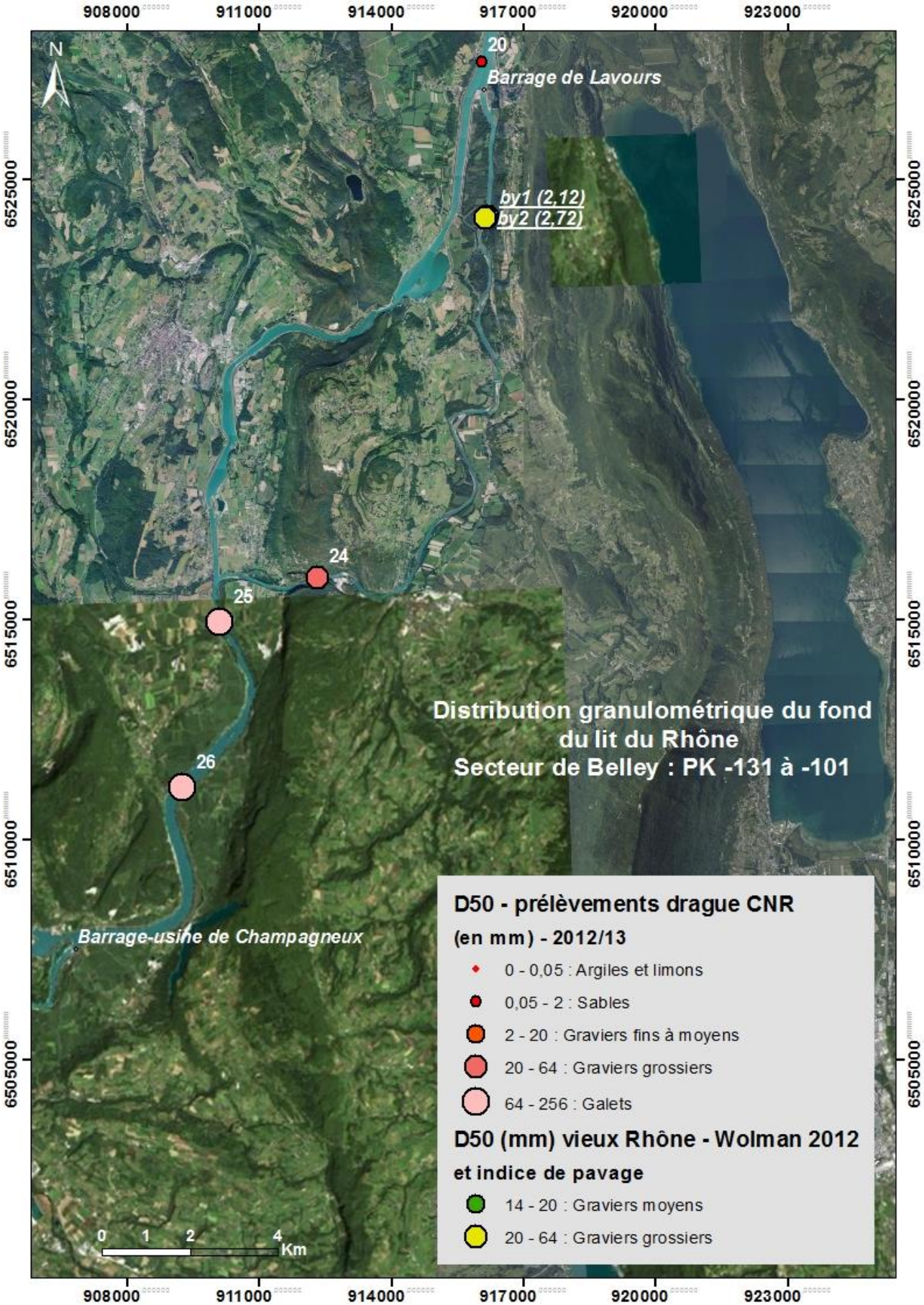
Secteur	Nom échantillon	Lieu	X	Y	Pk	D10	D50	D90	Méthode	1	2	3	Indice pavage
CHA	CHA_2012-05-23_b1-t-s	Chautagne	919568,816	6538290,55	-143,8	11,24	**32,22**	69,10	Wolman	t	s	b	**2,58**
CHA	CHA_2012-05-23_b1-t-ss	Chautagne	919568,816	6538290,55	-143,8	4,09	**12,50**	32,70	Wolman	t	ss	b	
CHA	CHA_2012-05-23_b1-t-ch	Chautagne	919568,816	6538290,55	-143,8	9,51	**27,59**	54,78	Wolman	t	ch	e	**2,21**
CHA	CHA_2012-05-23_b2-t-s	Chautagne	918829,882	6534875,61	-140,2	8,65	**20,73**	40,20	Wolman	t	s	b	**1,91**
CHA	CHA_2012-05-23_b2-t-ss	Chautagne	918829,882	6534875,61	-140,2		**10,85**	43,00	Wolman	t	ss	b	
CHA	CHA_2012-05-23_b2-t-ch	Chautagne	918829,882	6534875,61	-140,2	9,96	**20,26**	39,88	Wolman	t	ch	e	**1,87**
BEY	BEY_2012-05-22_b2-t-s	Belley	916189,924	6524139,62	-128,9	12,33	**20,82**	40,34	Wolman	t	s	b	**1,86**
BEY	BEY_2012-05-22_b2-t-ss	Belley	916189,924	6524139,62	-128,9		**11,19**	29,34	Wolman	t	ss	b	
BEY	BEY_2012-05-22_b2-t-s2	Belley	916143,981	6524126,32	-128,9	6,28	**25,19**	44,47	Wolman	t2	s	b	**2,89**
BEY	BEY_2012-05-22_b2-t-ss2	Belley	916143,981	6524126,32	-128,9		**8,72**	33,24	Wolman	t2	ss	b	
BEY	BEY_2012-05-22_b2-t-ch	Belley	916128,313	6524123,97	-128,9	14,12	**23,72**	40,99	Wolman	t	ch	e	**2,72**
BEY	BEY_2012-05-22_b2-m-s	Belley	916132,763	6524020,58	-128,8	11,73	**26,18**	51,42	Wolman	m	s	b	**3,09**
BEY	BEY_2012-05-22_b2-m-ss	Belley	916132,763	6524020,58	-128,8		**8,47**	23,40	Wolman	m	ss	b	
BEY	BEY_2012-05-21_b1-t-s	Belley	915272	6517278	-121,2	16,15	**26,12**	41,27	Wolman	t	s	b	**1,93**
BEY	BEY_2012-05-21_b1-t-ss	Belley	915272	6517278	-121,2	5,40	**13,54**	27,52	Wolman	t	ss	b	
BEY	BEY_2012-05-21_b1-m-s	Belley	915092	6517202	-121	15,08	**25,12**	38,21	Wolman	m	s	b	**1,56**
BEY	BEY_2012-05-21_b1-m-ss	Belley	915092	6517202	-121	8,36	**16,09**	31,93	Wolman	m	ss	b	
BEY	BEY_2012-05-21_b1-q-s	Belley	915011	6517101	-120,8	10,96	**23,21**	40,06	Wolman	q	s	b	**1,77**
BEY	BEY_2012-05-21_b1-q-ss	Belley	915011	6517101	-120,8	8,21	**13,09**	23,62	Wolman	q	ss	b	
BRC	BRC_2012-05-11_b1-t-s	Brégnier-Cordon	905382	6505428	-100,4	10,22	**20,78**	30,88	Wolman	t	s	b	**1,76**
BRC	BRC_2012-05-11_b1-t-ss	Brégnier-Cordon	905382	6505428	-100,4		**11,83**	24,95	Wolman	t	ss	b	
BRC	BRC_2012-05-11_b1-t-ch	Brégnier-Cordon	905382	6505428	-100,4	8,36	**18,95**	34,01	Wolman	t	ch	e	**1,60**
BRC	BRC_2012-05-11_b1-m-s	Brégnier-Cordon	905405,937	6505184,25	-100,1	8,98	**16,22**	26,75	Wolman	m	s	b	**1,69**
BRC	BRC_2012-05-11_b1-m-ss	Brégnier-Cordon	905405,937	6505184,25	-100,1		**9,57**	22,60	Wolman	m	ss	b	
BRC	BRC_2012-05-11_b1-m-ch	Brégnier-Cordon	905405,937	6505184,25	-100,1	6,09	**14,75**	27,12	Wolman	m	ch	e	**1,54**
BRC	BRC_2012-05-11_b1-q-s	Brégnier-Cordon	905323,77	6505028,1	-99,95	9,84	**22,98**	40,44	Wolman	q	s	b	**1,36**
BRC	BRC_2012-05-11_b1-q-ss	Brégnier-Cordon	905323,77	6505028,1	-99,95	6,61	**16,91**	34,30	Wolman	q	ss	b	
BRC	BRC_2012-05-11_b1-q-ch	Brégnier-Cordon	905323,77	6505028,1	-99,95	3,97	**15,68**	32,67	Wolman	q	ch	e	**0,93**
BRC	BRC_2012-05-11_b2-t-s	Brégnier-Cordon	903773	6506281	-97,5	8,93	**19,73**	38,18	Wolman	t	s	b	**1,97**
BRC	BRC_2012-05-11_b2-t-ss	Brégnier-Cordon	903773	6506281	-97,5		**10,00**	24,39	Wolman	t	ss	b	
BRC	BRC_2012-05-11_b2-t-ch	Brégnier-Cordon	903773	6506281	-97,5	8,41	**16,34**	28,67	Wolman	t	ch	e	**1,63**
BRC	BRC_2012-05-11_b2-m-s	Brégnier-Cordon	903653	6506488	-97,2	3,73	**12,81**	23,81	Wolman	m	s	b	**2,05**
BRC	BRC_2012-05-11_b2-m-ss	Brégnier-Cordon	903653	6506488	-97,2		**6,26**	19,91	Wolman	m	ss	b	
BRC	BRC_2012-05-11_b2-m-ch	Brégnier-Cordon	903653	6506488	-97,2	6,39	**19,42**	38,66	Wolman	m	ch	e	**3,10**
BRC	BRC_2012-05-11_b2-q-s	Brégnier-Cordon	903566	6506658	-97	8,19	**16,00**	33,42	Wolman	q	s	b	**1,60**
BRC	BRC_2012-05-11_b2-q-s2	Brégnier-Cordon	903566	6506658	-97	4,36	**12,91**	21,65	Wolman	q2	s	b	
BRC	BRC_2012-05-11_b2-q-ss	Brégnier-Cordon	903566	6506658	-97		**9,98**	21,34	Wolman	q	ss	b	
BRC	BRC_2012-05-11_b2-q-ch	Brégnier-Cordon	903566	6506658	-97	3,63	**23,64**	48,54	Wolman	q	ch	e	**2,37**
SBR	SBR_2012-05-10_b1-t-ch	Sault-Brénaz	887484,065	6530414,62	-63,32	9,63	**29,05**	73,01	Wolman	t	ch	e	
SBR	SBR_2012-05-10_b1-m-s	Sault-Brénaz	887438,282	6530502,16	-63,22	10,06	**23,78**	48,36	Wolman	m	s	b	**4,75**
SBR	SBR_2012-05-10_b1-m-ss	Sault-Brénaz	887438,282	6530502,16	-63,22		**5,01**	23,73	Wolman	m	ss	b	
SBR	SBR_2012-05-10_b1-m-ch	Sault-Brénaz	887438,282	6530502,16	-63,22		**35,59**	62,84	Wolman	m	ch	e	**7,10**
AIN	AIN_2012-05-14_b1-t-ch	Saint-Vulbas	878421,708	6528922,91	-49,8	9,80	**20,23**	35,62	Wolman	t	ch	e	
LYM	LYM_2012-05-03_b1-t-s	Miribel	853808,358	6526004,84	-18,2	4,59	**11,43**	21,37	Wolman	t	s	b	**1,42**
LYM	LYM_2012-05-03_b1-t-ss	Miribel	853808,358	6526004,84	-18,2		**8,05**	16,06	Wolman	t	ss	b	
LYM	LYM_2012-05-03_b1-t-ch	Miribel	853808,358	6526004,84	-18,2	9,31	**16,91**	31,30	Wolman	t	ch	e	**2,10**
LYM	LYM_2012-05-03_b1-m-s	Miribel	853795,756	6526007,91	-18,1	6,54	**14,55**	23,97	Wolman	m	s	b	**1,49**
LYM	LYM_2012-05-03_b1-m-ss	Miribel	853795,756	6526007,91	-18,1		**9,79**	19,76	Wolman	m	ss	b	
LYM	LYM_2012-05-03_b1-m-ch	Miribel	853795,756	6526007,91	-18,1	5,59	**16,44**	37,79	Wolman	m	ch	e	**1,68**
LYM	LYM_2012-05-03_b1-q-s	Miribel	853760,217	6526032,52	-18	7,11	**13,61**	21,58	Wolman	q	s	b	**1,34**
LYM	LYM_2012-05-03_b1-q-ss	Miribel	853760,217	6526032,52	-18		**10,15**	18,58	Wolman	q	ss	b	
LYM	LYM_2012-05-03_b1-q-ch	Miribel	853760,217	6526032,52	-18	5,89	**17,09**	30,37	Wolman	q	ch	e	**1,68**
LYM	LYM_2012-05-03_b2-t-s	Parc de Miribel Jonage	853022,633	6526472,51	-17,4	6,33	**14,04**	36,92	Wolman	t	s	b	**1,48**
LYM	LYM_2012-05-03_b2-t-ss	Parc de Miribel Jonage	853022,633	6526472,51	-17,4		**9,46**	19,30	Wolman	t	ss	b	
LYM	LYM_2012-05-03_b2-t-ch	Parc de Miribel Jonage	853022,633	6526472,51	-17,4	12,09	**25,19**	43,98	Wolman	t	ch	e	**2,66**
LYM	LYM_2012-05-03_b2-m-s	Parc de Miribel Jonage	853086,846	6526446,85	-17,2	5,23	**12,02**	22,51	Wolman	m	s	b	**1,26**
LYM	LYM_2012-05-03_b2-m-ss	Parc de Miribel Jonage	853086,846	6526446,85	-17,2	4,58	**9,51**	19,51	Wolman	m	ss	b	
LYM	LYM_2012-05-03_b2-m-ch	Parc de Miribel Jonage	853086,846	6526446,85	-17,2	13,72	**25,19**	42,36	Wolman	m	ch	e	**2,65**
LYM	LYM_2012-05-03_b2-q-s	Parc de Miribel Jonage	852872,539	6526516,81	-17	8,40	**14,25**	25,75	Wolman	q	s	b	
LYM	LYM_2012-05-03_b2-q-ch	Parc de Miribel Jonage	852872,539	6526516,81	-17	9,54	**21,61**	41,14	Wolman	q	ch	e	

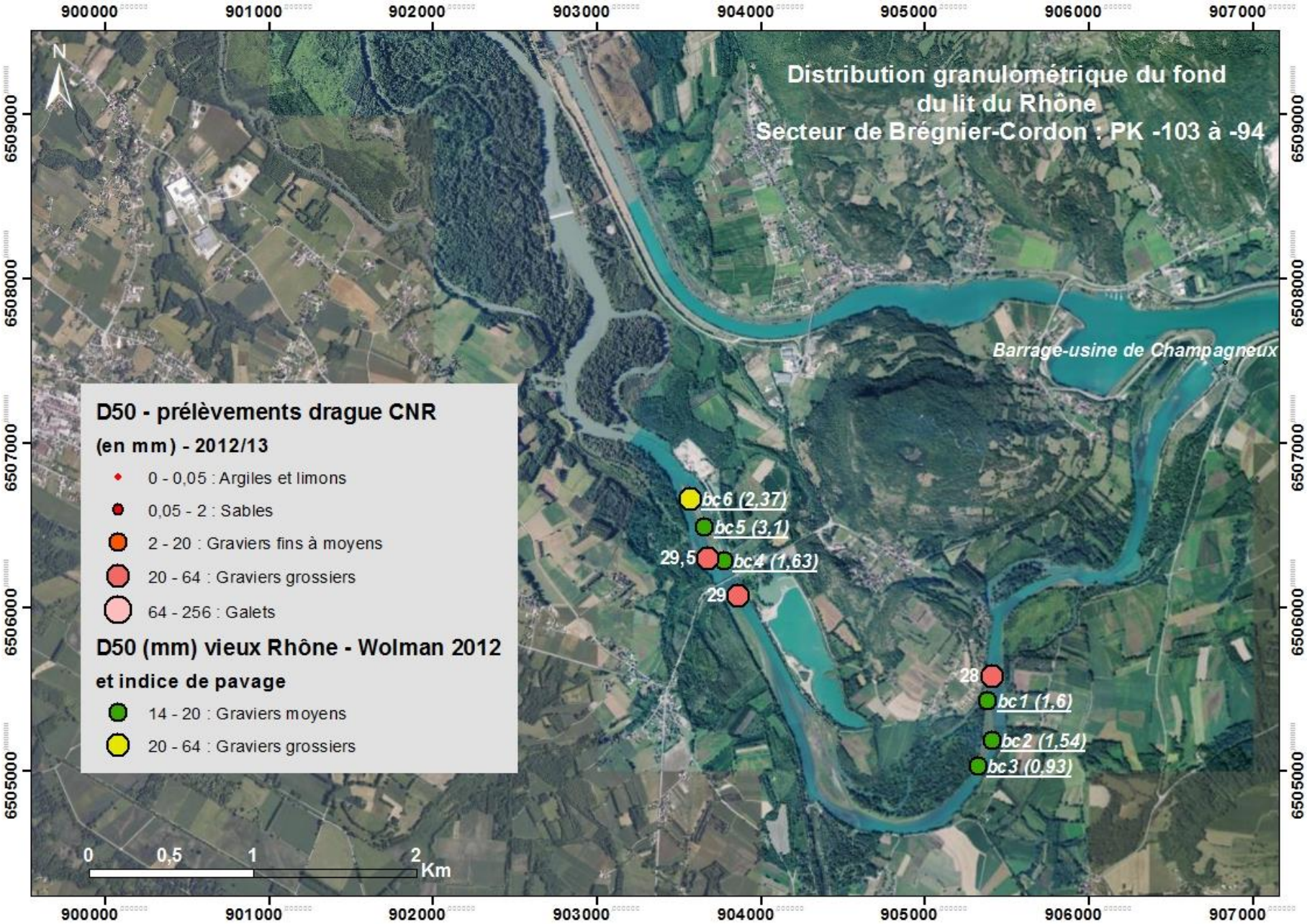
Secteur	Nom échantillon	Lieu	X	Y	Pk	D10	D50	D90	Méthode	1	2	3	Indice pavage
PBN	PBN_2012-04-25_b1-t-s	Ile de Ciselant	842283,756	6507680,44	9,5	18,75	**37,86**	74,59	Wolman	t	s	b	**5,55**
PBN	PBN_2012-04-25_b1-t-ss	Ile de Ciselant	842283,756	6507680,44	9,5		**6,82**	31,78	Wolman	t	ss	b	
PBN	PBN_2012-04-25_b1-t-ch	Ile de Ciselant	842283,756	6507680,44	9,5	13,14	**54,31**	96,76	Wolman	t	ch	e	**7,97**
PBN	PBN_2012-04-25_b1-m-s	Ile de Jaricot	841932,764	6507130,87	10,3	4,76	**24,85**	73,94	Wolman	m	s	b	**2,68**
PBN	PBN_2012-04-25_b1-m-ss	Ile de Jaricot	841932,764	6507130,87	10,3		**9,29**	38,07	Wolman	m	ss	b	
PBN	PBN_2012-04-25_b1-m-ch	Ile de Jaricot	841932,764	6507130,87	10,3	9,19	**46,23**	83,08	Wolman	m	ch	e	**4,98**
PBN	PBN_2012-04-25_b1-q-s	Ile de Jaricot	841685,945	6506954,31	10,7	3,00	**18,69**	46,02	Wolman	q	s	b	**1,65**
PBN	PBN_2012-04-25_b1-q-ss	Ile de Jaricot	841685,945	6506954,31	10,7		**11,30**	29,51	Wolman	q	ss	b	
PBN	PBN_2012-04-25_b1-q-ch	Ile de Jaricot	841685,945	6506954,31	10,7	17,67	**44,67**	71,36	Wolman	q	ch	e	**3,95**
PBN	PBN_2012-05-02_b2-t-s	Table Ronde	841310	6506481	11,12	8,51	**27,36**	64,81	Wolman	t	s	b	**3,18**
PBN	PBN_2012-05-02_b2-t-ss	Table Ronde	841310	6506481	11,12		**8,60**	19,44	Wolman	t	ss	b	
PBN	PBN_2012-05-02_b2-t-ch	Table Ronde	841310	6506481	11,12	19,02	**43,30**	94,19	Wolman	t	ch	e	**5,03**
PBN	PBN_2012-05-02_b2-t2-s	Table Ronde	841232	6506393	11,25	11,40	**21,19**	38,93	Wolman	t2	s	b	**1,80**
PBN	PBN_2012-05-02_b2-t2-ss	Table Ronde	841232	6506393	11,25	6,14	**11,78**	23,81	Wolman	t2	ss	b	
PBN	PBN_2012-05-02_b2-t2-ch	Table Ronde	841232	6506393	11,25	16,48	**50,83**	85,75	Wolman	t2	ch	e	**4,32**
PBN	PBN_2012-04-25_b2-m-s	Table Ronde	841136,356	6506127,64	11,5	3,78	**15,10**	43,35	Wolman	m	s	b	**1,63**
PBN	PBN_2012-04-25_b2-m-ss	Table Ronde	841136,356	6506127,64	11,5		**9,29**	23,08	Wolman	m	ss	b	
PBN	PBN_2012-05-02_b2-m-ch	Table Ronde	841136	6506128	11,5	17,50	**47,23**	84,00	Wolman	m	ch	e	**5,08**
PBN	PBN_2012-04-25_b2-q-s	Table Ronde	840948,849	6505559,08	12,5	5,66	**23,17**	55,74	Wolman	q	s	b	**2,51**
PBN	PBN_2012-04-25_b2-q-ss	Table Ronde	840948,849	6505559,08	12,5		**9,25**	31,72	Wolman	q	ss	b	
PBN	PBN_2012-05-02_b2-q-ch	Table Ronde	840949	6505559	12,5	8,68	**17,16**	30,16	Wolman	q	ch	e	**1,86**
PDR	PDR_2012-06-07_b1-t-s	Péage de Roussillon	837462	6475715	52,7	8,65	**18,33**	39,62	Wolman	t	s	b	**2,04**
PDR	PDR_2012-06-07_b1-t-ss	Péage de Roussillon	837462	6475715	52,7	3,07	**8,96**	22,49	Wolman	t	ss	b	
PDR	PDR_2012-06-07_b1-m-s	Péage de Roussillon	837624	6475511	53	3,90	**13,36**	28,88	Wolman	m	s	b	**1,60**
PDR	PDR_2012-06-07_b1-m-ss	Péage de Roussillon	837624	6475511	53		**8,36**	19,43	Wolman	m	ss	b	
PDR	PDR_2012-06-07_b1-q-s	Péage de Roussillon	837930	6475220	53,5		**9,56**	19,24	Wolman	q	s	b	**1,26**
PDR	PDR_2012-06-07_b1-q-ss	Péage de Roussillon	837930	6475220	53,5		**7,61**	17,56	Wolman	q	ss	b	
PDR	PDR_2012-08-07_b-q-ch	Péage de Roussillon	838009,068	6475089,29	53,6	16,40	**50,74**	83,44	Wolman	q	ch	e	**5,43**
PDR	PDR_2012-08-07_b-q-ss	Péage de Roussillon	838032,77	6475135,57	53,6		**9,35**	21,41	Wolman	q	ss	b	
PDR	PDR_2012-08-07_b-q-s	Péage de Roussillon	838032,77	6475135,57	53,6	12,42	**21,24**	43,89	Wolman	q	s	b	**2,27**
PDR	PDR_2012-06-07_b2-t-s	Péage de Roussillon	840084	6469253	60,7	9,57	**24,96**	44,89	Wolman	t	s	b	**2,06**
PDR	PDR_2012-06-07_b2-t-ss	Péage de Roussillon	840084	6469253	60,7		**12,10**	36,03	Wolman	t	ss	b	
PDR	PDR_2012-06-07_b2-t-ch	Péage de Roussillon	840084	6469253	60,7	12,91	**25,87**	48,54	Wolman	t	ch	e	**2,14**
VAL	VAL_2012-08-07_b-m-ch	Saint Vallier	841875,601	6449855,46	83	8,09	**37,03**	86,36	Wolman	m	ch	e	**4,20**
VAL	VAL_2012-08-07_b-m-s	Saint Vallier	841912,228	6449850,82	83	16,73	**28,01**	55,84	Wolman	m	s	b	**3,18**
VAL	VAL_2012-08-07_b-m-ss	Saint Vallier	841912,228	6449850,82	83		**8,82**	21,92	Wolman	m	ss	b	
VAL	VAL_2012-05-25_b1-m-s	Saint Vallier	841900,729	6449803,47	83,05	9,98	**20,04**	38,77	Wolman	m	s	b	
BLV	BLV_2012-08-07_b1-q-s	Bourg lès Valence	844889,268	6435673,35	100,5	8,52	**20,14**	43,60	Wolman	q	s	b	
BLV	BLV_2012-08-07_b-q-s2	Bourg lès Valence	844877,222	6435679,52	100,5	13,49	**29,55**	55,40	Wolman	q	s	b	**2,18**
BLV	BLV_2012-08-07_b-q-ss	Bourg lès Valence	844877,222	6435679,52	100,5		**13,53**	28,25	Wolman	q	ss	b	
BLV	BLV_2012-08-07_b-q-ch	Bourg lès Valence	844869,454	6435675,53	100,5	13,39	**27,05**	60,00	Wolman	q	ch	e	**2,00**
DZM	DZM_2012-05-30_b2-t-s	Donzère-Mondragon	833123,076	6372080,37	172,5	15,22	**29,68**	67,28	Wolman	t	s	b	**2,21**
DZM	DZM_2012-05-30_b2-t-ss	Donzère-Mondragon	833123,076	6372080,37	172,5	5,58	**13,45**	26,68	Wolman	t	ss	b	
DZM	DZM_2012-05-30_b2-t-ch	Donzère-Mondragon	833123,076	6372080,37	172,5	15,63	**51,74**	182,13	Wolman	t	ch	e	**3,85**
DZM	DZM_2012-05-30_b2-m-s	Donzère-Mondragon	832722,262	6371424,97	173,2	19,16	**40,26**	78,03	Wolman	m	s	b	**3,54**
DZM	DZM_2012-05-30_b2-m_ss	Donzère-Mondragon	832722,262	6371424,97	173,2		**11,38**	27,02	Wolman	m	ss	b	
DZM	DZM_2012-05-30_b2-m-ch	Donzère-Mondragon	832722,262	6371424,97	173,2	12,91	**48,21**	84,33	Wolman	m	ch	e	**4,24**
DZM	DZM_2012-05-30_b1-t-s	Donzère-Mondragon	831925,347	6356005,15	188,6	11,21	**38,07**	81,42	Wolman	t	s	b	**3,77**
DZM	DZM_2012-05-30_b1-t-ss	Donzère-Mondragon	831925,347	6356005,15	188,6		**10,09**	34,11	Wolman	t	ss	b	
DZM	DZM_2012-05-30_b1-t-ch	Donzère-Mondragon	831925,347	6356005,15	188,6	21,73	**47,92**	76,42	Wolman	t	ch	e	**4,75**
DZM	DZM_2012-05-30_b1-m-s	Donzère-Mondragon	831854,798	6355677,97	189	12,65	**28,14**	47,99	Wolman	m	s	b	**2,02**
DZM	DZM_2012-05-30_b1-m_ss	Donzère-Mondragon	831854,798	6355677,97	189	8,09	**13,92**	28,83	Wolman	m	ss	b	
DZM	DZM_2012-05-30_b1-m-ch	Donzère-Mondragon	831854,798	6355677,97	189	20,22	**47,46**	99,04	Wolman	m	ch	e	**3,41**
DZM	DZM_2012-05-30_b1-q-s	Donzère-Mondragon	831844,189	6355542,28	189,5	17,02	**31,39**	60,66	Wolman	q	s	b	**1,94**
DZM	DZM_2012-05-30_b1-q-ss	Donzère-Mondragon	831844,189	6355542,28	189,5	9,09	**16,19**	34,54	Wolman	q	ss	b	
DZM	DZM_2012-05-30_b1-q-ch	Donzère-Mondragon	831844,189	6355542,28	189,5	15,78	**43,00**	85,67	Wolman	q	ch	e	**2,66**

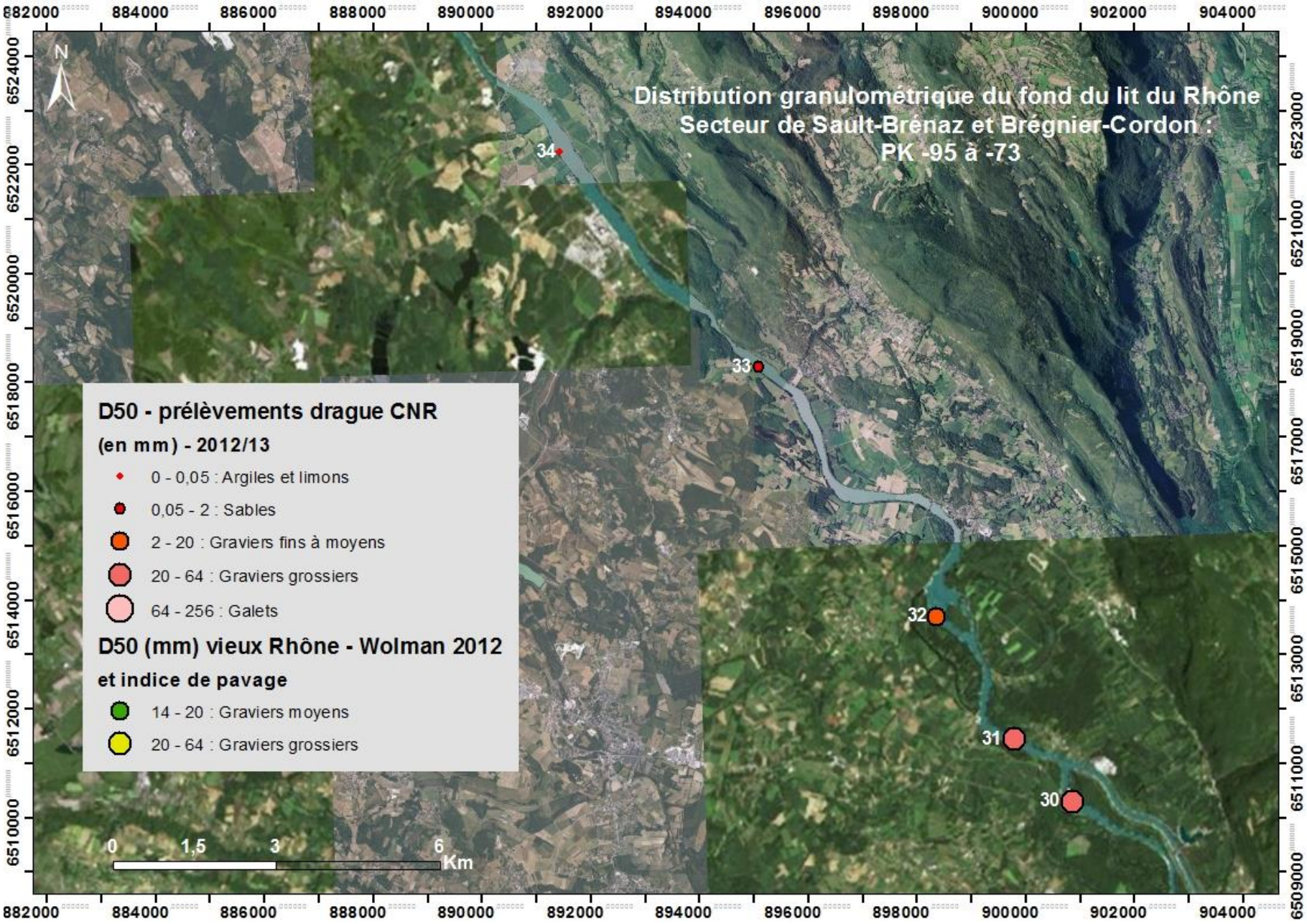
Annexe 27 : Agrandissements de la distribution granulométrique longitudinale (D_{50} en mm) du fond du chenal du Rhône - campagnes Wolman et dragages CNR 2012 -13

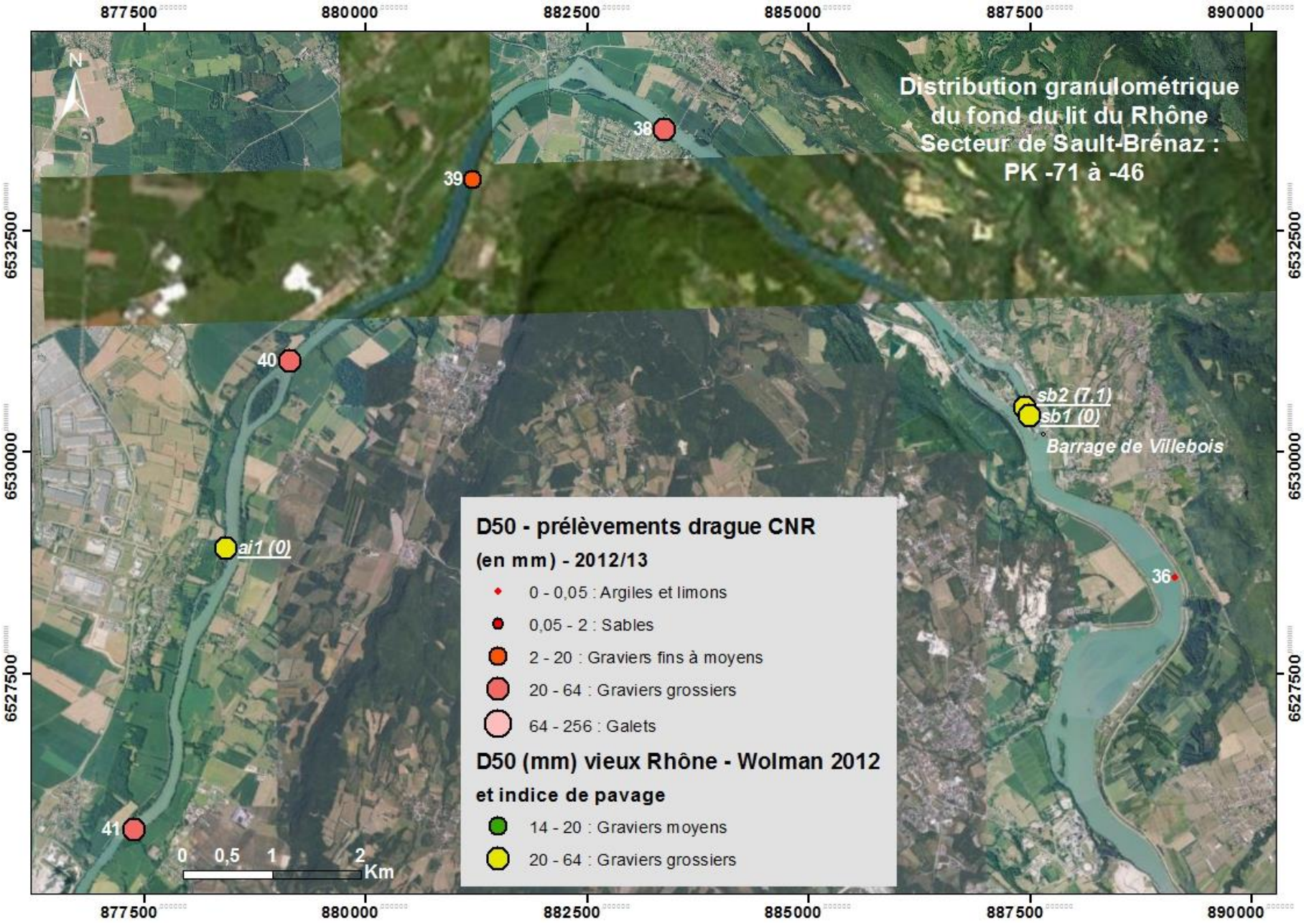


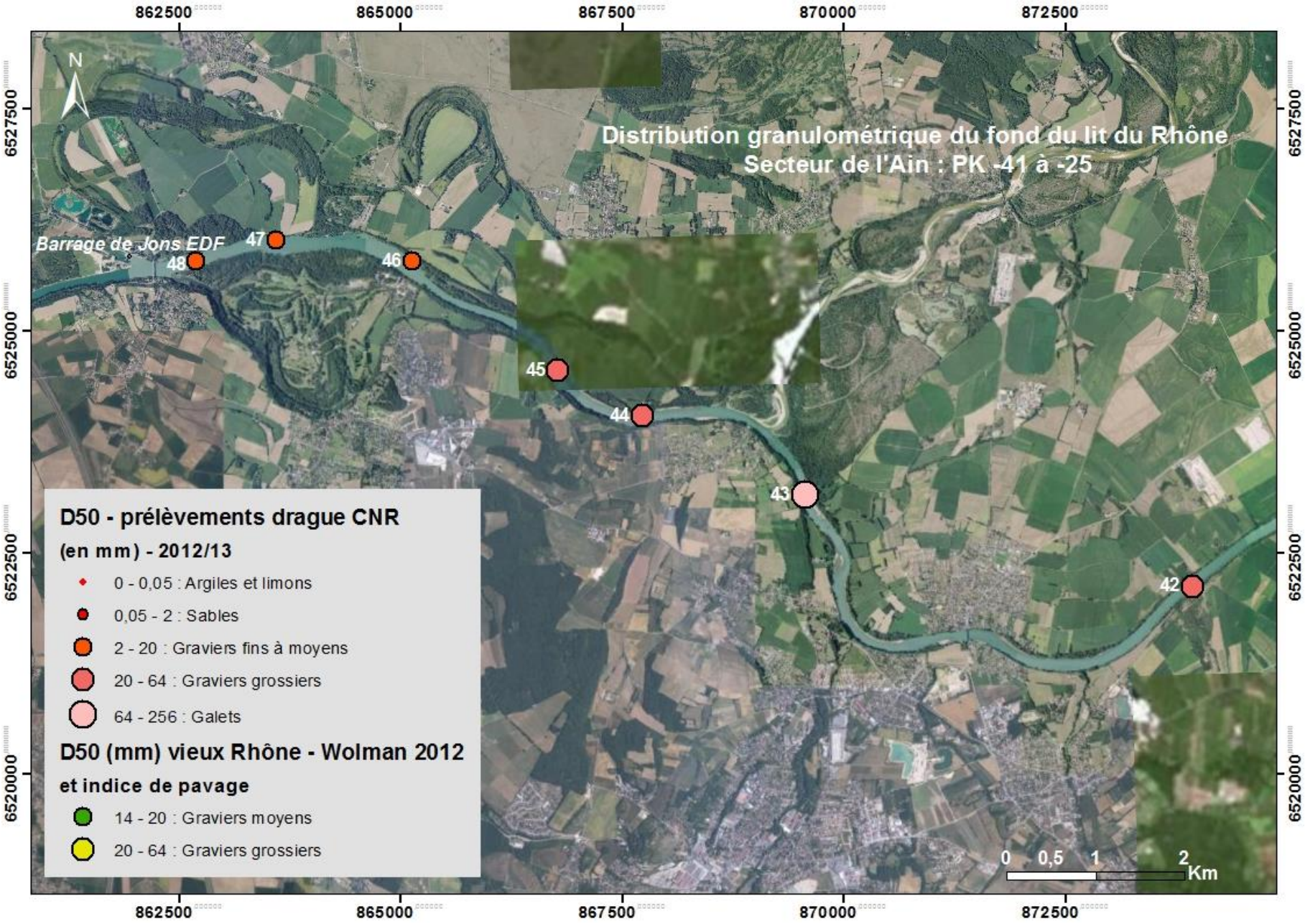

Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Seyssel et Chautagne :
PK -162 à -131
N
Barrage de Génissiat
Barrage de Seyssel
Barrage de Motz
Barrage de Lavours
9
10
11
12
13 c2
13
ch1 (1,56)
ch2 (1,87)
18
19
20
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 1 2 4 Km
05000
908000
911000
914000
917000
920000
923000
6550000
6545000
6540000
6535000
6530000

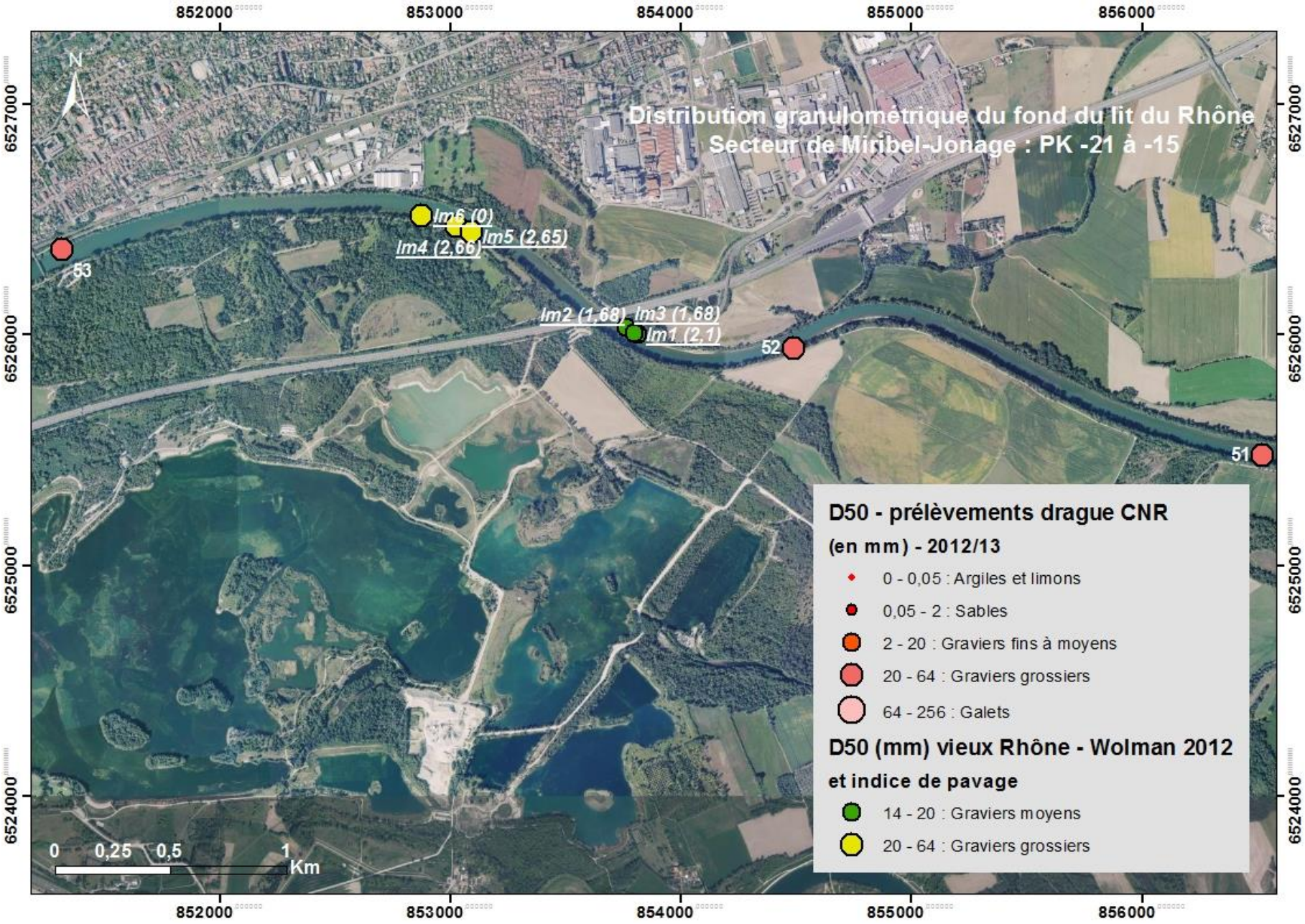

908000
911000
914000
917000
920000
923000
6525000
6520000
6515000
6510000
6505000
N
20
Barrage de Lavours
by1 (2,12)
by2 (2,72)
24
25
26
Barrage-usine de Champagneux
Distribution granulométrique du fond du lit du Rhône
Secteur de Belley : PK -131 à -101
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 1 2 4 Km

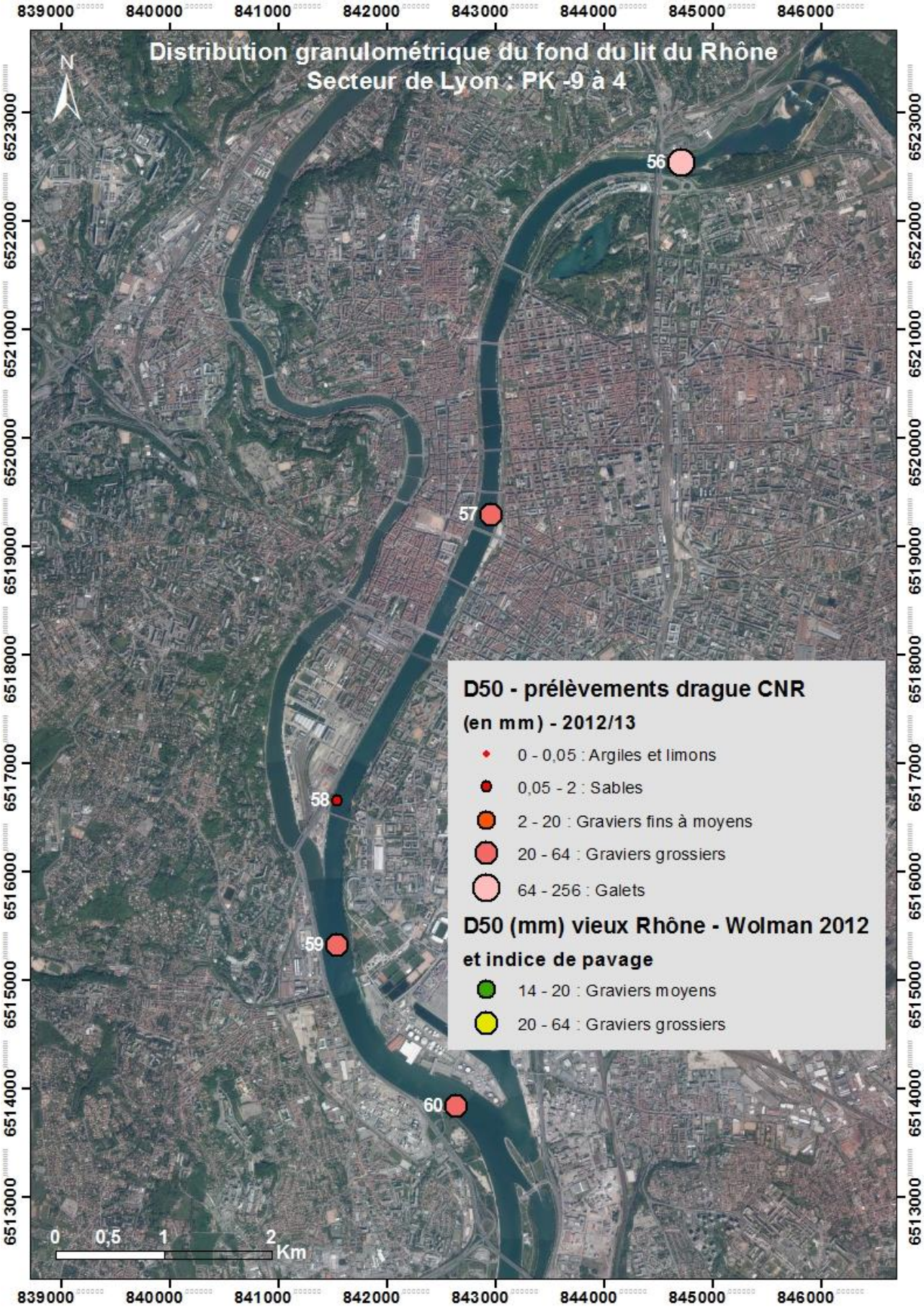

Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Brégnier-Cordon : PK -103 à -94
Barrage-usine de Champagneux
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
bc6 (2,37)
bc5 (3,1)
29,5
bc4 (1,63)
29
28
bc1 (1,6)
bc2 (1,54)
bc3 (0,93)
0
0,5
1
2
Km
N
900000
901000
902000
903000
904000
905000
906000
907000
6509000
6508000
6507000
6506000
6505000

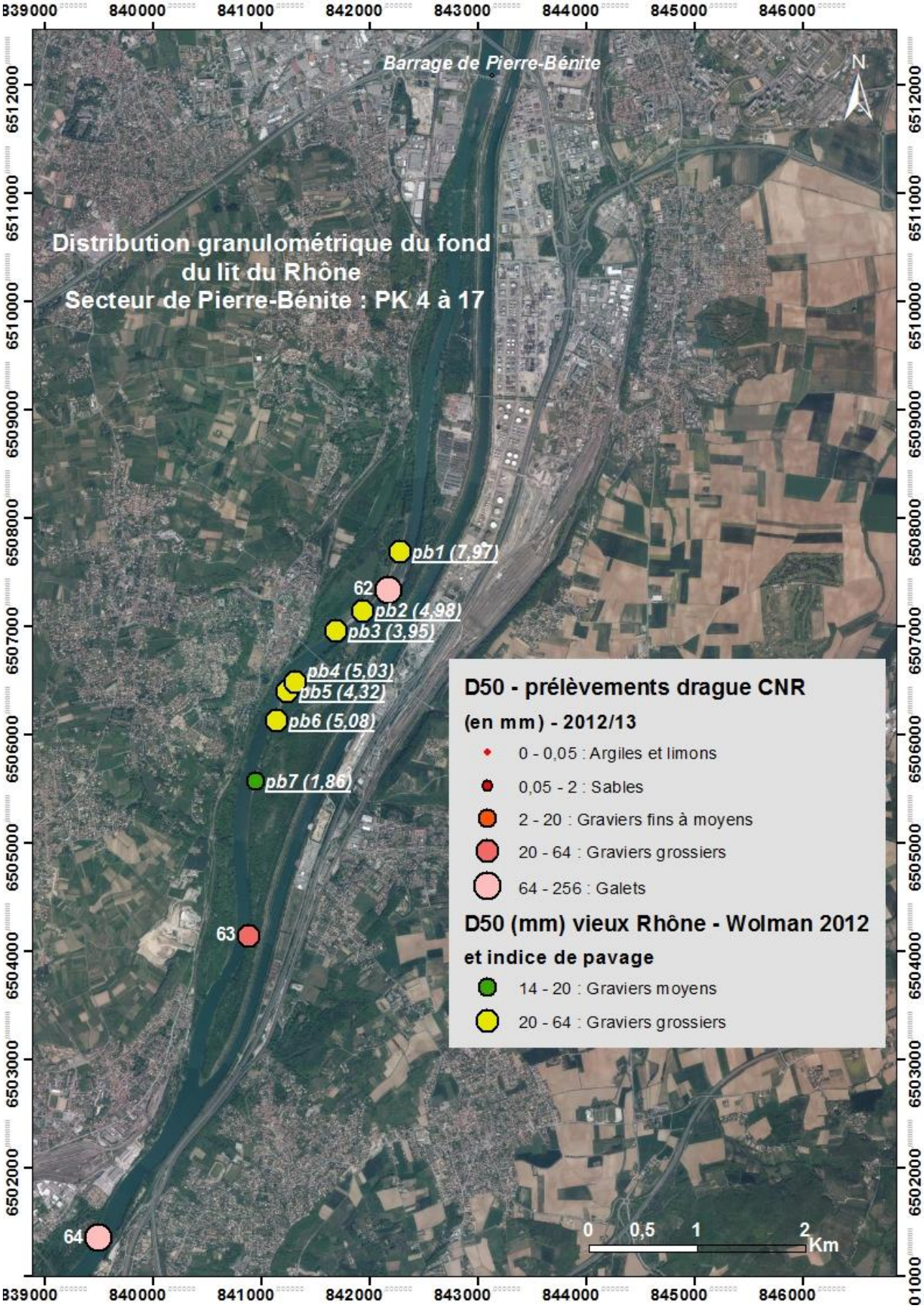

Distribution granulométrique du fond du lit du Rhône
Secteur de Sault-Brénaz et Brégnier-Cordon :
PK -95 à -73
N
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 1,5 3 6 Km
34
33
32
31
30
882000 884000 886000 888000 890000 892000 894000 896000 898000 900000 902000 904000
6524000 6523000 6522000 6521000 6520000 6519000 6518000 6517000 6516000 6515000 6514000 6513000 6512000 6511000 6510000 6509000

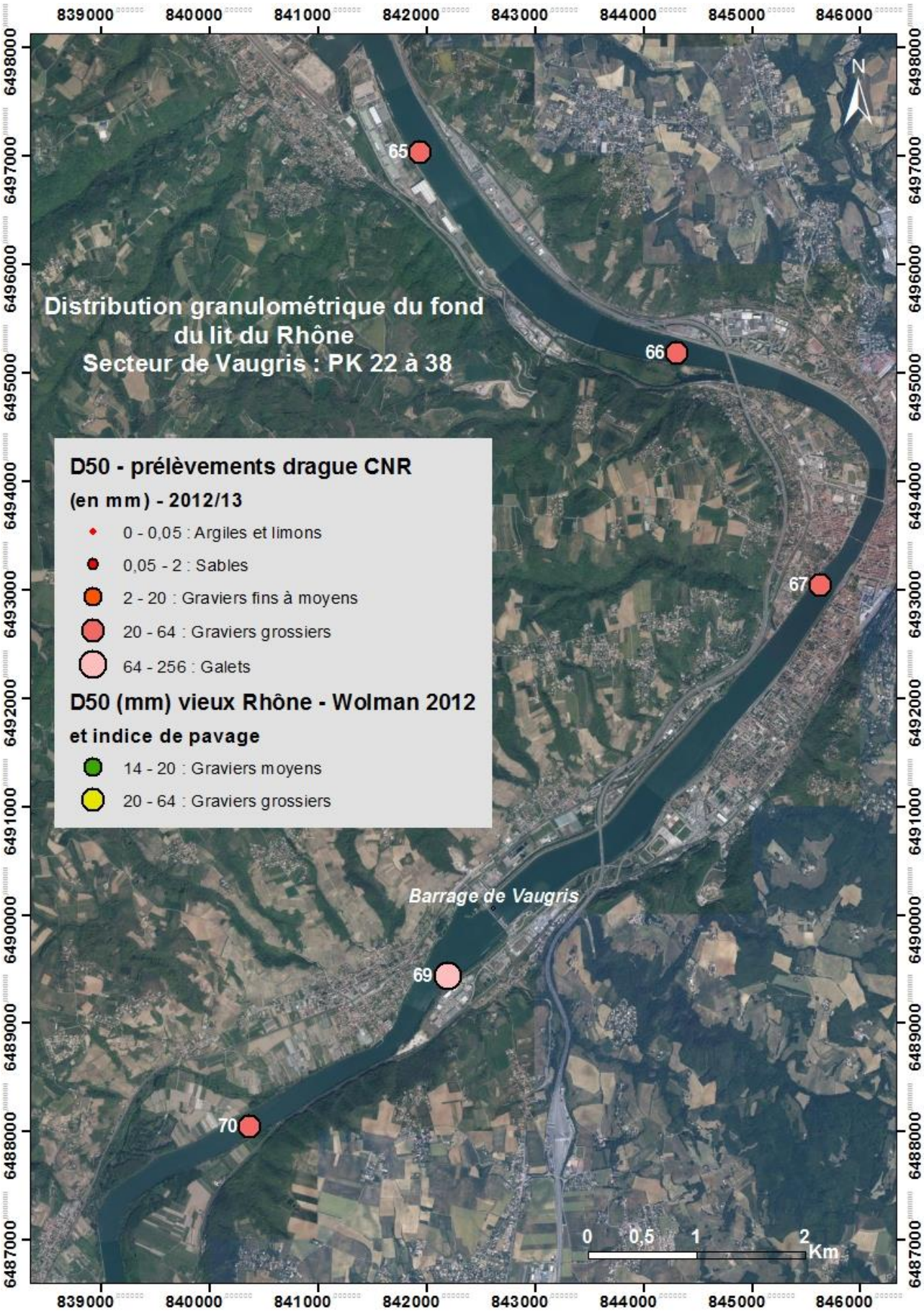

Distribution granulométrique
du fond du lit du Rhône
Secteur de Sault-Brénaz :
PK -71 à -46
N
877500
880000
882500
885000
887500
890000
6532500
6530000
6527500
38
39
40
41
36
sb2 (7,1)
sb1 (0)
Barrage de Villebois
ai1 (0)
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 0,5 1 2
Km

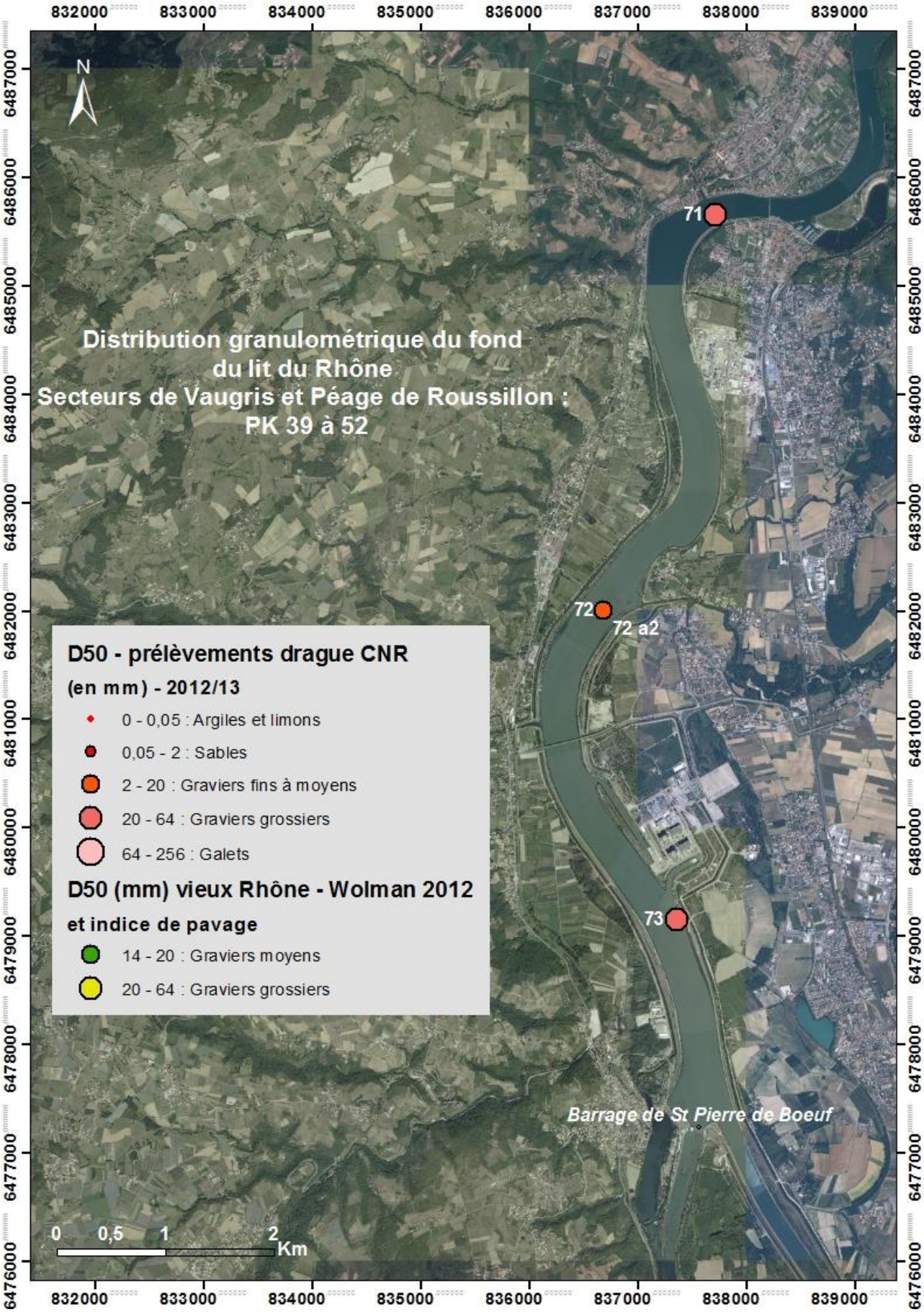

Distribution granulométrique du fond du lit du Rhône
Secteur de l'Ain : PK -41 à -25
N
Barrage de Jons EDF
47
48
46
45
44
43
42
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 0,5 1 2 Km
862500
865000
867500
870000
872500
6527500
6525000
6522500
6520000

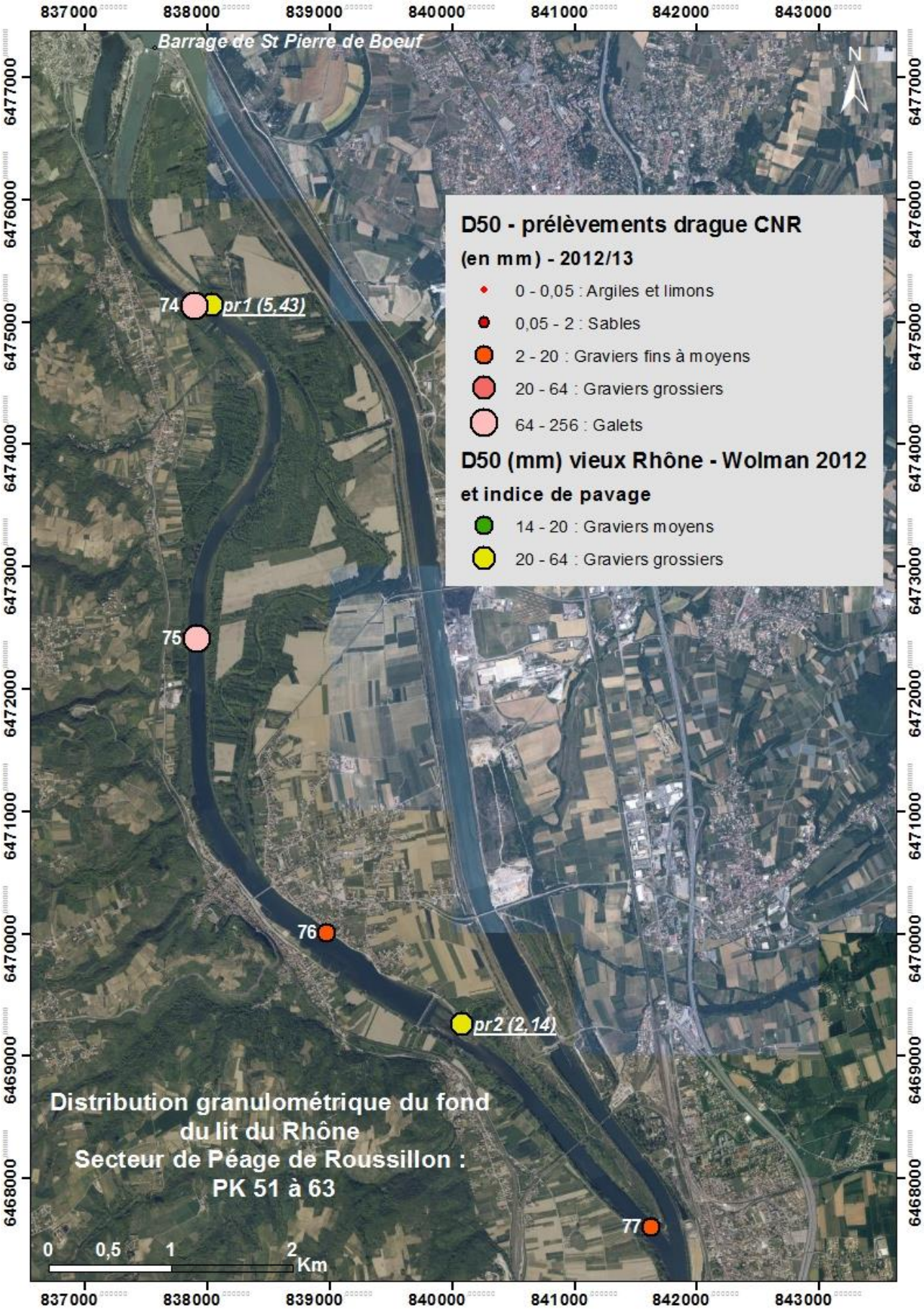

Distribution granulométrique du fond du lit du Rhône
Secteur de Miribel-Jonage : PK -21 à -15
N
852000
853000
854000
855000
856000
6527000
6526000
6525000
6524000
lm6 (0)
lm5 (2,65)
lm4 (2,66)
lm2 (1,68)
lm3 (1,68)
lm1 (2,1)
53
52
51
0 0,25 0,5 1 Km
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers

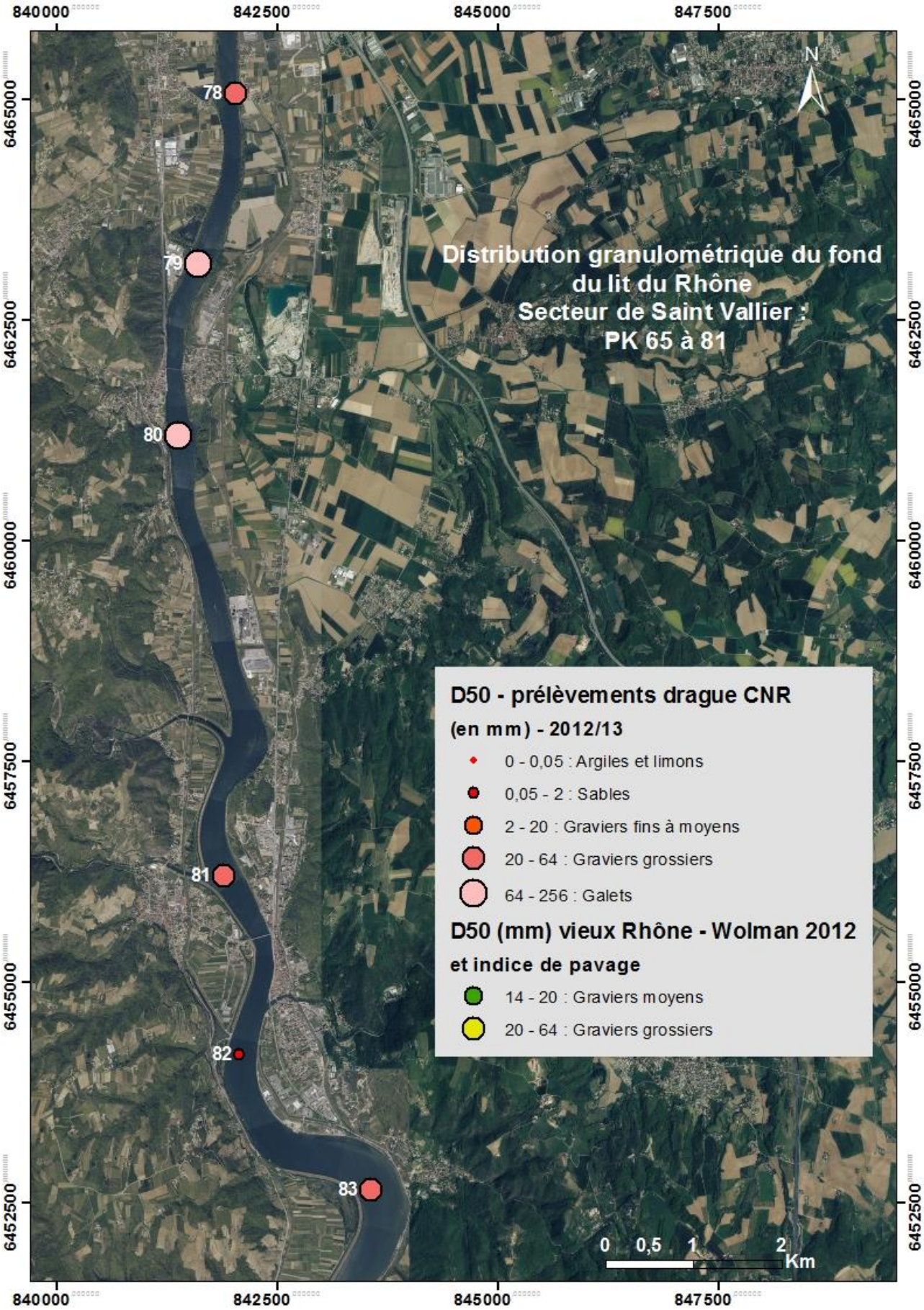

Distribution granulométrique du fond du lit du Rhône
Secteur de Lyon : PK -9 à 4
N
56
57
58
59
60
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 0,5 1 2 Km
839000 840000 841000 842000 843000 844000 845000 846000
6513000 6514000 6515000 6516000 6517000 6518000 6519000 6520000 6521000 6522000 6523000

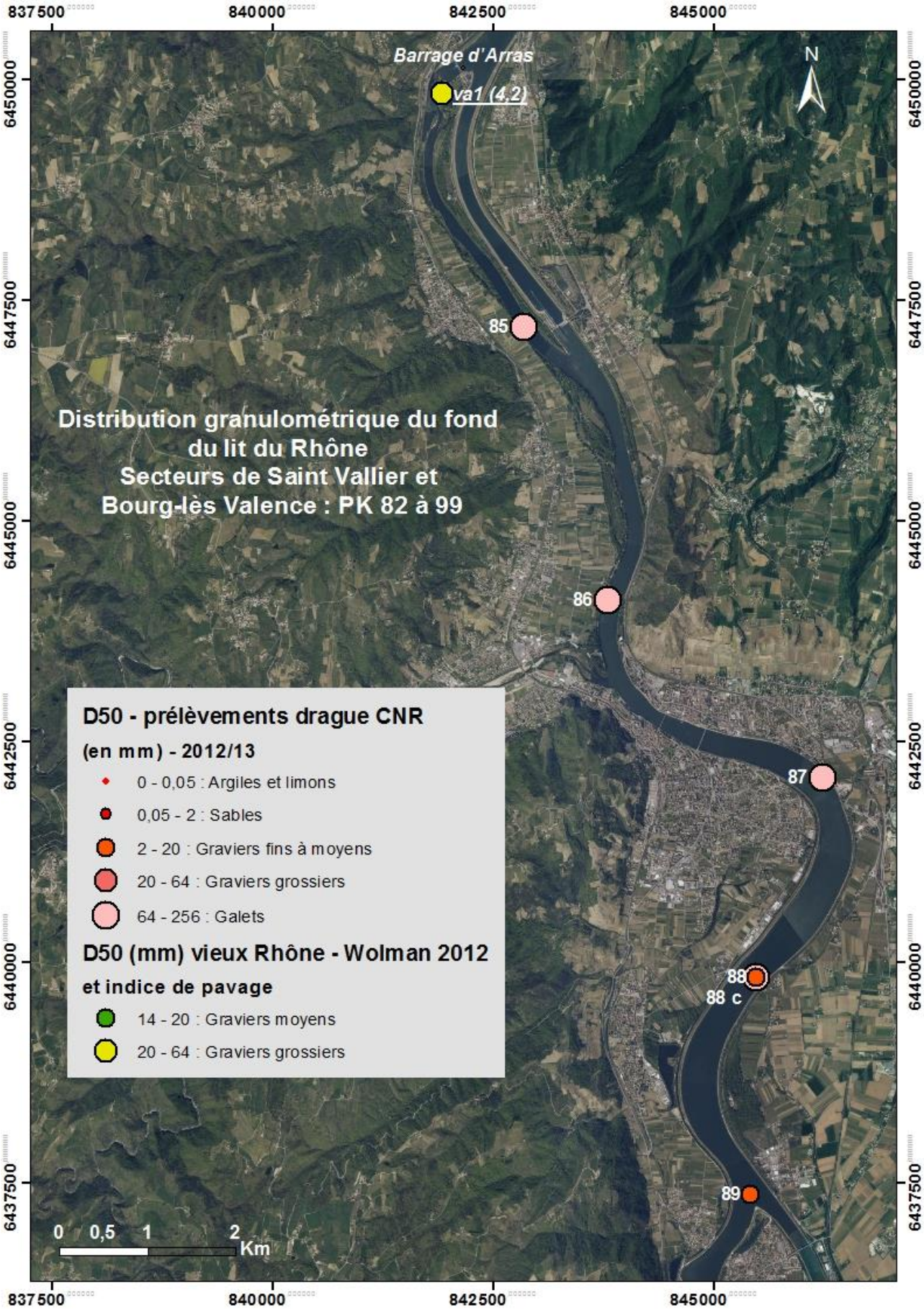

Barrage de Pierre-Bénite
N
Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Pierre-Bénite : PK 4 à 17
pb1 (7,97)
62
pb2 (4,98)
pb3 (3,95)
pb4 (5,03)
pb5 (4,32)
pb6 (5,08)
pb7 (1,86)
63
64
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 0,5 1 2 Km
839000 840000 841000 842000 843000 844000 845000 846000
6512000 6511000 6510000 6509000 6508000 6507000 6506000 6505000 6504000 6503000 6502000 6501000

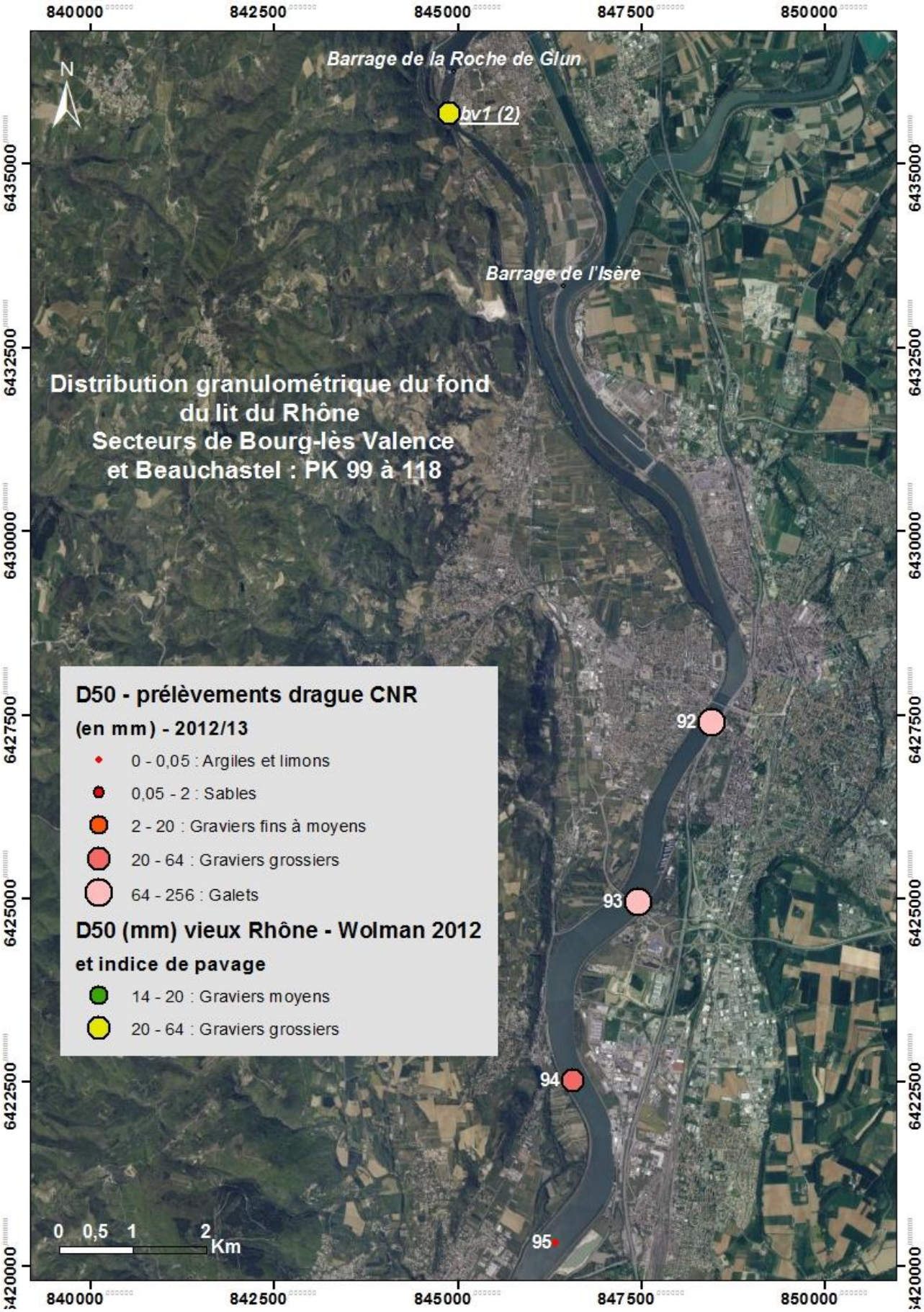

Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Vaugris : PK 22 à 38
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
Barrage de Vaugris
65
66
67
69
70
N
0 0,5 1 2 Km
839000
840000
841000
842000
843000
844000
845000
846000
6498000
6497000
6496000
6495000
6494000
6493000
6492000
6491000
6490000
6489000
6488000
6487000

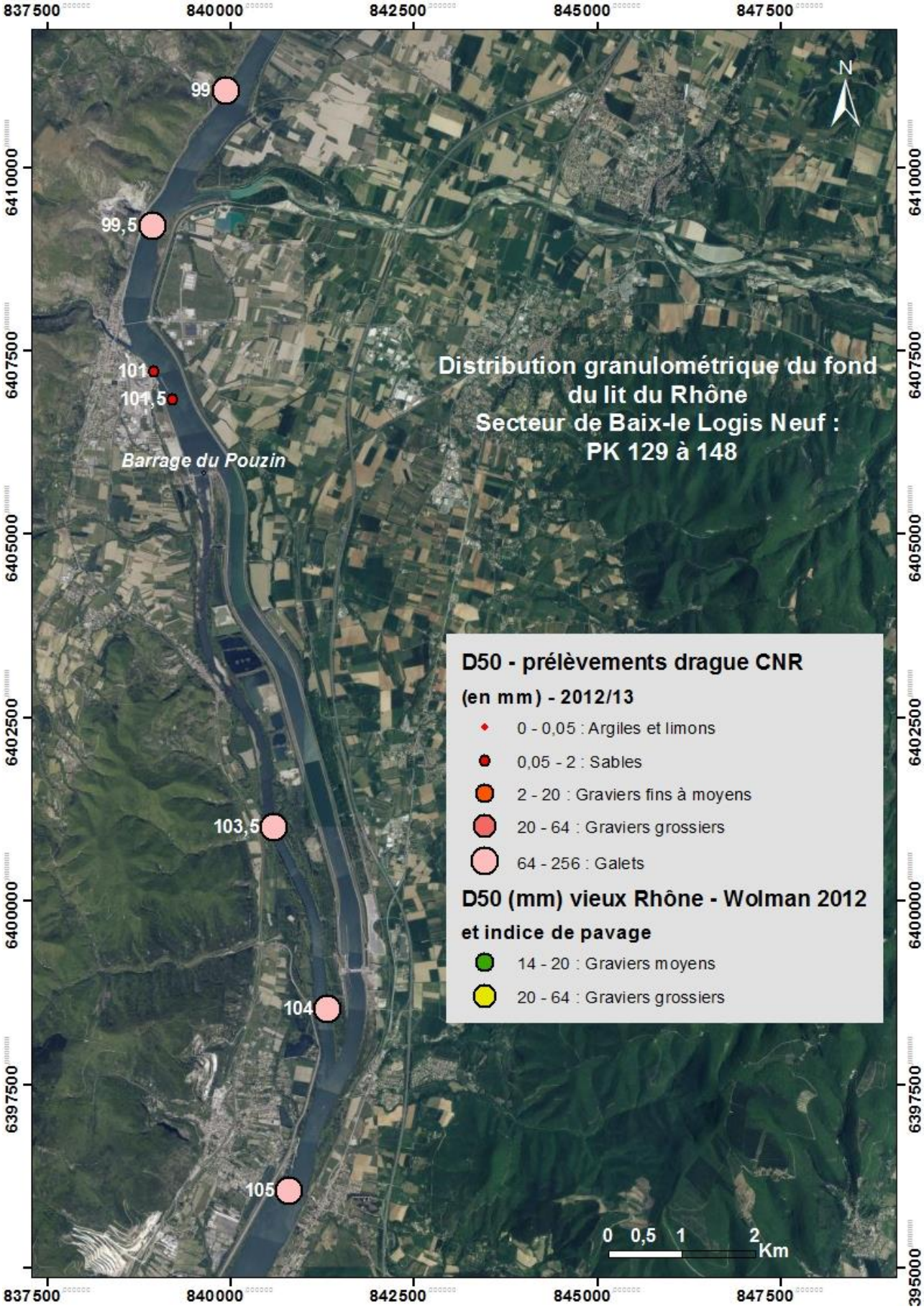

Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteurs de Vaugris et Péage de Roussillon :
PK 39 à 52
N
71
72
72 a2
73
Barrage de St Pierre de Boeuf
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 0,5 1 2 Km
832000 833000 834000 835000 836000 837000 838000 839000
6476000 6477000 6478000 6479000 6480000 6481000 6482000 6483000 6484000 6485000 6486000 6487000

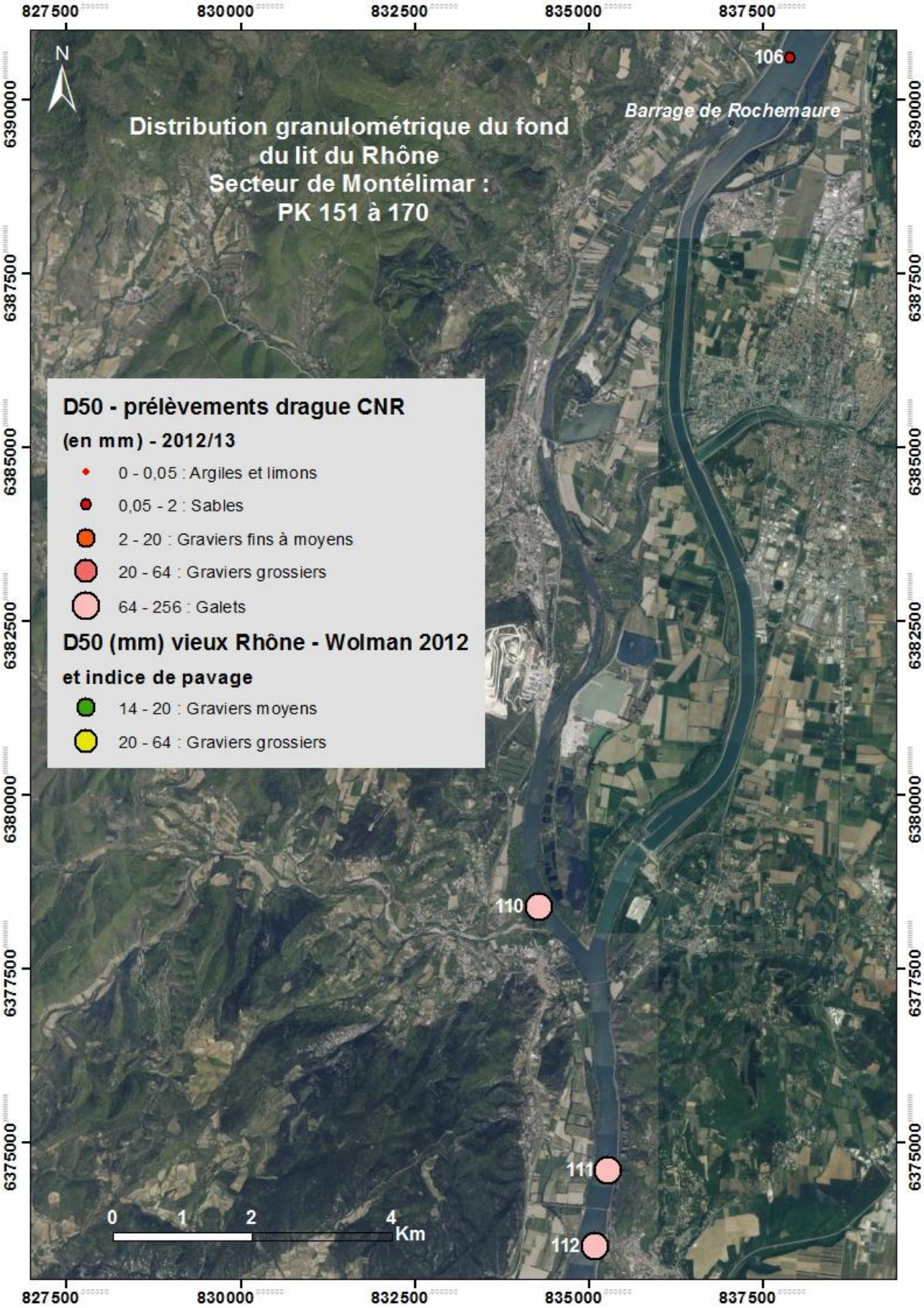

Barrage de St Pierre de Boeuf
N
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
74
pr1 (5,43)
75
76
pr2 (2,14)
77
Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Péage de Roussillon :
PK 51 à 63
0 0,5 1 2
Km
837000
838000
839000
840000
841000
842000
843000
6477000
6476000
6475000
6474000
6473000
6472000
6471000
6470000
6469000
6468000

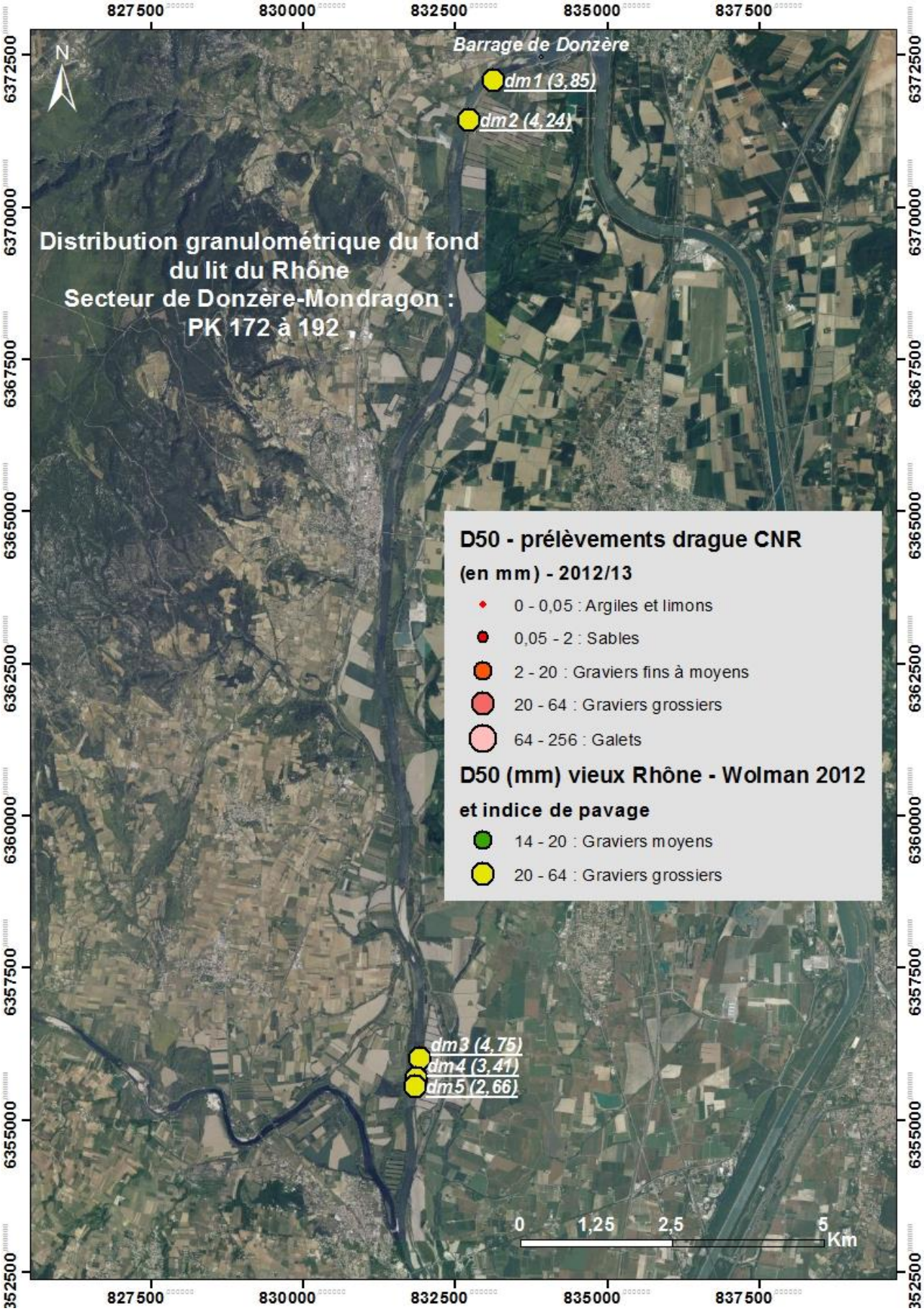

Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Saint Vallier :
PK 65 à 81
N
78
79
80
81
82
83
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 0,5 1 2
Km
840000
842500
845000
847500
6465000
6462500
6460000
6457500
6455000
6452500

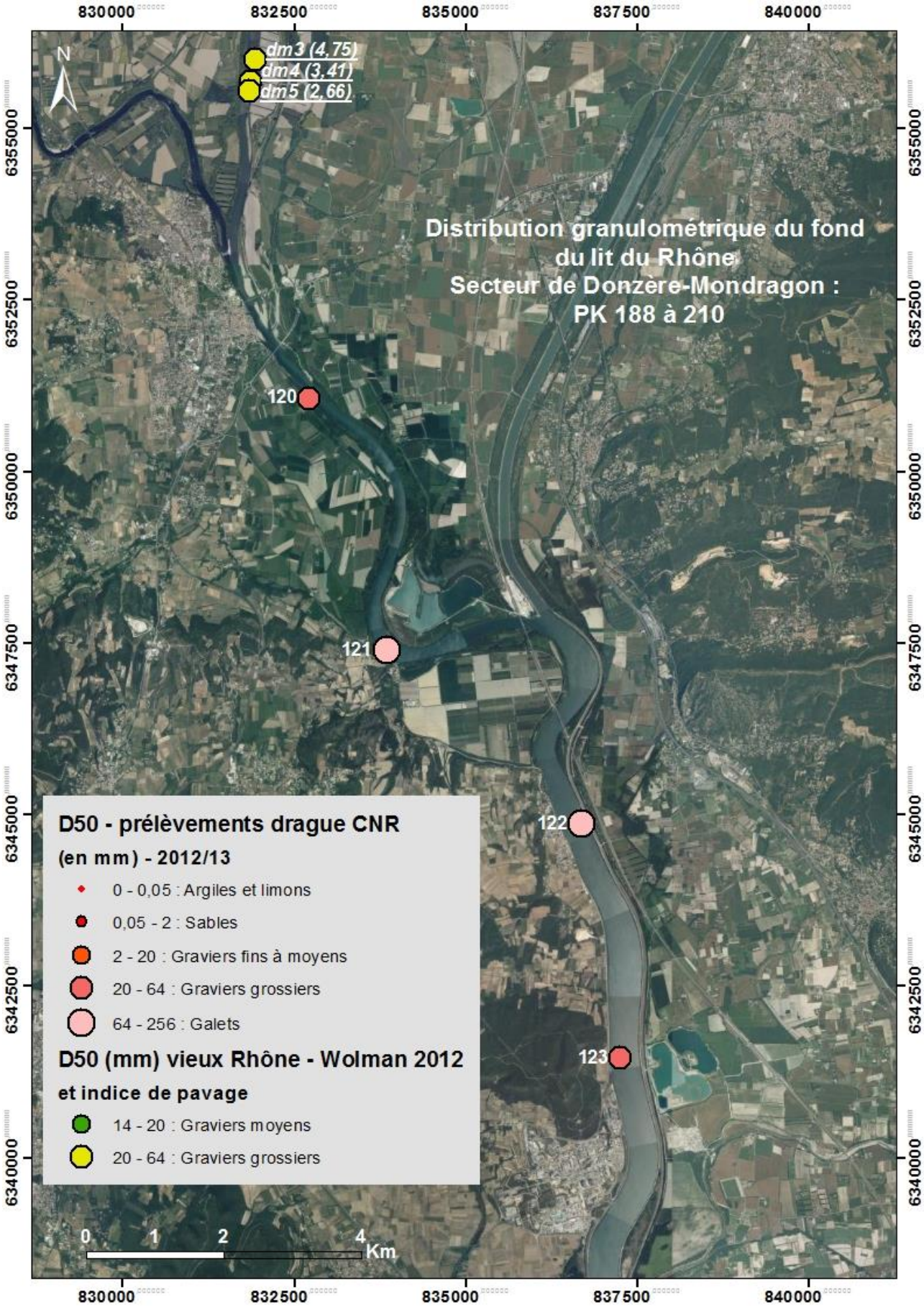

Barrage d'Arras
va1 (4,2)
N
85
86
87
88
88 c
89
Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteurs de Saint Vallier et
Bourg-lès Valence : PK 82 à 99
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 0,5 1 2
Km
837500
840000
842500
845000
6450000
6447500
6445000
6442500
6440000
6437500

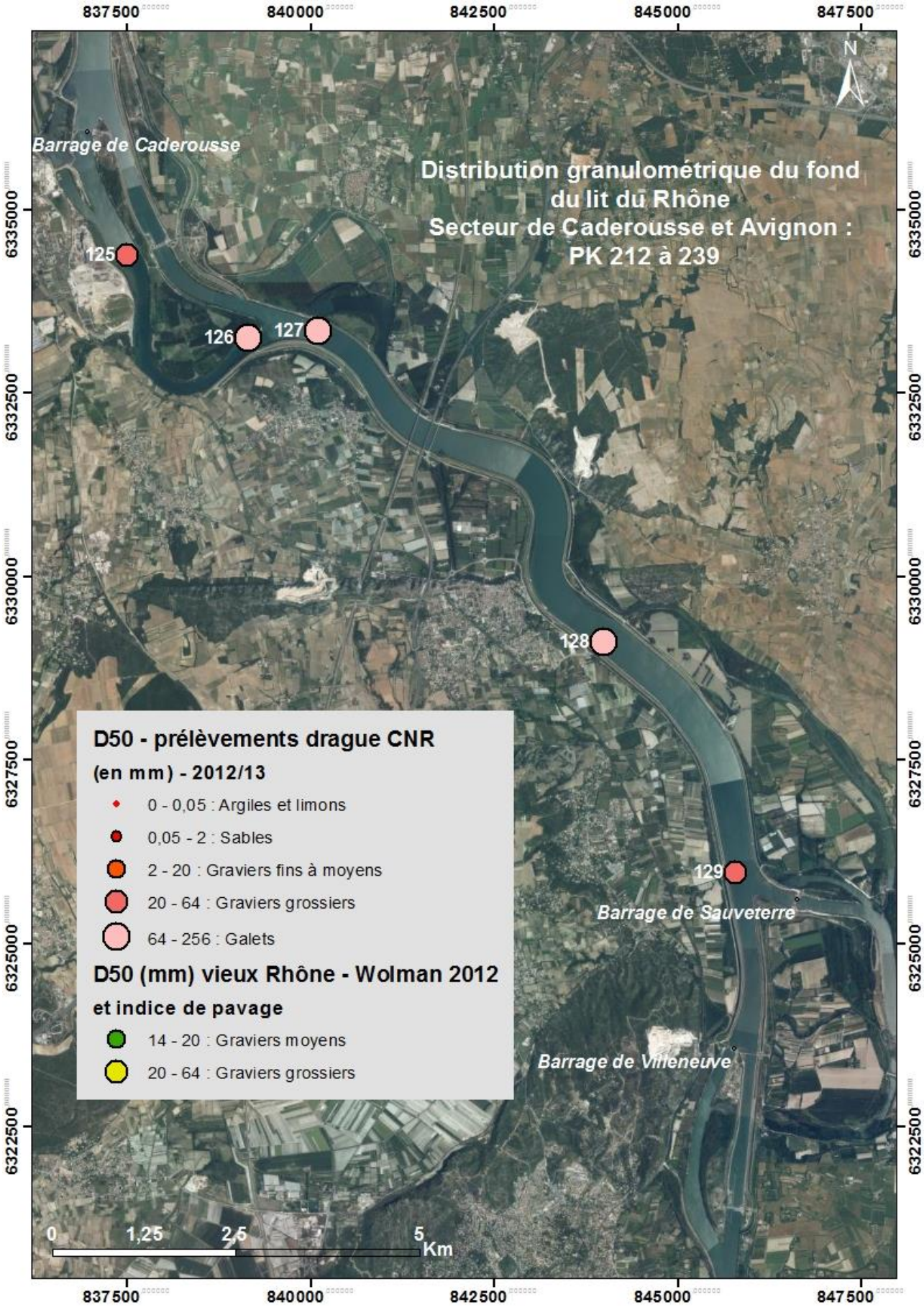

840000
842500
845000
847500
850000
6435000
6432500
6430000
6427500
6425000
6422500
6420000
N
Barrage de la Roche de Glun
bv1 (2)
Barrage de l'Isère
Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteurs de Bourg-lès Valence
et Beauchastel : PK 99 à 118
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
92
93
94
95
0 0,5 1 2 Km

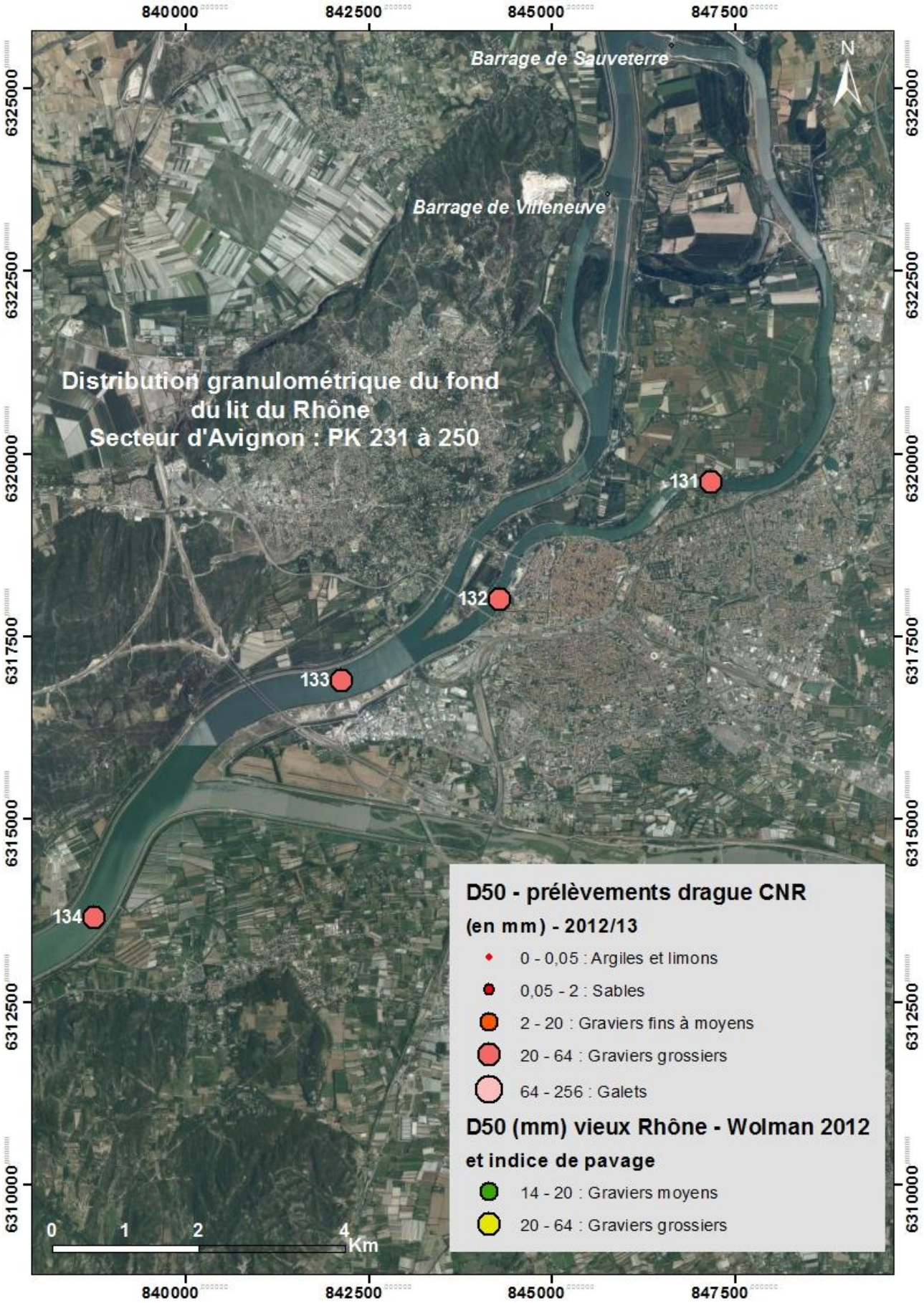

Distribution granulométrique du fond du lit du Rhône
Secteur de Baix-le Logis Neuf :
PK 129 à 148
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
Barrage du Pouzin
99
99,5
101
101,5
103,5
104
105
N
0 0,5 1 2 Km
837500
840000
842500
845000
847500
6410000
6407500
6405000
6402500
6400000
6397500
6395000

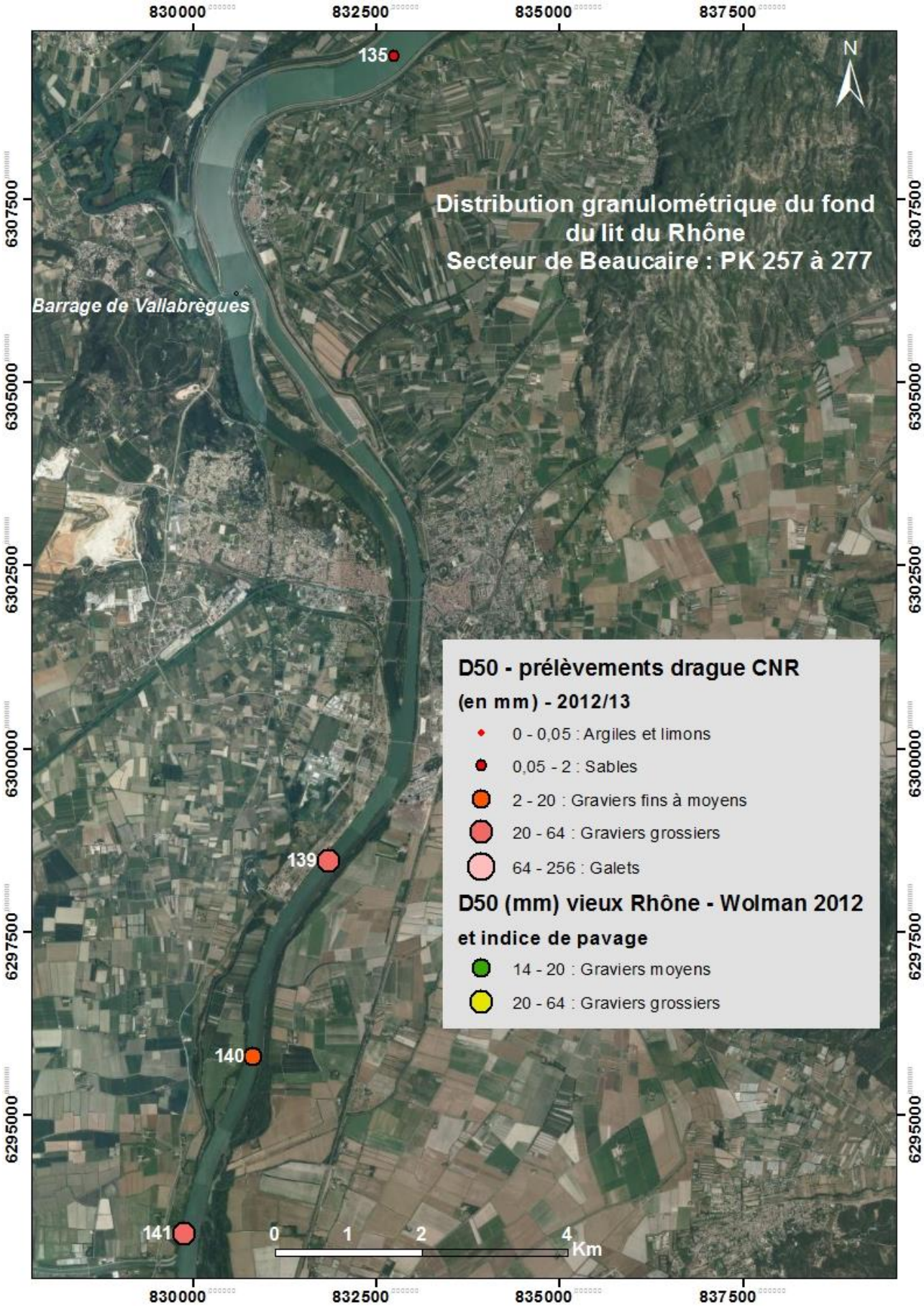

Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Montélimar :
PK 151 à 170
N
Barrage de Rochemaure
106
110
111
112
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 1 2 4 Km
827500
830000
832500
835000
837500
6390000
6387500
6385000
6382500
6380000
6377500
6375000

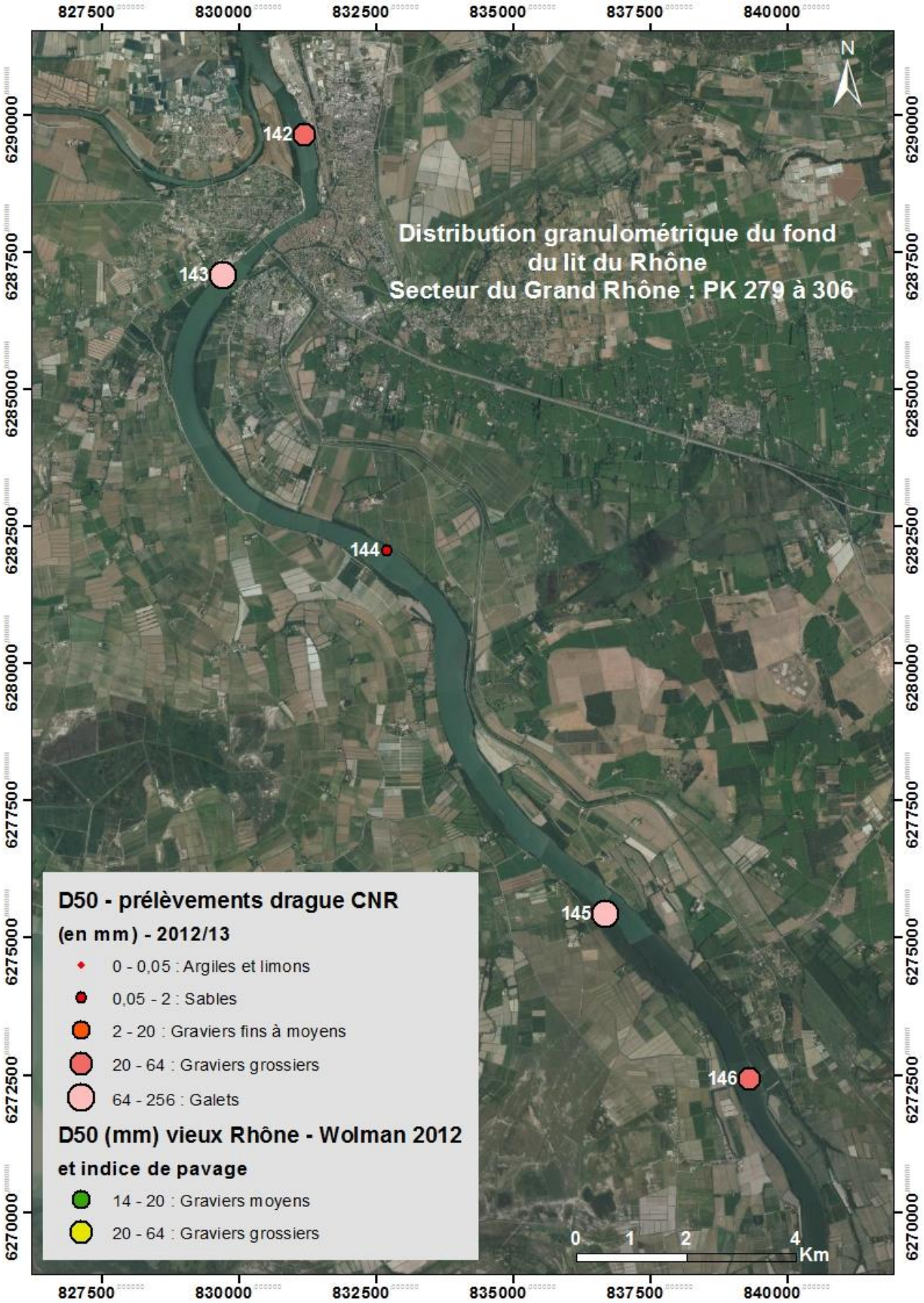

Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Donzère-Mondragon :
PK 172 à 192
Barrage de Donzère
dm1 (3,85)
dm2 (4,24)
dm3 (4,75)
dm4 (3,41)
dm5 (2,66)
N
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0
1,25
2,5
5
Km
827500
830000
832500
835000
837500
6372500
6370000
6367500
6365000
6362500
6360000
6357500
6355000
352500

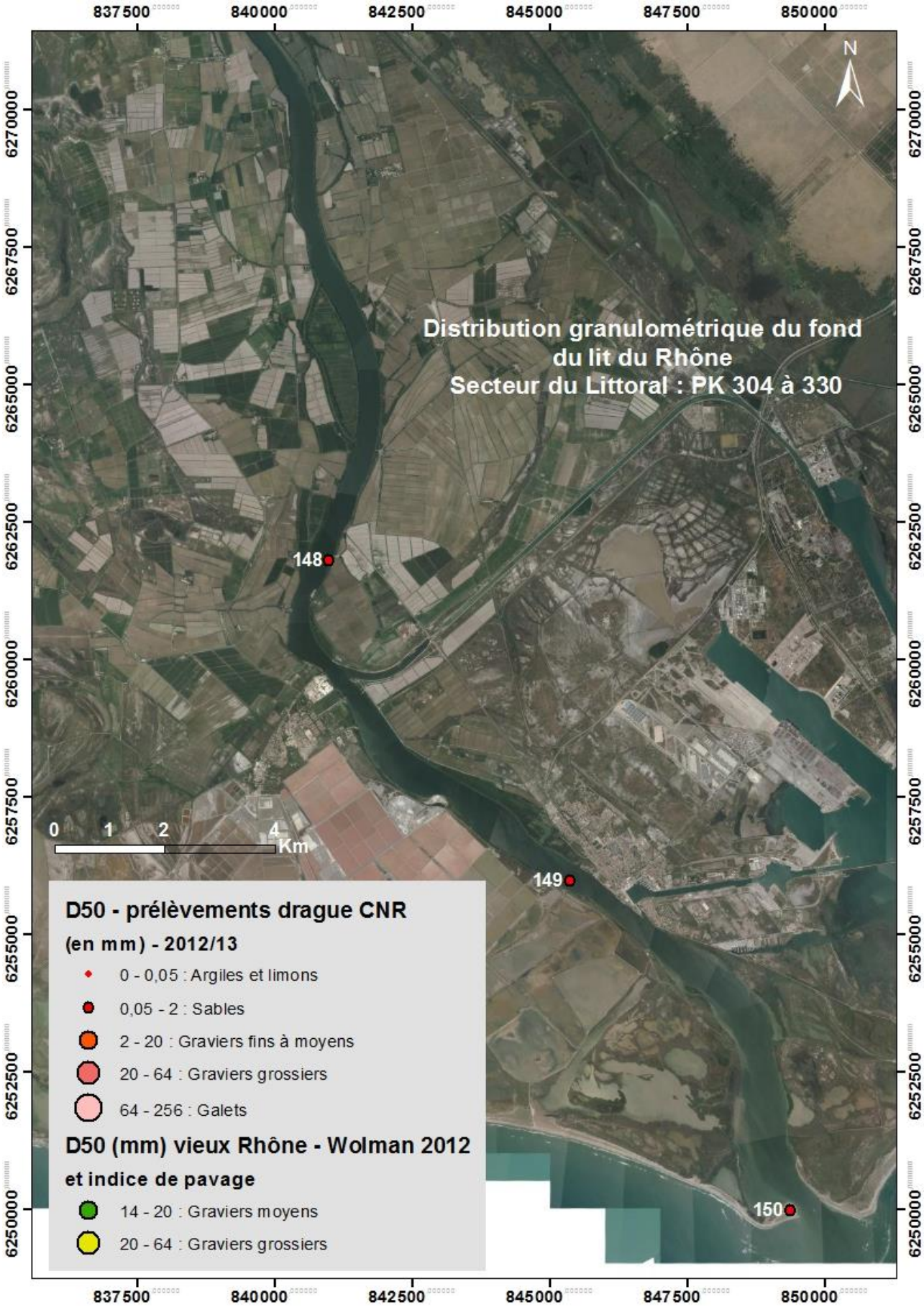

Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Donzère-Mondragon :
PK 188 à 210
N
dm3 (4,75)
dm4 (3,41)
dm5 (2,66)
120
121
122
123
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 1 2 4 Km
830000
832500
835000
837500
840000
6355000
6352500
6350000
6347500
6345000
6342500
6340000


Distribution granulométrique du fond du lit du Rhône
Secteur de Caderousse et Avignon : PK 212 à 239
Barrage de Caderousse
Barrage de Sauveterre
Barrage de Villeneuve
125
126
127
128
129
N
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0
1,25
2,5
5
Km
837500
840000
842500
845000
847500
6335000
6332500
6330000
6327500
6325000
6322500


Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur d'Avignon : PK 231 à 250
Barrage de Sauveterre
Barrage de Villeneuve
N
131
132
133
134
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 1 2 4 Km
840000
842500
845000
847500
6325000
6322500
6320000
6317500
6315000
6312500
6310000


Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur de Beaucaire : PK 257 à 277
Barrage de Vallabrègues
N
135
139
140
141
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 1 2 4 Km
830000
832500
835000
837500
6307500
6305000
6302500
6300000
6297500
6295000


Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur du Grand Rhône : PK 279 à 306
N
142
143
144
145
146
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
0 1 2 4 Km
827500 830000 832500 835000 837500 840000
6290000 6287500 6285000 6282500 6280000 6277500 6275000 6272500 6270000

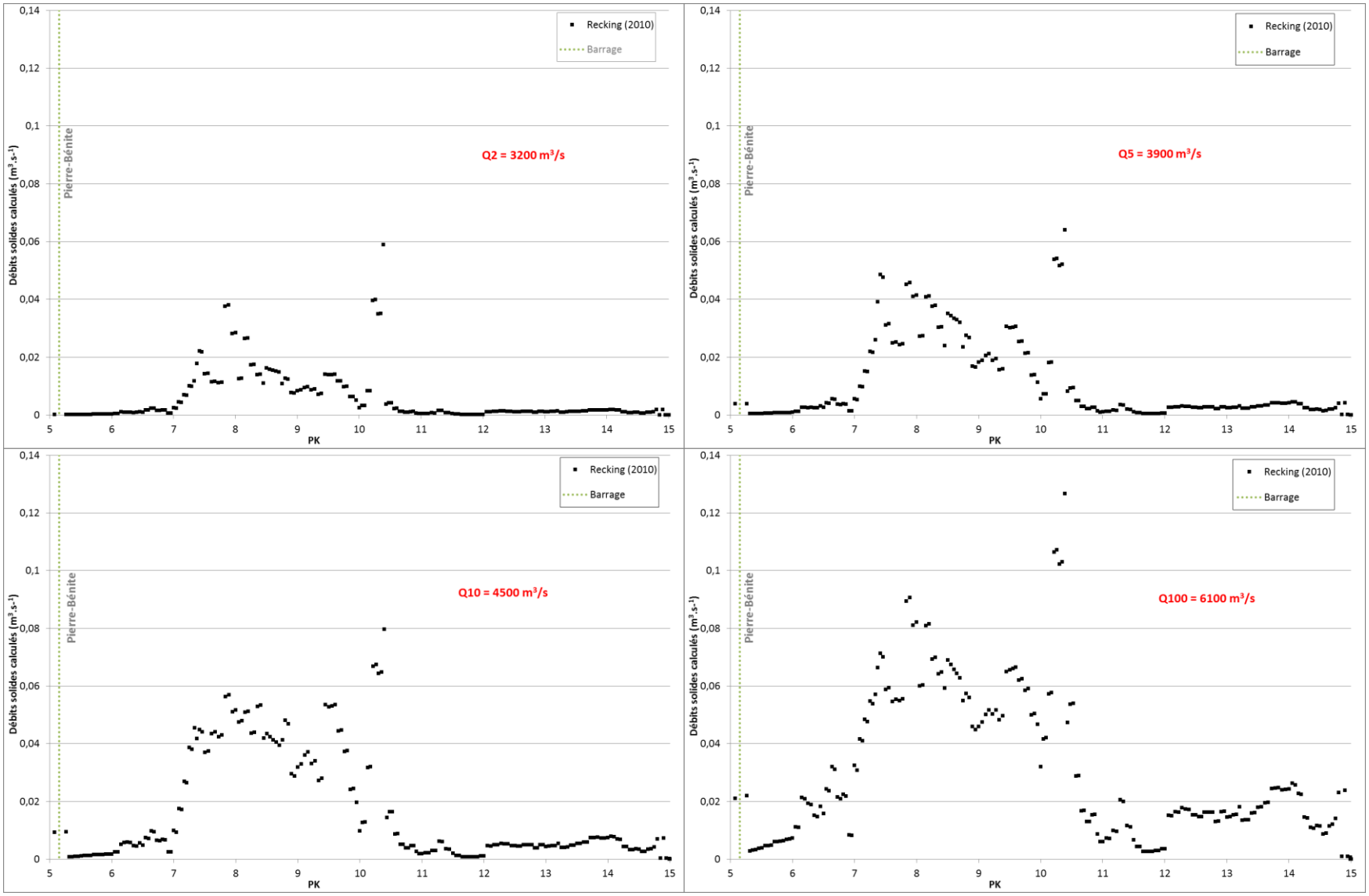

Distribution granulométrique du fond
du lit du Rhône
Secteur du Littoral : PK 304 à 330
N
837500
840000
842500
845000
847500
850000
6270000
6267500
6265000
6262500
6260000
6257500
6255000
6252500
6250000
148
149
150
0 1 2 4 Km
D50 - prélèvements drague CNR
(en mm) - 2012/13
0 - 0,05 : Argiles et limons
0,05 - 2 : Sables
2 - 20 : Graviers fins à moyens
20 - 64 : Graviers grossiers
64 - 256 : Galets
D50 (mm) vieux Rhône - Wolman 2012
et indice de pavage
14 - 20 : Graviers moyens
20 - 64 : Graviers grossiers

Annexe 28 : Capacité de transport solide par charriage calculée en volume annuel sur tous les biefs du Rhône avant (état naturel) et après (état actuel) aménagement (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4)

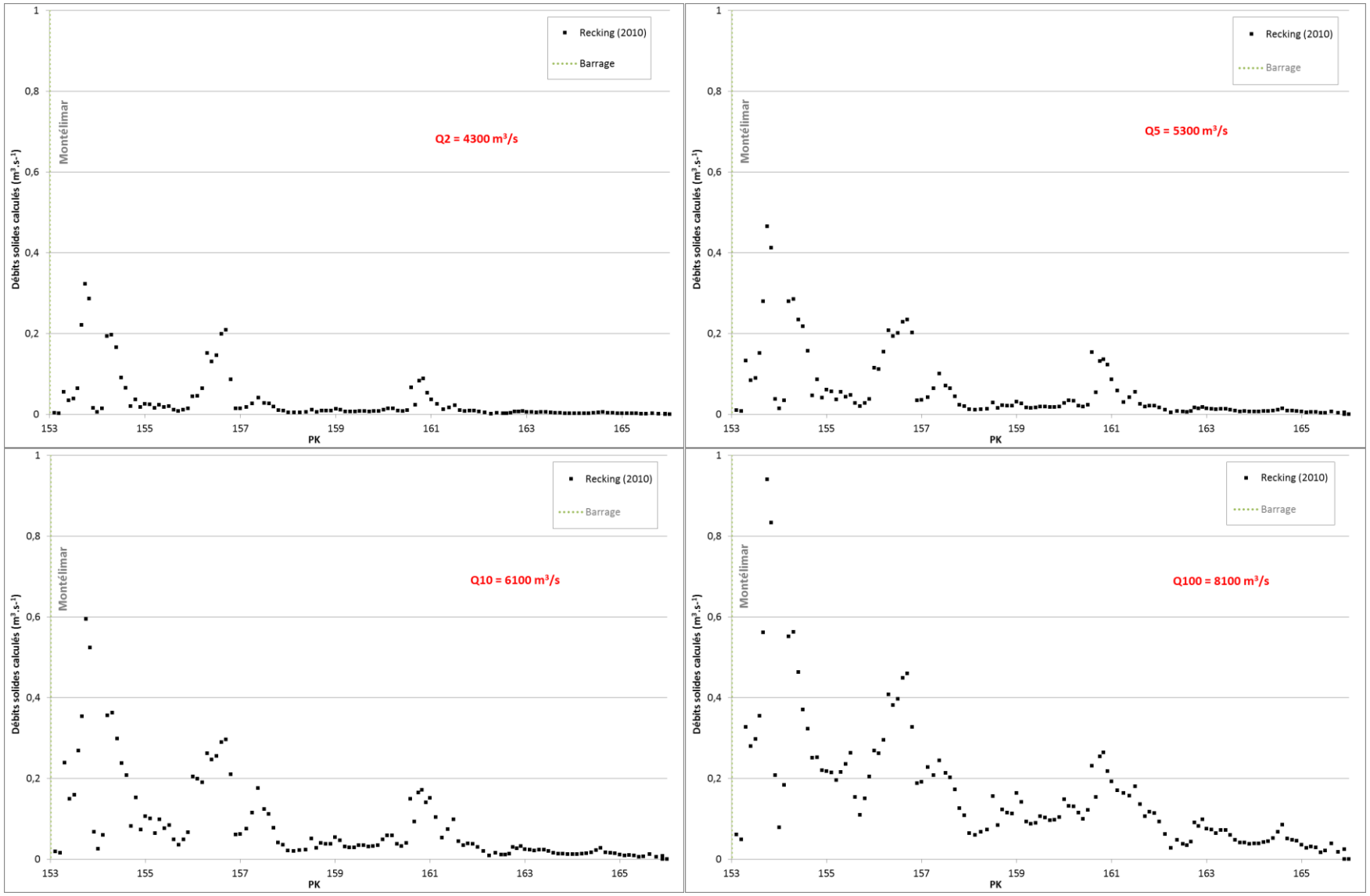
								Capacité de transport solide par charriage avant et après aménagement
Aménagement	Situation	PK	diamètre moyen des alluvions (m)		pente naturelle ‰	capacité de transit annuel par charriage (m^3/an)		
			dans la masse	en surface		naturel	actuel	rapport
GENISSIAT	Amont	-187	55	77	1.5	88632	88632	100%
	Retenue	-178.5	55	77	1.5	88632	0	0%
SEYSSEL	Amont	-161.5	55	77	1.5	88632	88632	100%
	Retenue	-159	45	63	1.2	104616	627	1%
	Retenue	-154	45	63	1.1	60024	117	0%
CHAUTAGNE	Retenue	-148.5	40	56	1.13	190660	0	0%
	Rcc	-141	40	56	1.1	164170	1810	1%
BELLEY	Retenue	-135	35	49	0.91	120507	1632	1%
	RCC	-127	30	42	0.8	143688	1997	1%
	RCC	-121	30	42	0.69	63128	797	1%
	RCC	-117	30	42	0.69	63128	1276	2%
BREGNIER-CORDON	Retenue	-112	30	42	0.71	108600	1920	2%
	Retenue	-105.5	27	37.8	0.62	95388	0	0%
	RCC	-101	27	37.8	0.62	95388	579	1%
	RCC	-97	27	37.8	0.62	95388	726	1%
	RCC	-93	27	37.8	0.62	95388	65	0%
SAULT-BRENAZ	Retenue	-85	15	21	0.2	5802	472	8%
	Retenue	-76.5	15	21	0.15	441	8	2%
	Retenue	-72	15	21	0.42	138931	2662	2%
	Retenue	-67	15	21	0.42	138931	13	0%
	RCC	-63	15	21	1.2	1044558	6757	1%
	RCC	-61.5	15	21	0.47	176753	421	0%
MIRIBEL-JONAGE	Retenue		40	56	0.8	137284	65405	48%
PIERRE BENITE	Retenue	-8.5	40	56	0.8	139579	28	0%
	Retenue	-5.5	40	56	0.8	139579	72469	52%
	Retenue	-2	35	49	0.5	19289	55	0%
	Retenue	2.5	37	51.8	0.4	30814	0	0%
	RCC	9	40	56	0.45	37559	25273	67%
VAUGRIS	Retenue	24	40	56	0.44	33593	1672	5%
	Aval	38.5	40	56	0.44	33593	1842	5%
PEAGE DE ROUSSILLON	Retenue	39	40	56	0.47	67483	2860	4%
	Retenue	42	40	56	0.47	67483	0	0%
	RCC	51	40	56	0.5	98383	4926	5%
SAINT VALLIER	Retenue	69.5	45	63	0.48	29159	1822	6%
	Retenue	79	45	63	0.58	109379	0	0%
	RCC	86.5	45	63	0.58	109379	2149	2%

								Capacité de transport solide par charriage avant et après aménagement
Aménagement	Situation	PK	diamètre moyen des alluvions (m)		pente naturelle ‰	capacité de transit annuel par charriage (m³/an)		
			dans la masse	en surface		naturel	actuel	rapport
BOURG-LES-VALENCE	Retenue	91	50	70	0.65	114540	1613	1%
	Retenue	96	50	70	0.65	114540	327	0%
	RCC	101.5	50	70	0.65	114540	138	0%
	RCC	106	50	70	0.65	114540	262	0%
BEAUCHASTEL	Retenue	109.5	55	77	0.71	196581	7437	4%
	Retenue	116.5	55	77	0.71	196581	1147	1%
	RCC	123	55	77	0.71	196581	1874	1%
BAIX-LE LOGIS NEUF	Retenue	130.5	55	77	0.73	261026	13357	5%
	RCC	143	55	77	0.82	493643	5368	1%
MONTELIMAR	Retenue	146	55	77	0.75	336738	38690	11%
	Retenue	150.5	55	77	0.75	336738	122	0%
	Rcc	157	55	77	0.8	476186	20558	4%
	Rcc	163.5	55	77	0.8	476186	3070	1%
DONZERE-MONDRAGON	Retenue	168	55	77	0.8	476186	43417	9%
	Retenue	170.5	55	77	0.8	476186	480	0%
	Rcc	182	50	63	0.66	292105	8790	3%
	Rcc	196	50	63	0.7	398204	4766	1%
CADEROUSSE	Retenue	203.5	40	56	0.54	368584	374	0%
	Retenue	210	40	56	0.6	552448	0	0%
	Rcc	215.5	40	56	0.6	552448	4441	1%
AVIGNON	Retenue	226	35	49	0.46	346867	2	0%
VALLABREGUES	amont durance	241.5	35	49	0.37	135024	0	0%
	Retenue	252	35	49	0.37	139524	257	0%
	RCC	266	35	49	0.3	40241	4124	10%
PALIER D'ARLES	amont petit Rhone	274	20	28	0.22	196872	45851	23%

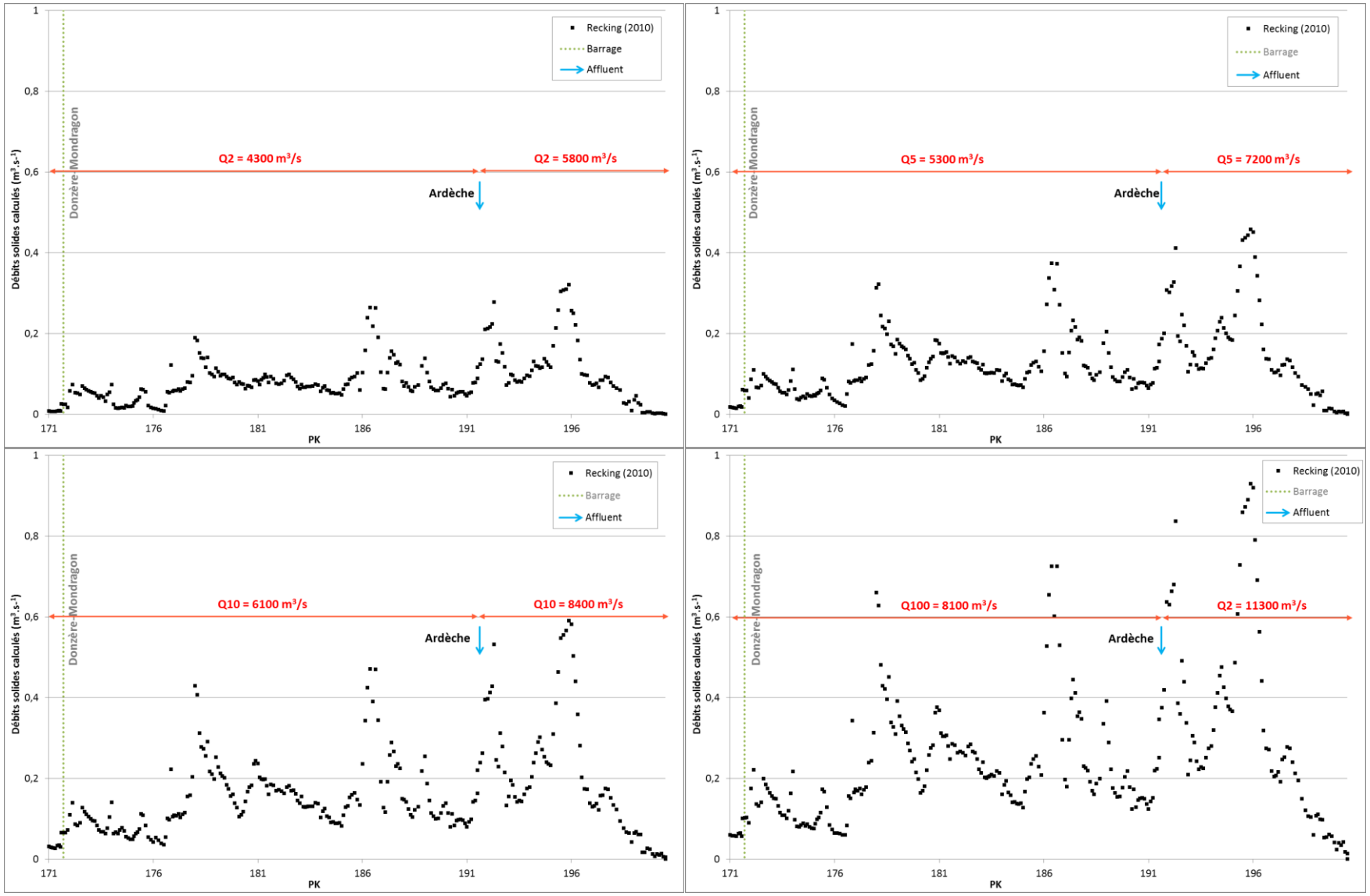
Annexe 29 : Débits solides calculés à partir de la formule de Recking (2010) dans le vieux Rhône de Pierre-Bénite à l'état naturel à Q2, Q5, Q10 et Q100



Annexe 30 : Débits solides calculés à partir de la formule de Recking (2010) dans le vieux Rhône de Montélimar à l'état naturel à Q2, Q5, Q10 et Q100



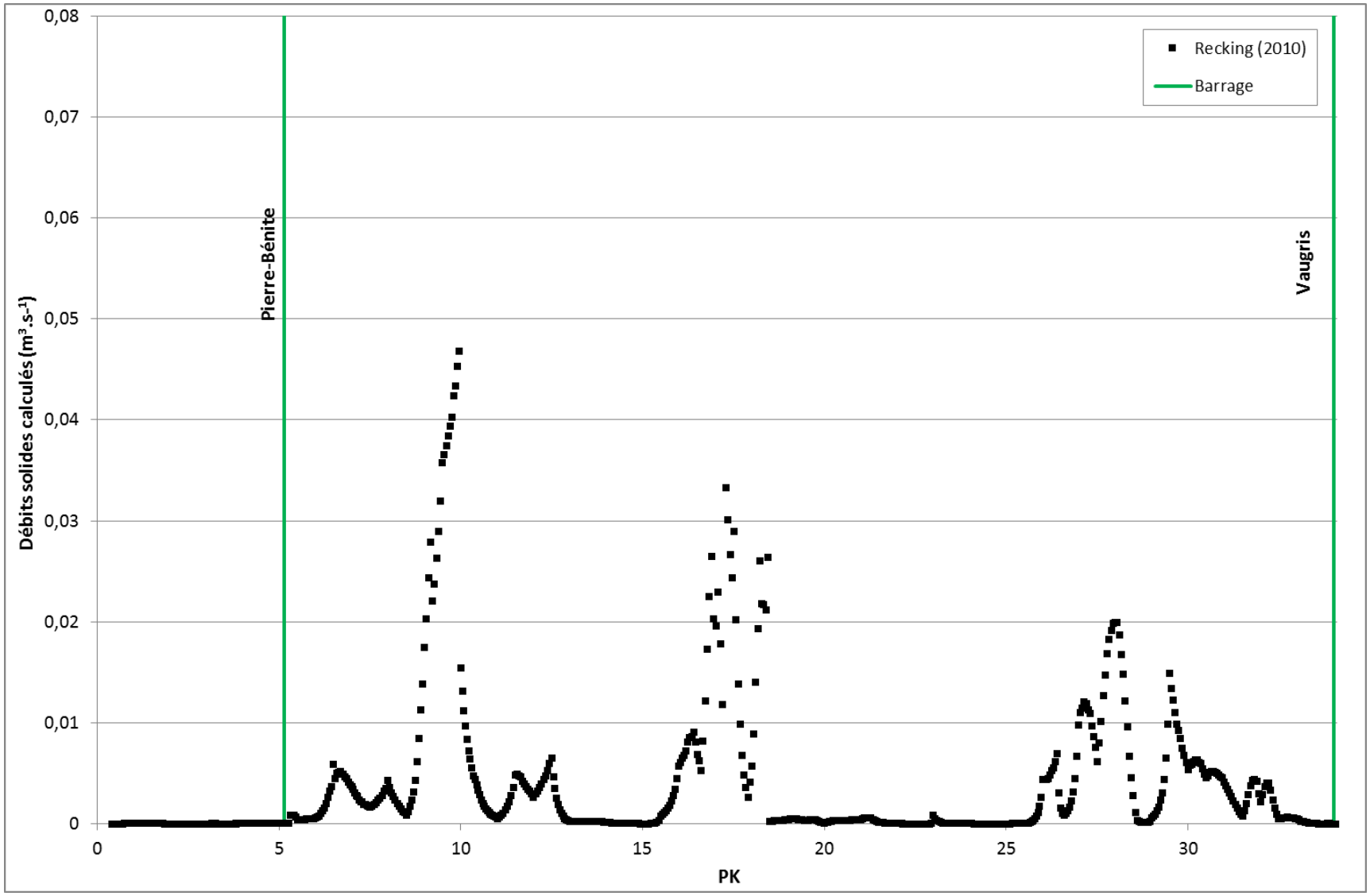
Annexe 31 : Débits solides calculés à partir de la formule de Recking (2010) dans le vieux Rhône de Donzère-Mondragon à l'état naturel à Q2, Q5, Q10 et Q100



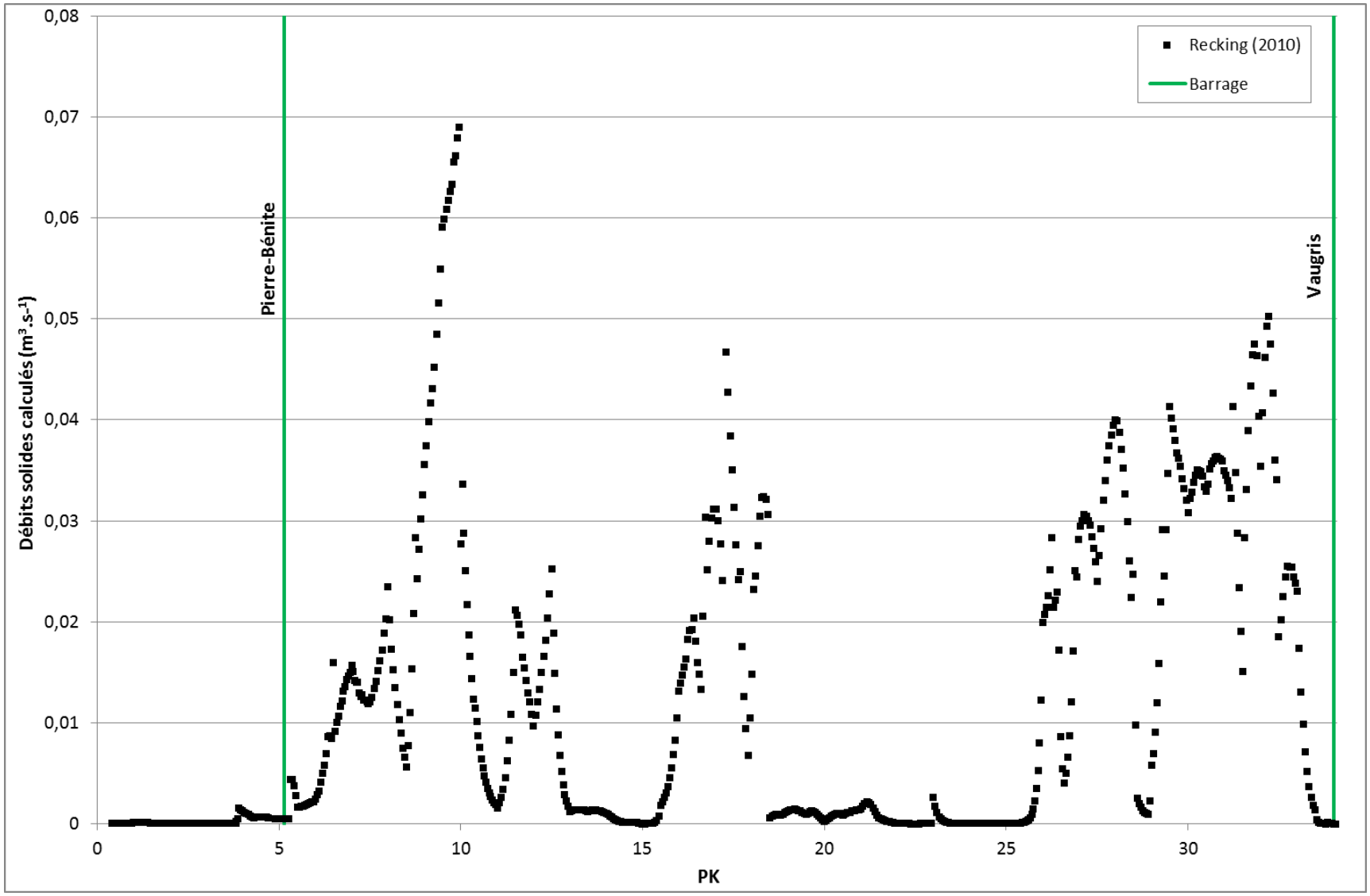
Annexe 32 : Estimation des statistiques granulométriques de réinjection établies à partir de la moyenne des données réelles du Rhône. Les données retenues (encadrées en rouge) sont celles possédant un D_{50} (en bleu) de 35 mm et de 10 mm

D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)
0,4	10	18,7	21,4
8,5	15	24,1	28,2
11,6	20	33,8	39,2
14,5	25	41,3	46,6
13,6	30	51,1	56,3
15,0	35	61,2	69,9
17,5	40	64,0	72,7
19,9	45	69,5	77,4

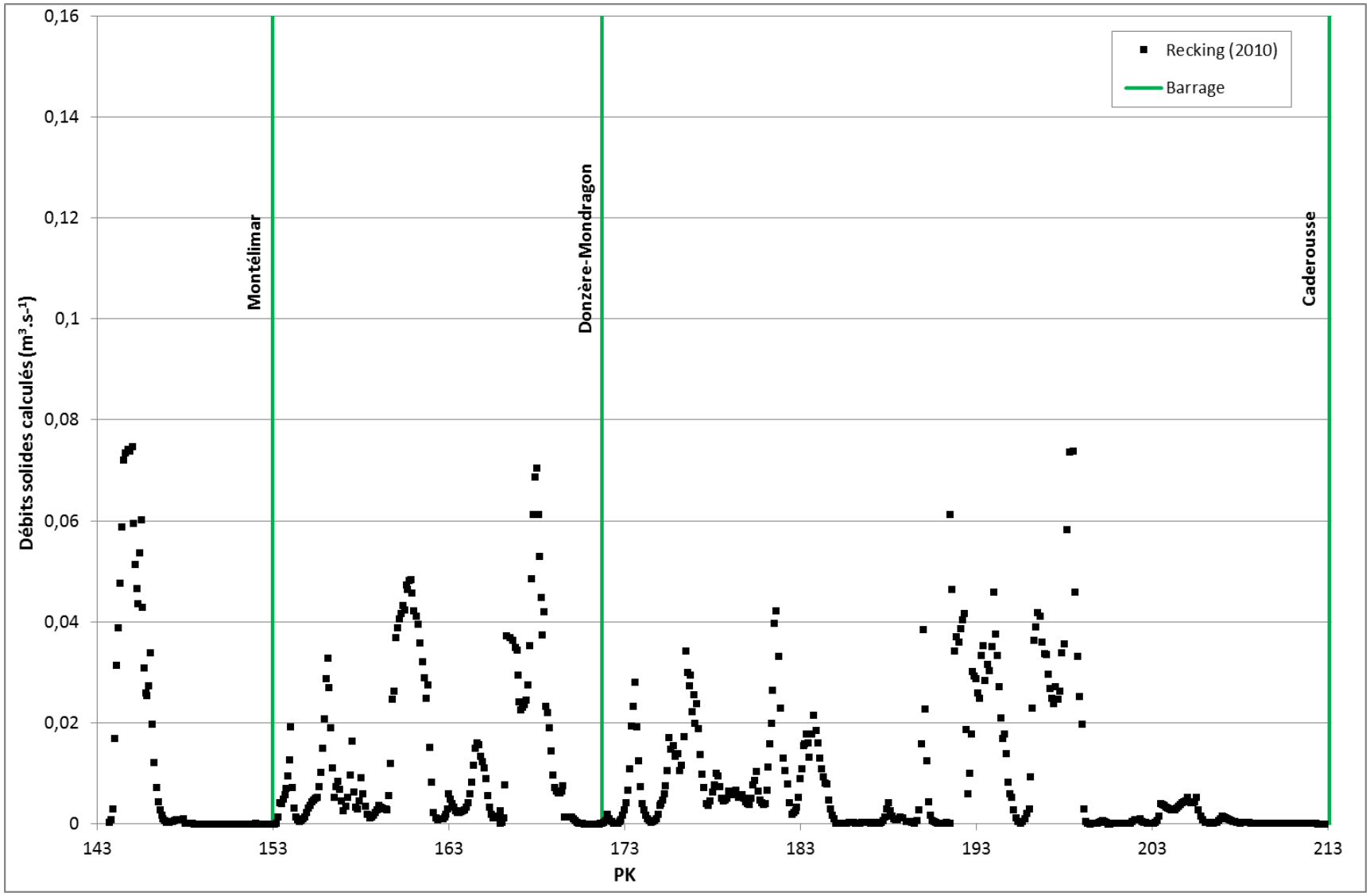
Annexe 33 : Débit solide calculé dans le secteur étendu de Pierre-Bénite à Q2 – simulation pour un D_{50} de 35 mm (Annexe 32)



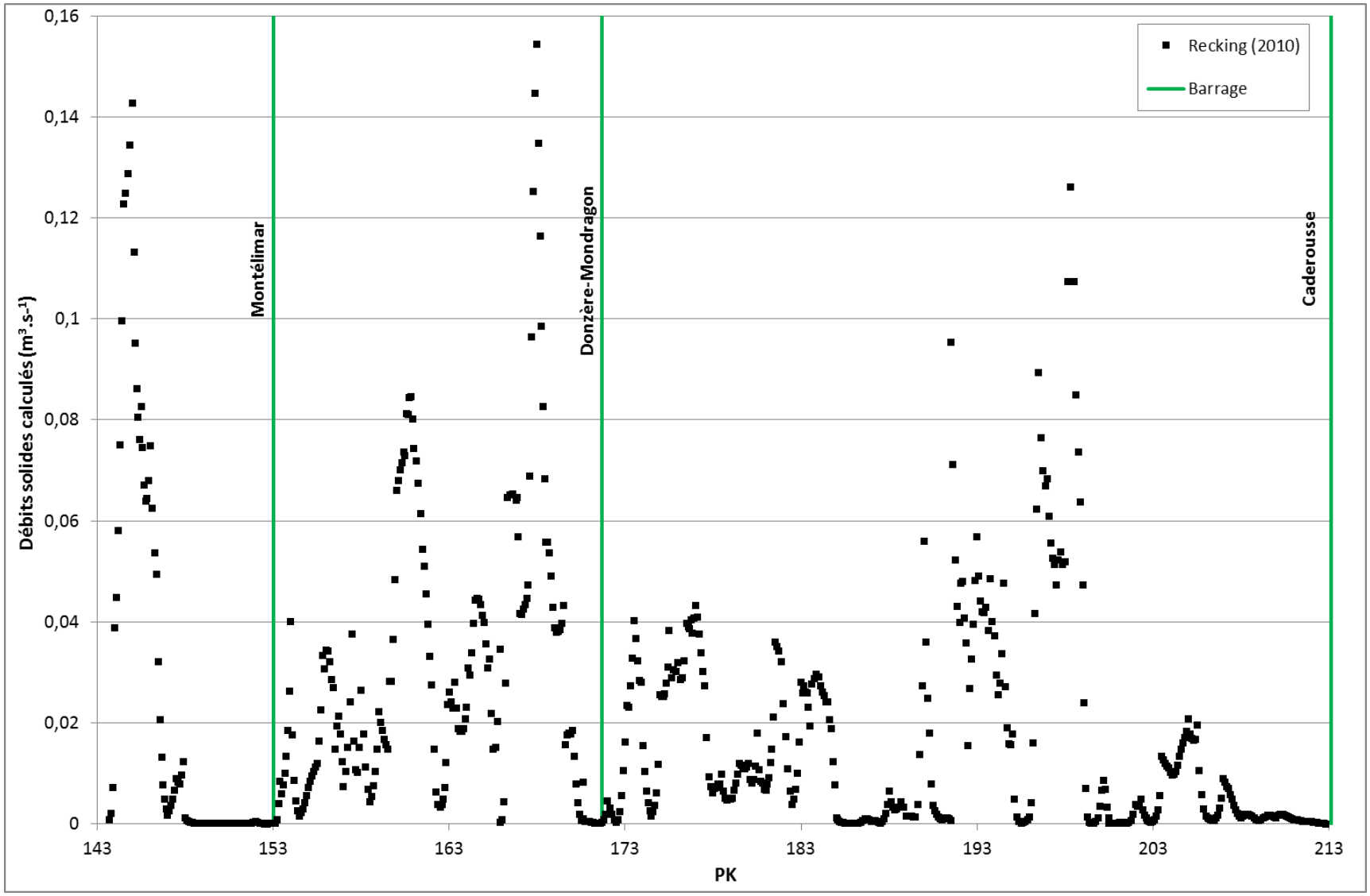
Annexe 34 : Débit solide calculé dans le secteur étendu de Pierre-Bénite à Q5 – simulation pour un D_{50} de 35 mm (Annexe 32)



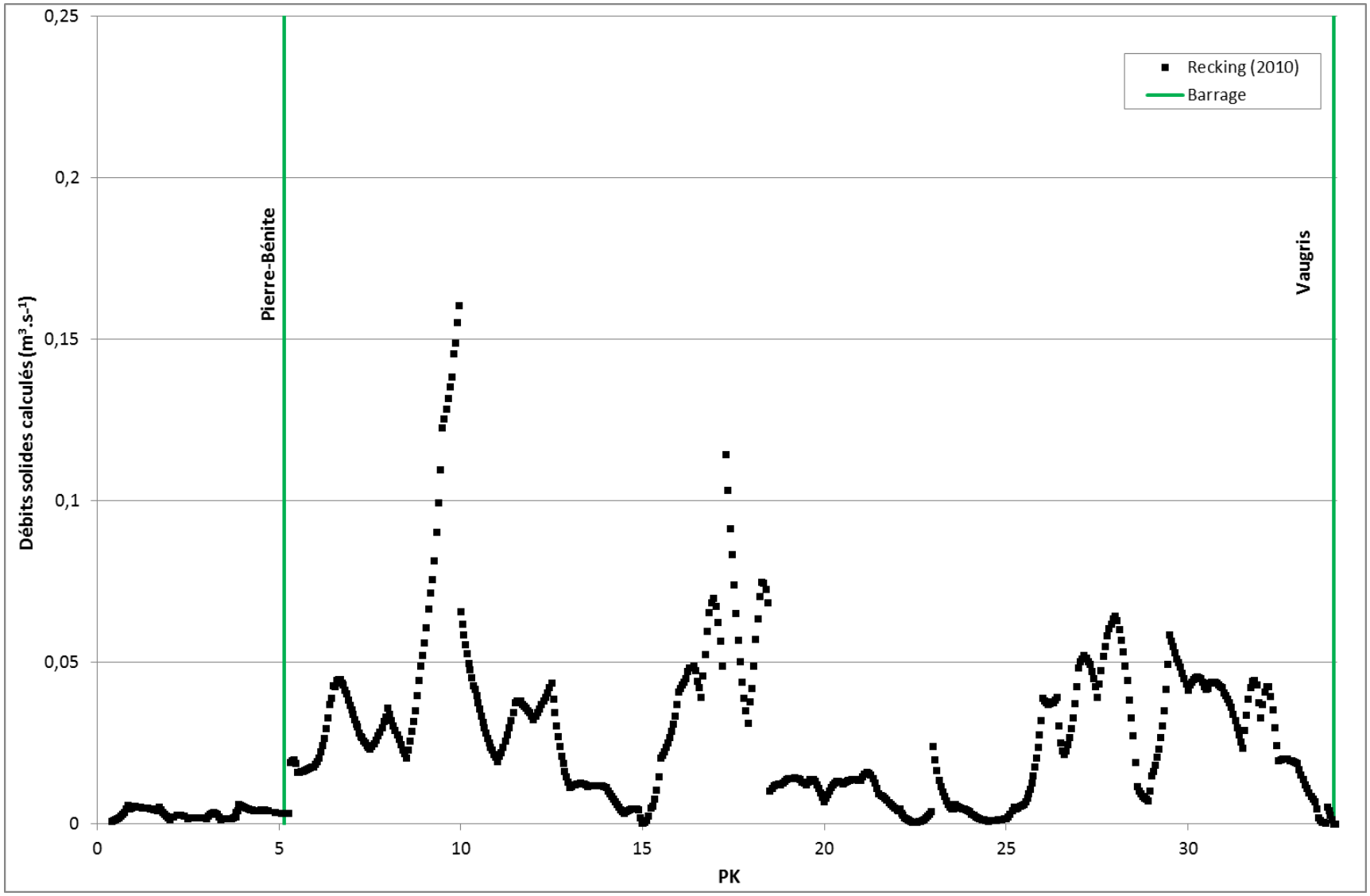
Annexe 35 : Débit solide calculé dans le secteur étendu de Donzère-Mondragon à Q2 – simulation pour un D_{50} de 35 mm (Annexe 32)



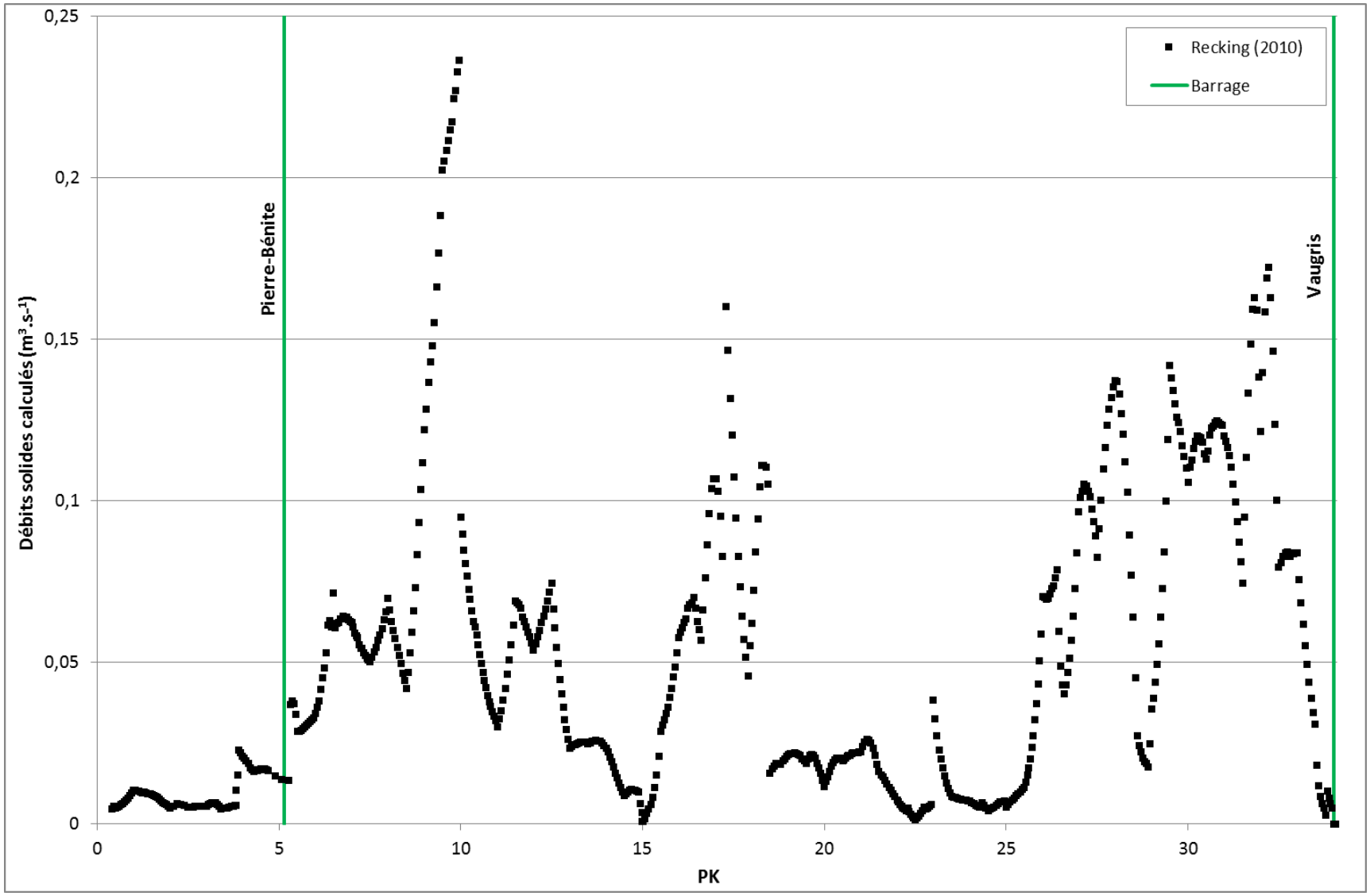
Annexe 36 : Débit solide calculé dans le secteur étendu de Donzère-Mondragon à Q5 – simulation pour un D_{50} de 35 mm (Annexe 32)



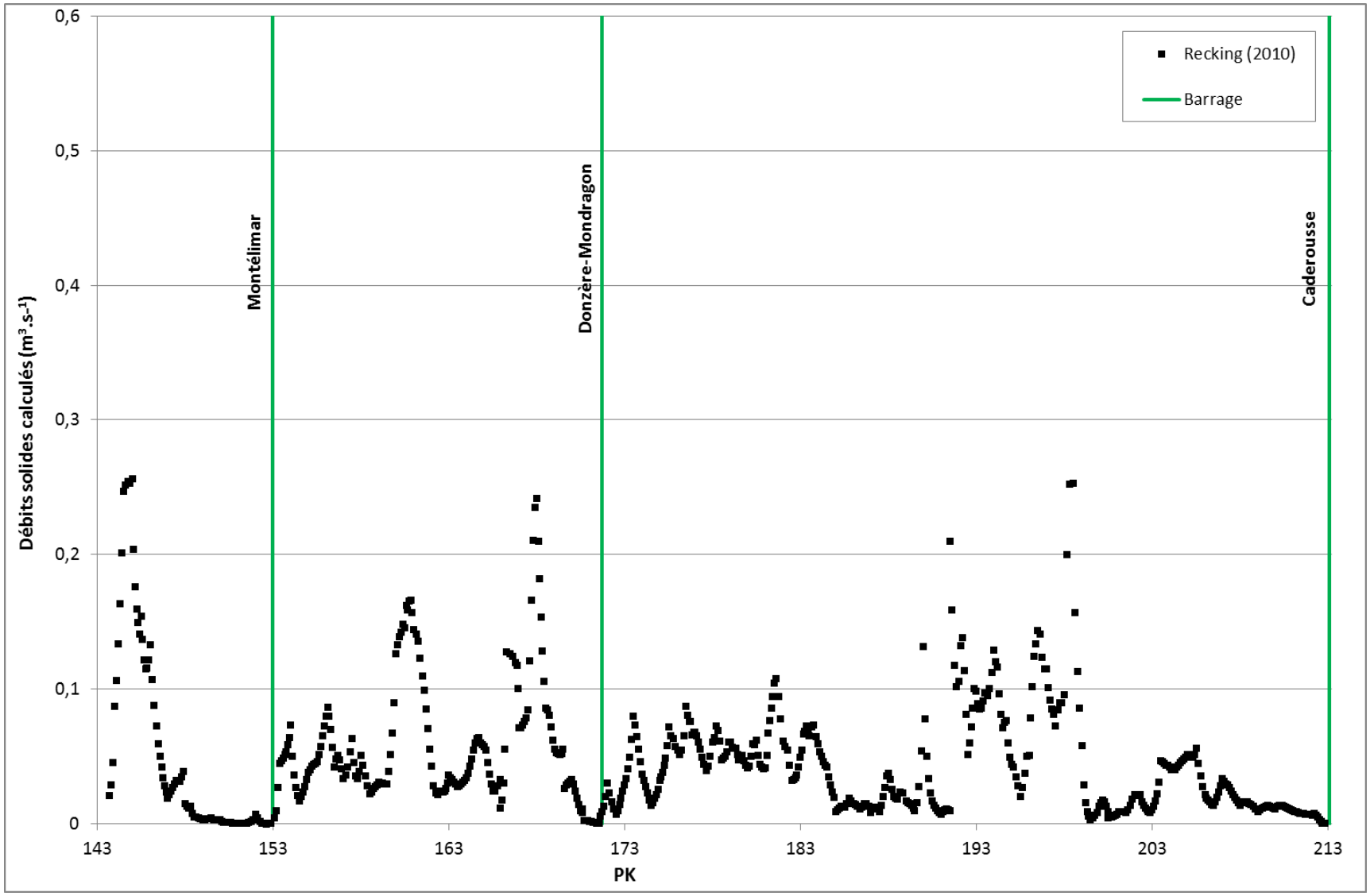
Annexe 37 : Débit solide calculé dans le secteur étendu de Pierre-Bénite à Q2 – simulation pour un D_{50} de 10 mm (Annexe 32)



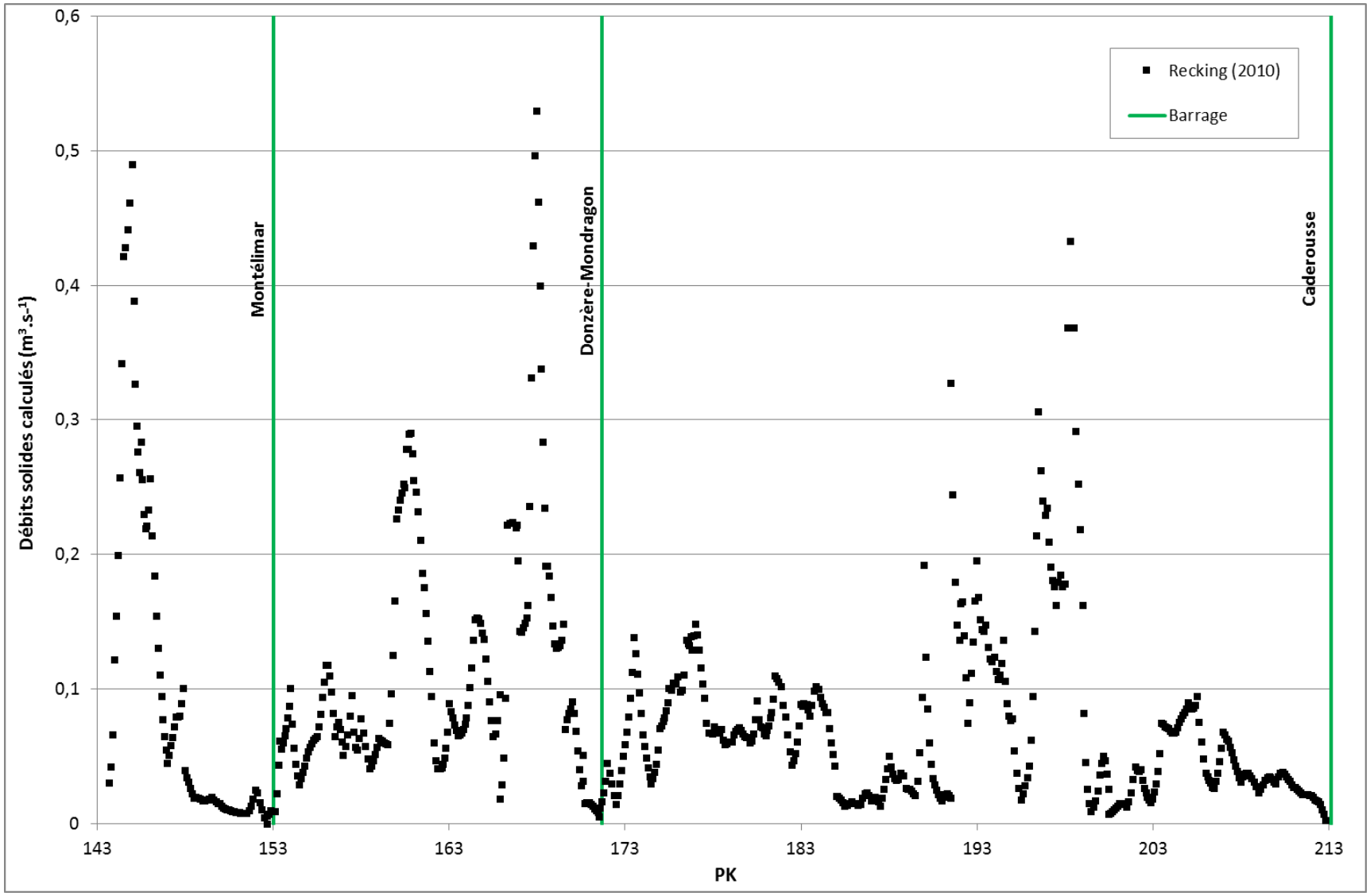
Annexe 38 : Débit solide calculé dans le secteur étendu de Pierre-Bénite à Q5 – simulation pour un D_{50} de 10 mm (Annexe 32)



Annexe 39 : Débit solide calculé dans le secteur étendu de Donzère-Mondragon à Q2 – simulation pour un D_{50} de 10 mm (Annexe 32)



Annexe 40 : Débit solide calculé dans le secteur étendu de Donzère-Mondragon à Q5 – simulation pour un D_{50} de 10 mm (Annexe 32)



Annexe 41 : Synthèse de l'évolution du profil à l'aval de Lyon secteur sur la période 1 (Girardon-Barrage), la période 2 (Barrage-Récent) et la période 3 (avant/après crues 2001-03)

	Période 1 = Girardon *VS* B	Période 2 = B *VS* Actuel	Période 3 = Avant-Crues *VS* Après-Crues
Bilan des 3 grandes périodes	**<u>Profils entre Lyon et la mer :</u>** -↘globale du linéaire, qui est inscrite dans le temps et résulte des modifications hydrauliques occasionnées par les ouvrages Girardon - ↘la plus forte observée qui enregistre les changements les plus drastiques, avec une ↘moyenne de -133 cm et une vitesse d'↘moyenne de 1,77 cm/an -↘assez marquées entre Lyon et Bourg-lès Valence -stabilité relative du profil par rapport au reste du linéaire entre Beauchastel et Donzère, avec ↘la plus importante au niveau de la confluence de l'Isère -variations localisées du profil entre Caderousse et la mer avec une majorité ↘	**<u>Profils am de Lyon :</u>** -pas de changement radical du profil -↗majoritaire à l'am des B et quelques zones en ↘à leur av -transport sédimentaire encore actif mais perturbé par les B **<u>Profils av de Lyon :</u>** -↘moins importantes que la première période mais plus localisées avec des maxima bien marqués, accentués par les ext-dge -↘moyenne de -32 cm, soit 1,2 cm/an, en tenant compte des 12.10^6 m^3 de sédiments extraits, soit 14 cm en moyenne sur tout le linéaire -effet des B plus modéré sur la géométrie du lit car implantés après les ajustements morphologiques et le tarissement des apports des principaux affluents -flux sédimentaire faible car le lit a été amené à se paver lors des ↘précédentes et le débit de pointe a été réduit dans les VR -pas ↗systématique à l'am des B et ↘à leur av -↘moins importante entre Pierre-Bénite et le RT de Vaugris (PK 0 et 25), et la plupart des zones incisées correspondent approximativement à des zones d'ext-dge de Lyon à Bourg-lès Valence -des variations altimétriques localisées entre Beauchastel et Donzère avec une majorité de R en ↗ -↘moins marquées de l'av de Donzère à la mer	**<u>Profils entre Lyon et la mer :</u>** -↘-↗locaux dans certains RT et VR (↘majoritaire) et ↘plus importante dans le Rhône av montrant une instabilité du lit et une remobilisation modérée de la charge de fond grâce aux crues morphogènes -↘beaucoup moins forte que les deux périodes précédentes mais sur un temps plus court, avec une ↘moyenne de -20 cm soit 3 cm/an. -stockage-déstockage entre l'am et l'av des B -le lit actuel n'est pas totalement figé par les précédents ouvrages. Les évolutions morphologiques sont liées au transfert d'une charge sableuse sur la géométrie pavée et stockée dans les R, ou à une charge de fond soumise à de forts débits et la largeur du chenal est importante -↘après les crues dans les zones où la granulométrie est la plus fine (am direct des B ou av du grand Rhône) et ↗dans R où la granulométrie est plus grossière -le VR de Péage de Roussillon, l'am de la R de Saint Vallier, la R de Bourg-lès Valence et l'am du RT de Beauchastel sont des secteurs plus stables sur l'ensemble de la section avec des granulométries grossières -forte ↘à l'av du B de Pierre-Bénite, de Vaugris, et entre le B de Saint-Vallier et le Doux alors que la granulométrie est grossière et le débit de moindre intensité qu'à l'av : réduction de la largeur du chenal et crues pourraient être à l'origine de cette forte ↘. -↗à l'am des B de Vaugris, Donzère et Caderousse peut être lié aux apports des affluents à l'am (respectivement la Saône et la Drôme) -↘continue importante dans le Rhône av qui enregistre des débits des crues de 2002-2003 si intenses que le chenal a réagi malgré un diamètre médian des particules important (20-70 mm)
	Depuis le début des aménagements ↘ moyenne de -181 cm (-1,72 cm/an). Impact plus important des casiers Girardon sur le linéaire par rapport à celui des aménagements CNR qui a été plus local. Un transport sédimentaire actuel encore dynamique des sables et de la fraction fine stockés dans les retenues, notamment lors des évènements de crues. Les fosses d'extraction ont déstabilisé le transit sédimentaire par piégeage de la charge de fond.		

PL=profil en long, B = barrage, am=amont, av=aval, ext=extraction, dge=dragage, RT = Rhône total, R = retenue, VR = vieux Rhône, ↘= incision, ↗ = exhaussement

Secteurs	D50	Période 1 = Girardon *VS* B	Période 2 = B *VS* Actuel	Période 3 = Avant-Crues *VS* Après-Crues
Génissiat	5 am B		-↘am R (PK -186) (*déficit Arve ?*), fosse ext en queue de R (PK -183.5) comblé dans les années 80 (*effet R ?*), ↗en am du B, av direct du barrage s'incise après construction puis s'exhausse en 2003	
Seyssel	35/ 10		- ↘am R (PK -157.5) (*déficit dû au barrage ?*), faibles variations au niveau de la R	
Chautagne	31/ 14		-variations altimétriques (↘ et ↗) les plus fortes -↗à l'av du Fier depuis 1988 (*Fier apporte des fines ?*), les formes du VR dans les années 80, plus marquées, se sont lissées depuis	
Belley	35/ 70		-↘et ↗les plus fortes -fosses d'ext dans R se sont comblées, ↗continu à l'am du B (*Fier apporte des fines ?*) -le VR entre 1970 et 89 est incisé (PK -130.5 à -127), exhaussé (PK -127 à -117) et incisé (PK -117 à -114.5) puis alternance ↘-↗depuis 1989, les fosses creusées en 70-89 n'ont pas été comblées	
Brégnier-Cordon	24/ 12		-le profil n'a que très peu varié -am R et am B se sont exhaussés depuis 1987 -les formes du fond du lit du VR se sont lissées (*dynamique fluviale par apport sédimentaire du Guiers ?)*	
Sault-Brénaz	0,01 /32		-faibles variations -les formes du fond du lit du RT à l'am de la R se sont lissées, évolution du reste de la R quasi nulle	

PL=profil en long, B = barrage, am=amont, av=aval, ext=extraction, dge=dragage, RT = Rhône total, R = retenue, VR = vieux Rhône, ↘= incision, ↗ = exhaussement, D50=amont/aval barrage

Secteurs	D50	Période 1 = Girardon *VS* B	Période 2 = B *VS* Actuel	Période 3 = Avant-Crues *VS* Après-Crues
Lyon	32/ 27	-↘à l'av de la confluence de la Saône	-↘à l'av de la Saône à corréler avec des ext-dge	-forte ↘à l'av de la Saône
Pierre Bénite	38/ 45	-fortes ↘sur le secteur notamment à l'av	-↘plus faible devenant plus importante à l'av du secteur (PK13) correspondant à des zones d'ext-dge et peu de variations à l'am du B de PBN	-↘sur l'ensemble du secteur (PK 0-11.5) notamment dans la R, avec un ↗au niveau du radier du VR (PK 12-14.9)
Vaugris	58	-↘marquées jusqu'au B mais en diminution à l'av du secteur	-forte ↘à l'am du secteur qui diminue dans la R et s'exhausse légèrement à l'am du B, laissant penser à un stockage sédimentaire -formation d'une fosse de 11 m au niveau du B (PK 34-37.5) et d'une zone d'ext	-↗dans certaines parties de la R (*stockage des apports am ?*) (PK 20.5-22.5, PK 32.5), et ↘dans d'autres (PK 30-32) -↘au niveau du B (PK 33.9) et dans le VR (PK 36-38.5)
Péage de Roussillon	33/ 44	-↘importantes dans la R et fosse de 10 m au PK 47 qui semblait exister au moment de la construction des casiers au PK 50 (*migration vers l'am ?)*	-léger ↗à l'am du B (PK 49.5-52), laissant penser à un stockage sédimentaire, et peu de variations dans le VR	-↘dans la R (PK 40-41, PK 42.5, PK 45.5-47) et dans le VR (PK 54, PK 60-62.9) -léger ↗à l'am direct du B
Saint Vallier	49/ 52	-peu de variations à l'am mais ↘marquées à partir du PK 80 dans le VR	-am du RT (PK 63.5-68.5) très incisé, formation d'une fosse correspondant à une ext massive, léger ↗en am direct du B et ↘dans le VR	-↘dans la R (PK 75.5, PK 80) et dans le VR (PK 83.5-86)
Bourg-lès Valence	57/ 27	-↘marquées dans le secteur et dans VR à la confluence de l'Isère -↘à l'av du Doux et autant ↘que ↗à l'av de l'Isère	-↘dans la R et stabilisation du lit à l'am du B -↗à l'av du Doux et ↘à l'av de l'Isère forcée par des ext -faibles variations dans VR	-↘dans la R à l'am (PK 89) et à l'av de la confluence du Doux (PK 91) -↘continue mais plus faible jusqu'au B et ↘plus importante dans le VR autour de la confluence de l'Isère (PK 101-102)
Beauchastel	58 amB	-↘am du RT (PK 108-112) puis moindre mais continue dans VR	-R en ↗ (PK 115-120)	-↗dans la R et légère ↘à l'am direct du B
Baix-le Logis Neuf	50/ 100	-↘faible dans R mais plus forte à l'av de l'Eyrieux et de la Drôme	-↘dans le RT à l'av proche de l'Eyrieux (PK 127-128) et le VR (PK 136,5 à 139,5) proches ext -↗plus à l'av de l'Eyrieux et de la Drôme -↗de la R (PK 129.5-131) (*apport de la Drôme ?*)	-↘dans le RT à l'av de la confluence de l'Eyrieux (PK 127.5) et à l'am du B (PK 134.5)
Montélimar	59/ 84	-↘très peu marquée mais continue dans R	-↘à l'av du VR (PK 161.5-163.5) coïncidant avec ext et ↗important dans la R (PK 145.5-153) (*apport de la Drôme ?*)	-↘dans la R (PK 144.5-146) continue mais plus faible jusqu'au B -↘dans le VR à l'av du B (PK 152.5-154) et plus en av (PK 159-159.5, PK 161-165.5)

PL=profil en long, B = barrage, am=amont, av=aval, ext=extraction, dge=dragage, RT = Rhône total, R = retenue, VR = vieux Rhône, ↘= incision, ↗ = exhaussement, D50=amont/aval barrage

Secteurs	D50	Période 1 = Girardon *VS* B	Période 2 = B *VS* Actuel	Période 3 = Avant-Crues *VS* Après-Crues
Donzère-Mondragon	91/50	-↘moindre mais continue à l'am du RT - peu de variations à l'am de l'Ardèche et ↗sur quelques points à l'av (*apport sédimentaire ?*)	-↗à l'am du B (*apport de la Drôme ?*) -↘dans le VR où des dge-ext ont eu lieu (PK 172.5-190) et à partir de la confluence de l'Ardèche (PK190) à corréler aussi avec des ext-dge	-↘dans le RT (PK 168.5-169.5) et ↗à l'am direct du B (PK 170) -↘ponctuelles dans le VR jusqu'à la confluence de l'Ardèche (PK 174-191.5) et à l'av (PK 199.5) et ↗ponctuel quatre kilomètres à l'av de la confluence de l'Ardèche (PK 195-195.5) (*apports sédimentaires grossiers des affluents ?*)
Caderousse	63/65	-↘dans le RT vers l'av de la confluence du Lez (PK 200-210)	-↘dans RT, proche des zones de dge-ext, jusqu'à l'am de la confluence du Lez (PK 203) -↗entre la confluence du Lez et l'am du B	-↘dans le RT à l'am de la confluence du Lez (PK 202.5-203) et à l'am direct du B (PK 210-213), avec un ↗à l'av du Lez (PK 204-205)
Avignon	64/24	- peu de variations en am du secteur avec autant de points en ↘qu'en ↗à l'av de l'Aigue -↘à l'am du VR et au niveau de la confluence de l'Ouvèze (PK 230-236.5) -↗plus à l'av de l'Ouvèze (*apport de charge solide ?*)	-↗quelques kilomètres à l'am du B suivi de très faibles variations -↘au niveau du B (PK 230), proche des zones de dge-ext -↗à l'av de l'Aigue et de l'Ouvèze	-↗dans le VR à l'av de la confluence de l'Ouvèze (PK 235-237) et à l'am de la restitution
Beaucaire	22/38	-↗sur quelques points à l'av de la Durance et du Gard pouvant (*apport de charge solide* ?) -↘à partir de la restitution	-↗quelques kilomètres à l'am du B puis peu de variations -↘à l'av de la Durance à corréler avec des ext-dge -↘entre la restitution et la diffluence (PK 270 à 317), proche des zones de dge-ext -↗à l'av du Gard (*apports de graviers ?*)	-↘dans la R (PK 260) suivi d'un ↗à l'am direct du B (PK 261 à 262) -↘à l'av direct du B et de la confluence du Gard (PK 263) avec néanmoins des ↗locaux (*apports sédimentaires du Gard?*)
Grand Rhône	18	-↘dans tout le secteur excepté à la diffluence qui montre un ↗ (PK 277-280)	-↘, sauf au niveau de la diffluence qui est en ↗, découpée en trois zones séparées par le palier d'Arles et le seuil de Terrin, et plus forte à am du palier puis à l'av du seuil	-↘dans le RT (PK 271-277.5) à l'av de la diffluence (PK 280) et sur le littoral (PK 287, PK 307-316) sauf à la diffluence qui s'exhausse

PL=profil en long, B = barrage, am=amont, av=aval, ext=extraction, dge=dragage, RT = Rhône total, R = retenue, VR = vieux Rhône, ↘= incision, ↗ = exhaussement, D50=amont/aval barrage

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACKERS P., WHITE W.R., 1973. Sediment transport; new approach and analysis. Journal of the Hydraulics Division, 99, 2041-2060.

ADAM P., MALAVOI J.R., DEBIAIS N., 2006. Retour d'expérience d'opérations de restauration de cours d'eau et de leurs annexes, menées sur le bassin RMC. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, 129 p. + annexes.

ADAM P., MALAVOI J.R., DEBIAIS N., 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Agence de l'Eau Seine-Normandie, 160 p.

ALAVA C., 2009. Impact sur les débits réservés de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques. Mise en conformité des aménagements hydroélectriques de l'Unité de Production Sud-Ouest. Rapport final de travail de fin d'études, Ecole Centrale de Lyon, 83 p.

ALBER A., PIEGAY H., 2010. Spatial aggregation procedure for characterizing physical structure of fluvial networks: application to the Rhône basin (France). Geomorphology.

ALLEN K.R., 1951. The Horokiwi stream. Fisheries Bulletin, Rep. No. 10, New Zealand Marine Department, Wellington, 231 p.

AMBERT J., 2013. Etude diachronique de l'évolution bathymétrique du Rhône, Mémoire de Licence 3, Université Jean Moulin, Lyon 3, 40 p.

AMOROS C., PETTS G.E., 1993. Hydrosystèmes fluviaux, Masson, Collection d'Ecologie n° 24.

AMOROS C., ELGER A., DUFOUR S., GROSPRETRE L., PIEGAY H., HENRY C., 2005. Flood scouring and groundwater supply in rehabilitated side-channels of the Rhône River, France, Archiv Für Hydrobiologie Suppl., 15 (155), p. 147-168.

ANTONELLI, C., 2002. Flux sédimentaires et morphogenèse récente dans le chenal du Rhône aval. Thèse de Doctorat, Université de Provence, Aix-en-Provence, 272 p.

ANTONELLI C., PROVANSAL M., VELLA C., 2004. Recent morphological changes of a channel in a deltaic environment, the case of the Rhône River, France, Geomorphology 57, p.385-402.

ARNAUD F., 2012. Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Thèse de Doctorat, Université Jean Moulin, Lyon 3, 280 p.

ARNAUD-FASSETTA G., 1998. Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône. Thèse de géographie physique, Université de Provence (Aix-Marseille 1). Presses Universitaires du Septentrion, Lille, 329 p.

ARNAUD-FASSETTA G., 2003. River channel changes in the Rhône Delta (France) since the end of the Little Ice Age; geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. Catena, 51: 141-172.

ARNAUD-FASSETTA G., QUISSERNE D., ANTONELLI C., 2003. Downstream grain-size distribution of surficial bed material and its hydro-geomorphological significance in a large and regulated river: the Rhône River in its delta area (France). Géomorphologie : relief, processus, environnement. 9 (1): 33-49.

ARTELIA, 2012. Définition d'un programme de restauration hydraulique, hydromorphologique et écologique du Rhône de Miribel Jonage. Lot n° 2 : Gestion des crues et du transit sédimentaire - Rapport de phase 1 : établissement du diagnostic. Rapport SEGAPAL, Grand Parc de Miribel Jonage, 188p.

ASSANI A.A., PETIT F., 2004. Impact of hydroelectric power releases on the morphology and sedimentology of the bed of the Warche River (Belgium). Earth Surface Processes and Landforms, 29 : 133-143.

AUBERT, J., 1939. Historique de la navigation sur le Haut-Rhône français. Les Études rhodaniennes. Vol. 15 n°1-3, p.181-190.

BAGLINIERE J.L., CHAMPIGNEULLE A., 1982. Densité des populations de truite commune (Salmo trutta L.) et de juvéniles de saumon atlantique (Salmo salar L.) sur le cours principal du Scorff (Bretagne) : preferendums physiques et variations annuelles (1976-1980). Acta OEcologica, 3, 241-256.

BAGNOLD R.A., 1973. The nature of saltation and of bed-load transport in water, Proc. Roy. Soc., Ser. A, 332, 473-504.

BAGNOLD R.A., 1980. An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers. Proc. R. Soc. Lond., A372, 453-473.

BATALLA R.J., MARTIN-VIDE J.P., 2001. Thresholds of particle entrainment in a poorly sorted sandy gravel-bed river. Catena, 44, p.223-243.

BATHURST J.C., GRAF W.H., CAO H.H., 1987. Bed load discharge equations for steep mountain rivers, in Sediment Transport in Gravel Bed Rivers. edited by J.C.B.C.R. Thorne, J.C. Bathurst, R.D. Hey. John Wiley, Chichester, U.K, p.453–491.

BATHURST J.C., 2007. Effect of coarse surface layer on bed-load transport. J. Hydraul. Eng., 133, 1192–1205.

BEAUDOUIN B., RYCX Y., 2000. L'identification des sources sédimentaires du bassin versant du Rhône par l'étude des matières en suspension (MES) de ses principaux affluents. Mémoire de maîtrise, Université Paris VII - Denis Diderot, UFR de Géographie, 98 p.

BELLEUDY P., 2001. Le transport solide en rivière : lacunes de connaissance et besoins méthodologiques. Mémoire de recherche pour le diplôme d'habilitation à diriger des recherches, INP Grenoble, 77 p.

BELLIARD J., BOËT P., ALLARDI J., 1995. Evolution à long terme du peuplement piscicole du bassin de la Seine. Bulletin Français Pêche Piscic. 337/338/339 : 83-91.

BENDA L., DUNNE T., 1997. Stochastic forcing of sediment routing and storage in channel networks. Water Resources Resaerch, 33 (12): 2865-2880.

BENN P.C., ERSKINE W.D., 1994. Complex channel response to flow regulation: Cudgegong River below Windamere Dam, Australia. Applied Geography, 14 : 153-168.

BERGER J.F., SALVADOR P.G., FRANC O., VEROT-BOURRELY A., BRAVARD J.P., 2008. La chronologie fluviale postglaciaire du haut bassin rhodanien. Coll. EDYTEM n°6, Cahiers de Paléoenvironnement, p.117-144.

BESCHTA R.L., PLATTS W.S., 1986. Morphological features of small streams: significance and functions. Water Resources Bulletin 22, 369-379.

BETHEMONT J., 1972. Le Thème de l'eau dans la vallée du Rhône, essai sur la genèse d'un espace hydraulique, Thèse de doctorat de géographie, Université Lyon 2, Saint-Etienne, Imprimerie le Feuillet Blanc, 643 p.

BLANC X., PINTEUR F., SANCHIS T.H., 1989. Conséquences de l'enfoncement du lit de l'Arve sur les berges et les ouvrages ; bilan général des transports solides sur le cours d'eau. La Houille Blanche, 3-4 : 226-230.

BLEDSOE B.P., 2010. Sediment supply and the upland-stream connection. Workshop: Episodic streams: imperatives for assessment and environmental planning in California. Southern California Coastal Water Research Project (SCCWRP), Santa Ana, CA, November 7-9, 2010.

BLUCK B.J., 1982. Texture of gravel bars in braided streams. In: Hey R.D., Bathurst J.C. et C.R. Thorne (eds.), Gravel-bed Rivers. Fluvial Processes, Engineering and Management, John Wiley and Sons, Chichester, 339-355.

BOMBINO G., GURNELL A.M., TAMBURINO V., ZEMA D.A., ZIMBONE S.M., 2007. A method for assessing channelization effects on riparian vegetation in a Mediterranean environment. River Research and Applications, 23: 613-630.

BORDEAUX, L. 1920. La question du Rhône - Projets d'aménagement du fleuve, navigation, énergie hydraulique, irrigation. Bibliothèque Politique et Economique, Ed. Payot, 301 p.

BORLAND W.M., 1960. Stream channel stability. United States Bureau of Reclamation, Denver.

BRANDT S.A., 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. Catena, 40: 375-401.

BRAUD S., ALBER A., 2013. Synthèses des connaissances & proposition d'une méthode d'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire des cours d'eau. Rapport, DREAL Centre, 76 p.

BRAVARD J.P., 1987. Le Rhône du Léman à Lyon. Thèse de doctorat, Ed. La Manufacture, Lyon, 451 p.

BRAVARD J.P., BETHEMONT J., 1989. Cartography of rivers in France. In: Petts G.E. [eds], Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe, John Wiley & Sons, Chichester, p.95-111.

BRAVARD J.P., POINSART D., PETIT F., 1991. Canal de Miribel (Ain, Rhône), Effet des extractions de granulat sur le profil en long. Rapport à diffusion restreinte, Université Lyon 3 et Université de Liège, 62 p. et annexes.

BRAVARD J.P., 1991. Où sont passées les rivières ? Alpes Magasine, 12 (Nov-Dec) : 85-91.

BRAVARD J.P., ROUX A.L., AMOROS C., REYGROBELLET J.L., 1992. The Rhône River: a large alluvial temperate river. In: The River Handbook (Eds P. Callow & G.E. Petts), p.426-447. Blackwell, Oxford.

BRAVARD ,J.P., KLINGEMAN P.C., BEVILACQUA P., 1993. Etude préalable à la définition d'un schéma de gestion pour le Rhône et ses communes riveraines. Diagnostic portant sur l'évolution des vieux Rhône de Chautagne, Belley et Brégnier-Cordon. Report, 120 p.

BRAVARD J.P., PEIRY J.L., 1993. La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement de cours d'eau (19–20ème siecle). Zeitschrift für Geomorphologie, suppl. 88, 67–79.

BRAVARD J.-P., PETTS G.E., 1993. Interférences avec les interventions humaines. In: Amoros C., Petts G.E., Hydrosystèmes fluviaux, Ed. Masson, Paris, p. 233-253.

BRAVARD J.P., 1994. L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. Revue de Géographie de Lyon, 69 (1) : 5-10.

BRAVARD J.P., 1996. Le Rhône à l'aval de Lyon. In Lyon et les fleuves, retrouvailles, Grand Lyon Mission Prospective et Stratégie d'agglomération (eds) Les cahiers Millénaires, p.21-24.

BRAVARD J.P., PETIT F., 1997. Les cours d'eau, dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris, 222 p.

BRAVARD J.P., 1998. Le temps et l'espace dans les systèmes fluviaux, deux dimensions spécifiques de l'approche géomorphologique. Annales de Géographie, vol 107, n°599, p.3-15.

BRAVARD J.P., KONDOLF G.M., PIEGAY H., 1999. Environmental and societal effects of channel incision and remedial strategies. In: Darby S.E and Simon A. (ed.), Incised river channel, John Wiley and Sons, Chichester, 303-341.

BRAVARD J.P., CLEMENS A., 2008. Le Rhône en 100 Questions. ZABR, GRAIE, Villeurbanne, 295 p.

BRAVARD J.P., 2010. Discontinuities in braided patterns: the River Rhône from Geneva to the Camargue delta before river training. Geomorphology 117, 219-233.

BRAY D.I., CHURCH M., 1980. Armored versus paved gravel beds. Journal of the Hydraulics Division, 106: 1937-1940.

BROOKES A., 1985. River channelization: traditional engineering methods, physical consequences and alternative practices. Prog. in Phys. geog. , 9 : 44-73.

BROOKES A., 1988. Channelized rivers: perspectives for environmental management. John Wiley & Sons, Chichester, 326p.

BROWN C.B., 1950. Sediment transportation. in Engineering Hydraulics, edited, H. Rouse, New York, Wiley, p.769-857.

BRUNSDEN D., 1980. Applicable models of long term landform evolution. Zeitschrift für Geomorphologie, suppl. 36 : 16-26.

BUFFINGTON J.M., 1996. An alternative method for determining subsurface grain size distributions of gravel-bedded river. Eos Trans. AGU, 77 (46), Fall Meeting Suppl., Abstract 250.

BUFFINGTON J.M., MONTGOMERY D.R., 1997. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. Water Resour. Res., 33, 1993–2027.

BUFFINGTON J.M., MONTGOMERY D.R., 1999. A procedure for classifying textural facies in gravel-bed rivers. Water Resources Research, 35 (6) : 1903-1914.

BUNTE K., ABT S.R., 2001. Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring. General Technical Report n° RMRSGTR74, U.S. Dept. Agri., Forest service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, 428 p.

BUNTE K., 2004. State of science review - Gravel mitigation and augmentation below hydroelectric dams: a geomorphological perspective. Report submitted to the Stream Systems Technology Center, U.S. Dept. Agri., Forest service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, 144 p.

CADOL D., RATHBURN S. L., COOPER D. J., 2010. Aerial photographic analysis of channel narrowing and vegetation expansion in Canyon De Chelly National Monument, Arizona, USA, 1935-2004. River Research and Applications, doi: 10.1002/rra.1399.

CAMENEN B., LARSON M., 2005. A general formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 63, 249–260.

CARBONNEAU P.E., FONSTAD M.A., MARCUS W.A., DUGDALE S.J., 2012. Making riverscapes real. Geomorphology ; 137:74-86.

CARLING P.A., 1992. In-stream hydraulics and sediment transport. In: Calow P. and Petts G.E. (eds), The river handbook – hydrological and ecological principles. Blackwell scientific publications, London, 101-125.

CARSON M.A., GRIFFITHS G.A., 1987. Bedload transport in gravel channels. Journal of Hydrology of New Zealand, 26 (1), p.1-151.

CHAMBOREDON, M., s.d. Le Rhône, fleuve d'avenir – Progression actuelle du trafic, perspectives de développement, s.n.

CHAPUIS M., 2012. Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance. Thèse de Doctorat, Aix-Marseille Université, 244 p.

CHONDROYANNIS P., 1992. Ubaye, la forêt reconstruite : le sentier de découverte du Riou-Bourdoux. Gardanne, Office Nationale des Forêts. Imprimerie Esmenjaud, 112 p.

CHURCH M., KELLERHALS R., 1978. On the statistics of grain size variation along a gravel river. Canadian Journal of Earth Science, 15: 1151-1160.

CHURCH M., JONES D., 1982. Channel bars in gravel-bed rivers. In: Gravel-bed Rivers. Fluvial Processes, Engineering and Management. R.D. Hey; J.C. Bathurst and C.R. Thorne (eds.), John Wiley and Sons, Chichester, p.291-338.

CHURCH M., MCLEAN D.G., WOLCOTT J.F., 1987. River bed gravels: sampling and analysis. In: Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, Thorne C.R., Bathurst J.C., Hey R.D. [eds], John Wiley & Sons, Chichester, 43-88.

CHURCH M., 1995. Geomorphic response to river flow regulation: case studies and time-scales. Regulated Rivers: Research & Management, 11: 322.

CHURCH M. HASSAN M.A., 2002. Mobility of bed material in Harris Creek, Water Resour. Res., 38 (11), 1237, 12 p.

CLERGET, P., 1929. Les industries de la soie dans la vallée du Rhône. Les Études rhodaniennes, Vol. 5, n°5-1, p.1-26.

CNR, 2012. Chasses suisses du Rhône et opérations d'accompagnement de la CNR : fin des opérations à Génissiat. Article de communication en ligne depuis mercredi 13 juin 2012 sur le site internet officiel de la CNR. Disponible sur : http://cnr.tm.fr/presse-actualites/actualites/13-06-2012.aspx

CNR, 2013. La CNR engage un important dragage d'entretien au barrage-centrale de Génissiat. Article de communication en ligne depuis le lundi 9 décembre 2013 sur le site internet officiel de la CNR. Disponible sur : http://cnr.tm.fr/presse-actualites/actualites/la-cnr-engage-un-important-dragage-d-entretien-au-barrage-centrale-de-genissiat.aspx

COLLIER M., WEBB R.H., SCHMIDT J.C, 1996. Dams and rivers, primer on the downstream effects of dams. USGS circular 1126, 94 p.

CONSTANTINE J.A., DUNNE T., PIEGAY H., KONDOLF G.M., 2010. Controls on the alluviation of oxbow lakes by bed-material load along the Sacramento River, California. Sedimentology 57, 389–407.

COREY A.T., 1949. Influence of Shape on the Fall Velocity of Sand Grains. A& M College, M.Sc. Thesis.

CORNING R.V., 1975. Channelization: shortcut to nowhere. Virginia Wildlife, 6-8.

COUVERT B., LEFORT P., PEIRY J.L., BELLEUDY P., 1999. La gestion des rivières, transport solide et atterrissements : guide méthodologique. Les études des Agences de l'Eau n° 65, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 96 p.

DEGOUTTE G., 2006. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières. Hydraulique et morphologie fluviales appliquées. Ed. Lavoisier, Paris, 394 p.

DELACOSTE M., BARAN P., LEK S., LASCAUX J.M., 1995. Classification et clé de détermination des faciès d'écoulement en rivières de montagne. Bull. Fr. Pêche Piscic., 337/338/339, 149-156.

DELAHAYE E., 2000. Les impacts physiques et sociétaux de l'aménagement et des grands travaux sur un espace fluvial : la basse Durance d'Orgon à Bonpas. Géocarrefour, 75 : 275-282.

DELAHAYE, E., 2009. Les espaces fluvio-urbains rhodaniens à l'aval de Lyon, Vienne, Valence, Avignon, Tarascon, Beaucaire et Arles : des territoires à la dérive ? Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2, 293 p.

DEROANNE C., PETIT F., 1999. Longitudinal evaluation of bed load size and of its mobilisation in a gravel bed river. In: Casale R. et C. Margottini (eds.), Floods and landslides, Springer, Berlin, 335-342.

DIERAS P.L., 2013. The persistence of oxbow lakes as aquatic habitats: an assessment of rates of change and patterns of alluviation. Ph. D. Thesis, Cardiff University, 188p.

DIERAS P.L., CONSTANTINE J.A., HALES T.C., PIEGAY H., RIQUIER J., 2013. The role of oxbow lakes in the off-channel storage of bed material along the Ain River, France. Geomorphology, 188, 110–119.

DIETRICH W.E., KIRCHNER J.W., IKEDA H., ISEYA F., 1989. Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bed rivers. Nature, 340 : 215-217.

DUFOUR S., 2005. Contrôles naturels et anthropiques de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône). Thèse de Doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3, 244p.

DUFOUR S., BARSOUM N., MULLER E., PIÉGAY H., 2007. Effects of channel confinement on pioneer woody vegetation structure, composition and diversity along the River Drôme (SE France). Earth Surf. Process. Landforms 32, 1244–1256.

EINSTEIN H.A., 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows.

United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, Washington, 71 p.

ENCYCLOPEDIE LAROUSSE, 2012. Rhône. Encyclopédie Larousse en ligne. Consulté le 27/12/2014. Disponible sur : http://www.larousse.fr/encyclopedie/riviere-lac/Rh%C3%B4ne/140848.

ENGELUND F., HANSEN E., 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark, 62 p.

ARGUE, 1868. Etude sur la configuration du lit moyen de la Garonne. Annales des Ponts et Chaussées, Paris, 1, 34-92.

FARROW J.W., SKLAR L.S., 2004. Lithologic influence and experimental variability in gravel abrasion: Implications for predicting rates of downstream fining of river bed sediments. Eos Trans. AGU, 85 (47), Fall Meeting Suppl., Abstract H53C1277.

FAURE J.B., 2013. MAGE - Résolution des équations de Barré de Saint-Venant 1D en réseaux complexes. Documentation théorique et notice d'emploi. IRSTEA, 173p.

FERGUSON R.I., ASHWORTH P.J., 1991. Slope-induced changes in channel character along a gravel-bed stream: the Allt Dubhaig, Scotland. Earth Surface Processes and Landforms, 16: 65-82.

FERGUSON R.I., HOEY T.B., WATHEN S.J., WERRITY A., 1996. Field evidence for rapid downstream fining of river gravels through selective transport. Geology, 24 : 179-182.

FRIEDMAN J.M., OSTERKAMP W.R., SCOTT M.L., AUBLE G.T., 1998. Downstream effects of dams on channel geometry and bottomland vegetation: regional pattern in the Great Plains. Wetlands, 18 (4): 619-633.

FRINGS R.M., 2008. Downstream fining in large sand-bed rivers. Earth Science Reviews, 87 (1): 39-60.

FRISSELL C.A., LISS W.J., WARREN C.E., HURLEY M.D., 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. Environmental Management 10, 199–214.

FRUGET J.F., 1989. L'aménagement du Bas-Rhône. Evolution du fleuve et influence sur les peuplements de macroinvertébrés benthiques. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, 481 p.

FRUGET J.F., MICHELOT J.L., 1997. Dérives écologiques et gestion du milieu fluvial rhodanien. Revue de Géographie de Lyon 72 (1), 35-48.

FRUGET J.F, DESSAIX J., 2002. Biodiversité structurelle et fonctionnelle des peuplements de macro-invertébrés en tant que descripteur de la variabilité hydraulique : exemple de deux parties court-circuitées du Rhône moyen. Revue des sciences de l'eau, vol.15, numéro spécial CILEF, p.209-221.

FRUGET J.F, 2003. Changements environnementaux, dérives biologiques et perspectives de restauration du Rhône français : bilan de 200 ans d'influences anthropiques. VertigO, vol.4 (3), p.1-17.

GAEUMAN D., SCHMIDT J.C., WILCOCK P.R., 2005. Complex channel response to changes in stream flow and sediment supply on the lower Duchesne River, Utah. Geomorphology, 64, p.185-206.

GALAY V.J., 1983. Causes of river bed degradation. Water Resources Research, 19: 1057-1090.

GASPARINI N.M., TUCKER G.E., BRAS R.L., 1999. Downstream fining through selective particle sorting in an equilibrium drainage network. Geology, 27 (12) : 1079-1082.

GAUTIER E., 1994. Interférence des facteurs anthropiques et naturels dans le processus d'incision sur une rivière alpine - L'exemple du Buëch (Alpes du sud). Revue de géographie de Lyon, 69 : 57-62.

GE, 2012. Vos questions sur la vidange de Verbois. Article de communication en ligne sur le site officiel de la République et canton de Genève. Dernière mise à jour le 12/07/2013. Disponible sur : http://ge.ch/eau/faq/vos-questions-sur-la-vidange-de-verbois

GIRARDON H., 1892. Travaux d'amélioration de la navigation du Rhône exécutés en vertu de la loi du 13 mai 1878, situation et résultats en

1892. Archives Départementales du Rhône, série S 3243.

GIRARDON H., 1894. L'amélioration des rivières en basses eaux. V1e Congrès International de Navigation Intérieure, La Haye, 83 p.

GIRARDON H., 1902. Travaux d'amélioration du Rhône, Rapport des Ponts et Chaussés du 27 juin 1902, Archives départementales du Rhône, série S 3243.

GLOVA G.J., DUNCAN M.J., 1985. Potential effects of reduced flows on fish habitats in a large braided river, New Zealand. Transactions of the American Fisheries Society, 114, 165-181.

GOMEZ B., 1984. Typologie of segregated (armoured/paved) surfaces: some comments. Earth Surface Processes and Landforms, 9 : 19-24.

GOMEZ B., 1993. Roughness of stable, armored gravel beds. Water Resour. Res., 29 (11), 3631–3642.

GOMEZ B., ROSSER B.J., PEACOCK D.H., HICKS D.M., PALMER J.A., 2001. Downstream fining in a rapidly aggrading gravel bed river. Water Resources Research, 37 (6) : 1813-1823.

GONZALEZ E., GONZALEZ-SANCHIS M., CABEZAS A., COMIN F.A., MULLER E., 2010. Recent Changes in the Riparian Forest of a Large Regulated Mediterranean River: Implications for Management. Environmental Management 45, p. 669-681.

GOSTNER W., ALP M., SCHLEISS A.J., ROBINSON C.T., 2012. The hydro-morphological index of diversity: a tool for describing habitat heterogeneity in river engineering projects. Hydrobiologia, doi: 10.1007/s10750-012-1288-5.

GRAF W.L., 1977. The rate law in fluvial geomorphology. American Journal of Science, 277: 178-191.

GRAF W.L., ALTINAKAR M., 1996. Hydraulique Fluviale : Ecoulement non Permanent et Phénomènes de Transport, Eyrolles, Paris.

GRAF W.L., 2006. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. Geomorphology, 79: 336-360.

GRAMS P.E., SCHMIDT J.C., 2005. Equilibrium or indeterminate? Where sediment budgets fail: sediment mass balance and adjustment of channel form, Green River downstream from Flaming Gorge Dam, Utah and Colorado. Geomorphology, 71 : 156-181.

GRANT G.E., SWANSON F.J., WOLMAN M.G., 1990. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon. Bulletin of the Geological Society of America 102: 340-352.

GRANT G.E., SCHMIDT J.C., LEWIS S.L., 2003. A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. In: O'Connor J.E., Grant G.E. [eds], Water Science and Application 7, American Geophysical Union, 209-225.

GRANT G.E., 2012. The geomorphic response of gravel-bed rivers to dams: perspectives and prospects. In: Church M., Biron P., Roy A. [eds], Gravel-bed Rivers: Processes, Tools, Environments, John Wiley & Sons, Chichester, 165-181.

GREGORY K.J., GURNELL A.M., HILL C.T., TOOTH S., 1994. Stability of the pool-riffle sequence in changing river channels. Regulated Rivers Research and Management 9:35–43.

GROSPRÊTRE L., 2011. Etude et gestion des impacts hydrogéomorphologiques de la périurbanisation. L'exemple du bassin de l'Yzeron dans l'Ouest lyonnais. Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon 2, 280 p.

GROVE J.M., 1988. The Little Ice Age. Methuen, London, 512 p.

GURNELL A.M., DOWNWARD S.R., JONES R., 1994. Channel planform change on the river Dee meanders, 1876-1992. Regulated Rivers: Research & Management, 9: 187-204.

GURNELL A.M., PEIRY J.L., PETTS G.E., 2003. Using historical data in fluvial geomorphology. In: Kondolf M., Piégay H. [eds.], Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, Chichester, p.77–103.

HABERSACK H., PIÉGAY H., 2008. River restoration in the Alps and their surroundings: past experience and future challenges. In: Rinaldi M., Habersack H., Piégay H. [eds], Gravel-bed Rivers 6: From Process Understanding to the Restoration of Mountain Rivers, Elsevier, Amsterdam, 703-737.

HARRISON A.S., 1950. Report on special investigation of bed sediment segregation in a degrading river. Institute of engineering research, University of California, Berkeley, report serie 33/1.

HEY R.D., 1979. Flow resistance in gravel bed rivers. Journal of the Hydraulics Division (ASCE), 105, 365-379.

HEY R.D., THORNE C.R., 1983. Accuracy of surface samples from gravel bed material. Journal of Hydraulic Engineering, 109: 842-851.

HJULSTRÖM F., 1935. Studies in the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. Bulletin of the Geological Institute, University of Uppsala, 25: 221-527.

HOHENSINNER S., HABERSACK H., JUNGWIRTH M., ZAUNER G., 2004. Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river-floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: the Danube River (1812-1991). River Research and Applications, 20: 25-41.

HUBERT P., 2000. The segmentation procedure as a tool for discrete modelling of hydrometeorological regimes. Stochast. Environ. Res. Risk Assess. 13, 297-304.

IRS (Institution interdépartementale des bassins Rhône-Saône), 2000. La dynamique fluviale du Rhône. Plaquette de communication de l'Etude Globale du Rhône, 5 p.

IRSTEA, 2012. La chasse aux sédiments est ouverte sur le Rhône. Article de communication en ligne depuis le 17/07/2012 sur le site internet officiel de l'IRSTEA. Disponible sur : http://www.irstea.fr/toutes-les-actualites/departement-eaux/la-chasse-aux-sediments-est-ouverte-sur-le-rhone.

JACKSON W.L., BESCHTA R.L., 1982. A model of two-phase bedload transport in an Oregon Coast Range stream: Earth Surface Processes and Landforms, v. 7, p. 517-527.

JOHNSON C.W., 1997. Equilibrium response of riparian vegetation to flow regulation in the Platte River, Nebraska. Regulated Rivers: Research & Management, 13: 403-415.

JOWETT L.G., 1993. A method of objectively identifying pool, run and riffle habitats from physical measurements. New Zealand Journal of Marine and Fisheries Research 27, 241–248.

KELLER E.A., MELHORN W.N., 1978. Rhythmic spacing and origin of pools and riffles. Geological Society of America Bulletin 89, 723–730.

KELLERHALS R., BRAY D.I., 1971. Sampling procedure for fluvial sediments. ASCE Journal of the Hydraulics Division, 97: 1165-1180.

KERSHNER J.L., SNIDER W.M., TURNER D.M., MOYLE P.B., 1992. Distribution and sequencing of mesohabitats: are there differences at the reach scale? Rivers, 3, 179-190.

KLINGEMAN P., BRAVARD J.P., GIULIANI Y., 1994. Les impacts morphodynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation : le Rhône en Chautagne (France). Revue de Géographie de Lyon, 69 :73-89.

KLINGEMAN P.C., BRAVARD J.P., GIULIANI Y., OLIVIER J.M., PAUTOU G., 1998. Hydropower reach by-passing and dewatering impacts in gravel-bed rivers. In: Klingeman P.C., Beschta R.L., Komar P.D., Bradley J.B. (Eds), Gravel-bed rivers in the environment, Water Resources Publications, LLC, USA, 313-344.

KNIGHTON A.D., 1984. Fluvial forms and processes. Edward Arnold, London, 218p.

KNIGHTON A.D., 1998. Fluvial Forms and Processes - A New Perspective. John Wiley, New York, 383 p.

KNIGHTON A.D., 1999. The gravel-sand transition in a disturbed catchment. Geomorphology, 27: 325-341.

KONDOLF G.M., 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channel. Environmental Management, 21 (4) : 533-551.

KONDOLF G.M., PIÉGAY H., 2003. Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, Chichester.

KONDOLF G.M., 2008. Hungry water: managing sediment in rivers. Presentation to the MRC Sediment Workshop, October 2008.

KRUMBEIN W.C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology, 11 (2): 64-72.

LAMOUROUX N., OLIVIER J.M., CAPRA H., ZYLBERBLAT M., CHANDESRIS A., ROGER P., 2006. Fish community changes after minimum flow increase: testing quantitative predictions in the Rhône River at Pierre-Bénite, France. Freshwater Biology, 51, 1730–1743.!

LAMOUROUX N., OLIVIER J.M., PIEGAY H., MERIGOUX S., DOLEDEC S., SEGURA S., CASTELLA E., RIQUIER J., PARROT E., FORCELLINI M., 2012. Effets de la restauration du Rhône et potentiel - Synthèse par secteurs. Action n°24 du Programme 2010 au titre de l'accord cadre, Agence de l'Eau ZABR, 26 p.

LANDON N., PIEGAY H., 1994. L'incision des affluents méditerrannéens du Rhône : la Drôme et l'Ardèche. Revue de géographie de Lyon, 1 : 63-72.

LANDON N., 1996. L'évolution du profil en long des affluents du Rhône moyen : du constat aux principes de gestion. Revue de Géographie de Lyon, 71 (4) : 363-376.

LANDON N., 1999. L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen, constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe, la Drôme. Thèse de doctorat en Géographie et Aménagement du Territoire, Université Paris-Sorbonne, 560 p.

LANDON N., 2007. Du constat d'enfoncement du lit fluvial aux actions de recharge sédimentaire : quelles solutions pour une gestion raisonnée de nos cours d'eau ? In Outils de gestion de l'eau en territoire de montagne, PNR du Queyras, ONEMA et MEDR, p.28-39.

LANE E.W., 1955. The importance of fluvial morphology. In: Hydraulic Engineering. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Paper 745, Vol. 81, 17p.

LARRAS J., 1977. Fleuves et rivières non aménagés. Eyrolles Paris, 187 p.

LAUNAY M., 2014. Flux de contaminants particulaires dans un grand cours d'eau anthropisé : dynamique des PCB et du mercure transportés par les matières en suspension du Rhône, du Léman à la Méditerranée. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1.

LE FOL E., 2009. Echelle stratigraphique internationale. Traduction de celle réalisée en 2008 par l'International Commission on Stratigraphy.

LEFORT P., 1991. Transport solide dans le lit des cours d'eau. Dynamique fluviale. SOGREAH, ENSHMG (cours), INPG Grenoble, 201p.

LEFORT P., 2007. Une formule semi-empirique pour le transport solide des rivières et des torrents. Papier présenté à Transport solide et gestion des sédiments en milieu naturel et urbain, SHF143-149, Lyon.

LE GUERN, 2013. Evaluation de la capacité de transport du Rhône par modélisation hydraulique 1D. Mémoire de Master 1, CEREGE, Aix-en-Provence et Université François Rabelais, Tours, 41p.

LEJOT J., 2008. Suivi des formes fluviales par télédétection très haute résolution. Application aux programmes de restauration de la basse vallée de l'Ain et du Haut-Rhône (Chautagne). Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon 2, 257p.

LEMA, 2006. Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques. Regroupé sous 102 articles et 5 thématiques.

LENZI M.A., MAO L., COMITI F., 2006. When does bed load transport begin in steep boulder-bed streams? Hydrol. Processes, 20, 3517–3533.

LEOPOLD L.B., WOLMAN M.G., 1957. River channel patterns: braided, meandering, and straight. U.S. Geological Survey.

LEOPOLD L.B., WOLMAN M.G., MILLER J.P., 1964. Fluvial processes in Geomorphology, San Francisco, 522 p.

LIÉBAULT F., PIÉGAY H., 2002. Causes of 20th century channel narrowing in mountain and Piedmont Rivers and streams of Southeastern France. Earth Surface Processes and Landforms, 27: 425-444.

LIÉBAULT F., 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies). Thèse de géographie, Université Lyon 2, 357p.

LIMERINOS J.T., 1970. Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap. 1898B, 47 p.

LISLE T.E., ISEYA F., IKEDA H., 1993. Response of channel with alternate bars to a decrease in supply of mixed-size bed load: a flume experiment. Water Resources Research, 29 (11): 3623-3629.

LIVESEY R.H., 1965. Channel armouring below Fort Randall Dam. Proceeding 3rd Federal inter-agency sedimentation conference, 1963 Miscellaneous publication 970, U.S. Dept. Agri., Washington D.C.

LLOYD N., QUINN G., THOMS M., ARTHINGTON A., GAWNE B., HUMPRIES P., WALKER K., 2002. Does flow modification cause geomorphological and ecological response in rivers? A literature review from an Australian perspective, Tech. Rep. 1/2004, Coop. Res. Cent. For Freshwater Ecol.

MADEJ M.A., 1999. Temporal and spatial variability in thalweg profiles of a gravel-bed river. Earth Surface Processes and Landforms, 24:1153-1169.

MAGALLIGAN F.J., NISLOW K.H., 2005. Changes in hydrologic regime by dams. Geomorphology, 71: 61-78.

MALAVOI J.R., 1989. Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie. Bulletin Français de la Pêche et la Pisciculture, 15 : 189-210.

MALAVOI J.R., 1990. Méthodologie de sectorisation et de description des cours d'eau à pente forte et moyenne : application à une gestion intégrée des écosystèmes d'eau courante. Thèse de doctorat en Géographie et Aménagement, Université Jean Moulin Lyon III, CEMAGREF BEA/LHQ : 517 p.

MALAVOI J.R., 2000. Etude géomorphologique du canal de Miribel. Rapport Hydratec – VNF.

MALAVOI J.R., SOUCHON Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. Note Technique. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 365/366 : 357-372.

MALAVOI J.R., 2007. Impacts des seuils en rivière sur l'hydromorphologie et l'écologie des cours d'eau. Journée technique d'information et d'échanges "Ouvrages hydrauliques" de l'Association Rivière Rhône Alpes, 15 mai 2007, Chazelles sur Lyon.

MALAVOI J.R., 2008. Etude morphologique du Rhône en amont de Lyon. Rapport Grand Lyon communauté urbaine, 46 p.

MALAVOI J.R., BRAVARD J.P., 2010. Eléments d'hydromorphologie fluviale. ONEMA 224 p.

MALAVOI J.R., GARNIER C.C., LANDON N., RECKING A., BARAN P., 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Onema, 216 p.

MARSTON R.A., GIREL J., PAUTOU G., PIEGAY H., BRAVARD J.P., ARNESON C., 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. Geomorphology, 13: 121-131.

MARSTON R.A., MILLS J.D., WRAZIEN D.R., BASSETT B., SPLINTER D.K., 2005. Effects of Jackson Lake Dam on the Snake River and its

floodplain, Grand Teton National Park, Wyoming, USA. Geomorphology, 71 : 79-98.

MARTIN C.W., JOHNSON W.C., 1987. Historical channel narrowing and riparian vegetation expansion in the Medicine Lodge river basin, Kansas, 1871-1983. Annals of the Association of American Geographers, 77 (3): 436-449.

MATHIEU L., 2013. Etude diachronique de l'évolution bathymétrique du Rhône 1897-2010, Contribution pour des recherches sur les dynamiques fluviales, Mémoire de Licence 3, Université Jean Moulin, Lyon 3, 50 p.

MERIGOUX S., LAMOUROUX N., OLIVIER J.M., DOLEDEC S., 2009. Invertebrate hydraulic preferences and predicted impacts of changes in discharge in a large river. Freshwater Biology, 54, 1343–1356.

MEYER-PETER E., MUELLER R., 1948. Formulas for Bed-Load Transport. Paper presented at Proceedings 2d Meeting IAHR, Stockholm.

MICHELOT J.L. 1989. Les espaces naturels de la vallée du Rhône, éléments pour une politique de gestion intégrée. Thèse de Doctorat, Université Lyon 3, 523 p.

MILHOUS R.T., 1973. Sediment transport in a gravel-bottomed stream. Thèse de Doctorat, Oregon University, Corvallis, 232 p.

MILNE J.A., 1982. Bed-material size and the riffle-pool sequence. Sedimentology, 29, p.267-278.

MIZUYAMA T., 1977. Bedload transport in steep channels. PhD thesis Dissertation, Kyoto University, Kyoto, 118 p.

MOIR H.J., PASTERNACK G.B., 2008. Relationships between mesoscale morphological units, stream hydraulics and Chinook salmon (Oncorhynchus tshawytscha) spawning habitat on the Lower Yuba River, California. Geomorphology 100: 527-548

MONTANE A., 2009. Approche statistique et géomorphologique du gradient granulométrique du Rhône. Mémoire de Master 2, Université Paris Diderot-Paris 7, 97p.

MONTANE A., ARNAUD-FASSETTA G., REYNARD E., 2010. Analyse statistique et modélisation de la variabilité longitudinale du gradient granulométrique du Rhône suisse. Bull. Murithienne 127/2009: 19-27.

MONTGOMERY D.R., BUFFINGTON J.M., 1997. Channel reach morphology in mountain drainage basins. Geological Society of America Bulletin 109. 596–611.

MONTGOMERY. D.R., BUFFINGTON J.M., 1998. Channel processes, classification, and response. In: Naiman R.J., Bilby R.E. (eds.), River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion. Springer, New York, NY. 13-42.

MOSLEY M.P., 1982. A procedure for characterising river channels. Water and soil miscellaneous publication, Rep. No. 32, Ministry of Work and Development, Wellington, 90 p.

MOSLEY M.P., TINDALE D.S., 1985. Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers. Earth Surface Processes and Landforms, 10: 465-482.

MOUSSAVI-HARAMI R., MAHBOUBI A., KHANEHBAD M., 2004. Analysis of controls on downstream fining along three gravel-bed rivers in the Band-e-Golestan drainage basin NE Iran. Geomorphology, 61: 143-153.

MUELLER E.R., PITLICK J., NELSON J.M., 2005. Variation in the reference Shields stress for bed load transport in gravel-bed streams and rivers. Water Resources Research, 41, 10 p.

NEILL C.R., 1968. A reexamination of the beginning of movement for coarse granular bed materials. Rep. no. INT 68, Hydraul. Res. Stn., Wallingford, U.K.

NEWBURY R.W., GABOURY M.N., 1993. Stream analysis and fish habitat design. Newbury Hydraulics Ltd., Manitoba Natural Resources, 256 p.

NOWELL A.R., CHURCH M., 1979. Turbulent flow in a depth-limited boundary layer. J. Geophys. Res., 84 (C8), 4816–4824.

O'NEIL M.P., ABRAHAMS A.D., 1984. Objective identification of pools and riffles. Water Resources Research, 20, 921-926.

OLDEN J.D., NAIMAN R.J., 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. Freshwater Biology, 55: 86-107.

OLIVE L., OLLEY J.M., 1997. River regulation and sediment transport in a semi-arid river: the Murrumbidgee River, NSW, Australia. IAHS publication, 245 : 283-290.

OLIVIER J.M., CARREL G., LAMOUROUX N., DOLE-OLIVIER M.J., MALARD F., BRAVARD J.P., AMOROS C., 2009. The Rhône River Basin. In: Tockner K., Uehlinger U., Robinson C.T. (Eds.), Rivers of Europe. Academic press, p. 247–295.

PAOLA C., PARKER G., SEAL R., SINHA S.K., SOUTHARD J.B., WILCOCK P.R., 1992. Downstream fining by selective deposition in a laboratory flume. Science, 258 : 1757-1760.

PARDÉ M., 1925. Le régime du Rhône, étude hydrologique, Etude et travaux de l'Institut de Géographie Alpine de l'Université de Grenoble, Thèse en 2 vol., Grenoble, France.

PARK C.C., 1977. Man-induced changes in stream channel capacity. In: Gregory K.J., River channel changes, Ed. John Wiley & Sons, Chichester, p. 121-144.

PARKER G., 1979. Hydraulic geometry of active gravel-bed rivers. J. Hydraul. Div., ASCE, 105 (HY9), 1185–1201.

PARKER G., KLINGEMAN P.C., 1982. On why gravel bed streams are paved. Water Resources Research, 18 : 1409-1423.

PARKER G., KLINGEMAN P.C., MCLEAN D.G., 1982. Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 108, 544–571.

PARKER G., 1991. Surface-based gravel transport relation for gravel rivers, J. Hydraul. Res., 28 (4), 417–437.

PARKER G., SEMINARA G., SOLARI L., 2003. Bed load at low Shields stress on arbitrarily sloping beds: Alternative entrainment formulation. Water Resour. Res., 39 (7), 1183.

PARKER G., WILCOCK P.R., PAOLA C., DIETRICH W.E., PITLICK J., 2007. Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers. J. Geophys. Res., 112, F04005.

PATEL P.L., POREY P.D., GHARE A.D., PATEL S.B., 2009. Entrainment characteristics of nonuniform unimodal and bimodal sediments. KSCE Journal of Civil Engineering, 13 (3), p. 189-194.

PEIRY J.L., 1987. Dynamique fluviale historique de l'Arve dans le bassin de Cluses (Haute-Savoie). 112ème Congrès national des Sociétés savantes, Lyon, p.95-108.

PEIRY J.L., 1988. Dynamique des sédiments sur un cours d'eau intramontagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie). Thèse de Géographie, Université Lyon 3, 378 p.

PEIRY J.L., BRAVARD J.P., 1989. Evolution naturelle d'un remplissage sédimentaire intramontagnard et impacts des aménagements contemporains : l'exemple de la vallée de l'Arve. La Houille Blanche, 3-4 : 221-225.

PEIRY J.L., SALVADOR P.G., NOUGUIER F., 1994. L'incision des rivières dans les Alpes françaises du nord: état de la question. Revue de Géographie de Lyon, 69 (1) : 47-56.

PEIRY J.L., 2003. Expertise géomorphologique dans le cadre du renouvellement de la concession du barrage de Kembs. Rapport d'expertise de l'Université Blaise Pascal, GEOLAB UMR 6042 CNRS et UBP « Géodynamique des milieux naturels et anthropisés », Clermont-Ferrand, 6 p.

PERIAL C., 2012. Réactivation des marges alluviales du Rhône (sites pilotes) - Processus, cinétique d'évolution et suivi géomorphologique post-démantèlement. Mémoire de Master 2, Université Lumière Lyon 2, 87 p.

PERSAT H., BRAVARD J.P., OLIVIER J.M., 1995. Stream and riparian management of large braided mid-European rivers, and consequences for fish. In N.B. Armantrout (ed.), Condition of the World's Aquatic Habitats. Proceedings of the World Fisheries Congress, Athens, May 1992, Theme 1. Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New-Delhi, 139-169.

PETTITT A.N., 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), Vol. 28, No. 2, pp. 126-135.

PETTS G.E., 1979. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. Progress in Physical Geography, 3: 329-362.

PETTS G.E., 1980. Long-term consequences of upstream impoundment. Environmental Conservation, 7 : 325-332.

PETTS G.E., 1984. Impounded rivers: perspectives for ecological management. Ed. John Wiley & Sons, New York, 328p.

PETTS G.E., GURNELL A.M., 2005. Dams and geomorphology: research progress and future directions. Geomorphology, 71: 27-47.

PHILLIPS J.D., 2003. Toledo bend reservoir and geomorphic response in the lower Sabine River. River Research and Applications, 19 : 137-159.

PIÉGAY H., PEIRY J.L., 1997. Long profile evolution of a mountain stream in relation to gravel load management: example of the middle Giffre river (French Alps). Environmental management, 21 (6) : 909-920.

PIÉGAY H., SCHUMM S.A., 2003. System approaches in fluvial geomorphology. In: Kondolf M., Piégay H. [eds.], Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, Chichester, p.105–134.

PIZZUTO J.E., 1995. Downstream fining in a network of gravel-bedded rivers. Water Resources Research, 31 : 753–759.

POFF L.N., ALLAN J.D., BAIN M.B., KARR J.R., PRESTEGAARD K.L., RICHTER B.D., SPARKS R.E., STROMBERG J.C., 1997. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. Bioscience, 47 (11) : 769-784.

POINSART D., BRAVARD J.P., CACLIN M.C., 1989. Profil en long et granulométrie du lit des cours d'eau aménagés : l'exemple du canal de Miribel (Haut-Rhône). Revue de Géographie de Lyon, Vol. 64, N°4, p. 240 à 251.

POINSART D., 1992. Effets des aménagements fluviaux sur les débits liquides et solides. L'exemple du Rhône dans les plaines de Miribel-Jonage et de Donzère-Mondragon. Thèse de Géographie et Aménagement, Université Lyon 3, 501p.

POINSART D., SALVADOR G., 1993. L'endiguement du Rhône à l'aval de Lyon XIXème siècle. In : Le fleuve et ses métamorphoses, Actes du Colloque International, p. 307-313.

POINSART D., 1994. Gestion des systèmes fluviaux aménagés : structure des dépôts et mobilité des alluvions du lit dans les vieux Rhône de Miribel et Donzère-Mondragon. La Houille Blanche, 5-6 : 13-22.

POLITO P.J., SKLAR L.S., 2006. Correlating field and laboratory rates of particle abrasion, Rio Medio, Sangre de Cristo Mountains, New Mexico. Eos Trans. AGU, 87 (52), Fall Meeting Suppl., Abstract H51G-0554.

PREISSMANN A., 1961. Propagation of translatory waves in channels and rivers. Proc, First Congress of French Assoc, for Computation, Genoble, France. 433-442 p.

PRIDMORE R.D., ROPER D.S., 1985. Comparison of the macroinvertebrate faunas of runs and riffles in three New Zealand streams. New Zealand journal of marine and freshwater research 19: 283-291.

PROVANSAL M., VELLA C., ARNAUD-FASSETTA G., SABATIER F., MAILLET G., 2003. Role of the fluvial sediment in put in the mobility of the Rhône delta coast, (France). Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement, 4, p.271-282.

PROVANSAL M., RACCASI G., MONACO M., ROBRESCO S. DUFOUR S., 2012. La réhabilitation des marges fluviales, quel intérêt,

quelles contraintes ? Le cas des annexes fluviales du Rhône aval. Méditerranée (118), 85-94.

PROVANSAL M., DUFOUR S., SABATIER F., ANTHONY E.J., RACCASI G., ROBRESCO S., 2014. The geomorphic evolution and sediment balance of the lower Rhône River (southern France) over the last 130 years: Hydropower dams versus other control factors. Geomorphology, 219 27–41.

RACCASI G., 2008. Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, recherches en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues. Thèse de Géographie physique, Aix-Marseille Université, 334 p.

RECKING, A., 2008. Variation du nombre de Shields critique avec la pente, La Houille Blanche, 5, 59-63.

RECKING A., FREY P., PAQUIER A., BELLEUDY P., CHAMPAGNE J.Y., 2008. Feedback between bed load and flow resistance in gravel and cobble bed rivers, Water Resources Research, 44, 21.

RECKING A., 2009. Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bed load motion, Water Resour. Res., 45, 16 p.

RECKING, A., 2010. A comparison between flume and field bedload transport data and consequences for surface based bedload transport prediction. Water Resources Research, 46, 16 p.

RECKING A., LIEBAULT F., PETEUIL C., JOLIMET T., 2010. Evaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle. PGRN 2008, Rapport Final, CEMAGREF-RTM 41 p.

RENGERS F., WOHL E., 2007. Trends of grain sizes on gravel bars in the Rio Chagres, Panama. Geomorphology, 83: 282-293.

REYNOLDS C.S., CARLING P.A., BEVEN K.J., 1991. Flow in river channels: new insights into hydraulic retention. Archiv für Hydrobiologie, 121 (2): 171-179.

RICE S.P., CHURCH M., 1996. Sampling surficial fluvial gravels: the precision of size distribution percentile estimates. Journal of Sedimentary Research, 66: 654-665.

RICE S.P., CHURCH M., 1998. Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. Earth Surface Processes and Landforms, 23: 345-363.

RICE S.P., 1999. The nature and controls on downstream fining within sedimentary links. Journal of Sedimentary Research, 69: 32-39.

RICHARDS K.S., 1976. The morphology of pool-riffle sequences. Earth Surface Processes and Landforms 1, 87–95.

RICHARDS K.S., CLIFFORD N., 1991. Fluvial geomorphology: structured beds in gravelly rivers. Progress in Physical Geography, 15 (4): 407-422.

RICHARD G.A, JULIEN P.Y., 2003. Dam impacts on and restoration of an alluvial river-Rio Grande, New Mexico. International Journal of Sediment Research, 18 (2) : 89-96.

RICKENMANN D., 1991. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. J. Hydraul. Eng., 117, 1419–1439.

RIQUIER J., *in prep*. Réponses hydrosédimentaires de chenaux latéraux restaurés du Rhône français. Structures spatiales et dynamiques temporelles des patrons et des processus, pérennité et recommandations opérationnelles Thèse de Doctorat, Université de Lyon.

RINALDI M., SIMON A., 1998. Bed-level adjustments in the Arno River, central Italy. Geomorphology, 22 : 57-71.

ROLLET A.J., 2007. Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. Thèse de Doctorat, Université Jean Moulin, Lyon 3, 305 p.

RUSSELL R.D., 1939. Effects of transportation on sedimentary particles. In: Trask P.D [eds], Recent Marine Sediments, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 33-47.

SABATIER F., MAILLET G., PROVANSAL M., FLEURY T.J., SUANEZ S., VELLA C., 2006. Sediment budget of the Rhône delta shoreface since the middle of the 19th century. Mar. Geol. 234, 143–157.

SARKER L.K., HOSSAIN M.M, 2006. Shear stress for initiation of motion of median sized sediment of no uniform sediment mixtures. Journal of Civil Engineering, 34 (2), p.103-114.

SCHMIDT J.C., WILCOCK P.R., 2008. Metrics for assessing the downstream effects of dams. Water Resources Research, 44, W04404, doi: 10.1029/2006WR005092.

SCHOENEBERGER P.J., WYSOCKI D.A., BENHAM E.C., BRODERSON W.D., 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE

SCHOKLITSCH A., 1962. Handbuch des Wasserbaus (in German). 3rd ed., Springer, Vienna.

SCHUMM S.A., 1969. River metamorphosis. ASCE Journal of the Hydraulics Division, HY1 : 255-273.

SCHUMM S.A., 1977. The fluvial systems. John Wiley and Sons, New-York, 338 p.

SCOTT M.L., SHAFROTH P.B., AUBLE G.T., 1999. Responses of riparian cottonwoods to alluvial water table declines. Environmental Management, 23 (3) : 347-358.

SEAL R., PAOLA C., PARKER G., SOUTHARD J.B., WILCOCK P.R. 1997. Experiments on Downstream Fining of Gravel : I.Narrow-Channel Runs. Journal of Hydraulic Engineering, 123 : 874-884.

SEAR D.A., NEWSON M.D., 1993. Sediment and gravel transportation in rivers, including the use of gravel traps. Final Report n°c5/384/2, National River Authority.

SEAR D.A., 1995. Morphological and sedimentological changes in a gravel-bed river following 12 years of flow regulation for hydropower. Regulated Rivers : Reasearch and Management, 10, p. 247-264.

SHIELDS A., 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung, Technischen Hochschule, Berlin.

SIMON A., 1992. Energy, time and channel evolution in catastrophicallydisturbed fluvial systems. Geomorphology, 5 (3-5), p.345-372.

SIMON A., DARBY S.E., 1999. The nature and significance of incised river channel. In: Darby S.E. & Simon A., [eds], Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management. John Wiley & Sons, Chichester, 3-18.

SINGER M.B., 2008. A new sampler for extracting bed material sediment from sand and gravel beds in navigable rivers - Earth Surface Processes and Landforms, 33, 2277-2284.

SMART G.M., JAEGGI M.N.R., 1983. Sediment transport on steep slopes. Mitteilungen n°64, Der Versuchsanstalt fuer Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidg. Techn. Hochschule Zuerich, Zurich, p.89-191.

SOGREAH, 1991. Etude générale sur les seuils de correction torrentielle et les plages de dépôts (Couvert, B. Lefebvre, B. Lefort, Ph. Morin, E.). Houille Blanche, 6, 449-456.

SOGREAH-EGR, 2000-V1D1A1. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône - Rapport général de 1ère étape. V1-D1-A1, 209 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône - Synthèse hydrologique de 1ère étape. V1-D1-A1, 40 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A8. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, Modélisation hydraulique hors Delta. Histoire de l'aménagement du fleuve - Pierre-Bénite 1960-1966. V2-D1-A8, 50 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A9. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, Modélisation hydraulique hors Delta. Histoire de l'aménagement du fleuve - Vaugris 1971-1980. V2-D1-A9, 48 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A15. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, Modélisation hydraulique hors Delta. Histoire de l'aménagement du fleuve – Donzère-Mondragon 1944-1952. V2-D1-A15, 46 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A16. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, Modélisation hydraulique hors Delta. Histoire de l'aménagement du fleuve - Montélimar 1950-1957. V2-D1-A16, 47 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V2D1A17. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, Modélisation hydraulique hors Delta. Histoire de l'aménagement du fleuve - Caderousse 1969-1975. V2-D1-A17, 49 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A1. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide - Rapport de synthèse. V3D1A1, 76 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide - Synthèse de première étape. V3-D1-A2, 40 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, 1ère étape : Diagnostique de l'état actuel : Calcul du transport solide. V3-D1-A4, 59 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, 1ère étape : Diagnostique de l'état actuel : Analyse des affluents. V3-D1-A5, 57 p.

SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A6. Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, 1ère étape : Diagnostique de l'état actuel : Bilan des extractions. V3-D1-A6, 57 p.

SOUCHON Y., 2011. Sédiments et fonctionnement écologique dans les cours d'eau. Séminaire Gestion du transport sédimentaire en rivière, Pôle hydrogéologique des cours d'eau, ONEMA-CEMAGREF Lyon MAEP-LHQ, Toulouse, 31 mai – 1er juin 2011, 44p.

SOUCHON Y., NICOLAS V., 2011. Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux. Onema & Cemagref, Vincennes, Antony, 28 p.

SOULSBY R.L., WHITEHOUSE R.J.S., (1997). Threshold of Sediment Motion in Coastal Environments. In: Pacific Coasts and Ports '97: Proceedings of the 13th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 6th Australasian Port and Harbour Conference; Volume 1. Christchurch, N.Z.: Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, 1997: [145]-[150].

STERNBERG H., 1875. Untersuchungen Über Längenund Querprofil geschiebeführender Flüsse. Zeitschrift für Bauwesen, XXV: 483-506.

STILLWATER SCIENCES, 2002. Merced River corridor restoration plan. Stillwater Sciences, Berkeley, 245 p.

STILLWATER SCIENCES, 2005. Conceptual restoration design for the Merced River Ranch. Volume I: conceptual design report. Merced River Corridor Restoration Plan Phase IV: Dredger Tailings Reach, Technical Memorandum n° 6, Stillwater Sciences, Berkeley, 141 p.

STILLWATER SCIENCES, 2006. Merced River Ranch channel floodplain restoration: post implementation monitoring plan. Merced River Corridor Restoration Plan Phase IV: Dredger Tailings Reach, Technical Memorandum n° 9, Stillwater Sciences, Berkeley, 72 p.

SUKHODOLOV A., UIJTTEWAAL W.S.J., ENGELHARDT C., 2002. On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields. Earth Surface Processes and Landforms, 27: 289-305.

SURIAN N., 1999. Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. Earth Surface Processes and Landforms, 24: 1135-1151.

SURIAN N., 2000. Sediment size in a gravel-bed river (Piave River, Italy): longitudinal, vertical and temporal variability. In: Lenzi M.A. [eds], Dynamics of Water and Sediments in Mountain Basins, Quaderni di Idronomia Montana, 20: 131-143.

SURIAN N., 2002. Downstream variation in grain size along an Alpine river: analysis of controls and processes. Geomorphology, 43: 137-149.

SURIAN N., RINALDI M., 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. Geomorphology, 50: 307-326.

SURIAN N., CISOTTO A., 2007. Channel adjustments, bedload transport and sediment sources in a gravelbed river, Brenta River, Italy. Earth Surface Processes and Landforms, 32 : 1641-1656.

THOMPSON D.M., 2002. Long-term effect of instream habitat-improvement structures on channel morphology along the Blackledge and Salmon Rivers, Connecticut, USA. Environmental Management, 29: 250-265. doi: 10.1007/s00267-001-0069-0.

THORNE C.R., 1997. Channel types and morphological classification. In: Thorne C.R., Hey R.D., Newson M.D. [eds], Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management, John Wiley & Sons, Chichester, 175-222.

TROUSSIER T., 2012. Etude des ajustements du profil en long du Rhône sur un tronçon allant de la confluence avec la Drôme à la confluence avec l'Ardèche. Mémoire de Master 1. Faculté des Sciences Aix-Marseille Université, réalisé au laboratoire du CEREGE – OSR, 37 p.

VALVERDE L. (2012), Sédiments et fonctionnement écologique des cours d'eau. Présentation du Réseau d'Observation des Sédiments de la Loire et de ses Affluents (OSLA), site INFO-SED, outil de connaissances partagées des sédiments du bassin de la Loire (Site Internet officiel : http://info-sed.plan-loire.fr/letude-des-sediments-a-large-echelle/).

VAN RIJN L.C., 1984. Sediment transport, Part I: Bedload transport. Journal of Hydraulic Engineering, 110, 14311457.

VAUDOR L., PARROT E., PIEGAY H., 2013. Describing and detecting changes at various scales in geomorphological features: the example of the Rhone river talweg elevation. Poster, AGU Fall Meeting, San Francisco, 9-13 December 2013.

WASSON J.G., BONNARD R., MARIDET L., 1995. Réponses globales des invertébrés benthiques aux conditions d'habitat physique dans les cours d'eau salmonicoles : perspectives d'intégration dans les modèles habitat/poissons. Bull. Fr. Pêche Piscic., 337 p.

WASSON J.G., MALAVOI J.R., MARIDET L., SOUCHON Y., PAULIN L., 1998. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Cemagref eds, Coll. « Etudes » : Gestion des milieux aquatiques, n° 14, 158 p.

WEITBRECHT V., 2004. Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers. Thèse de Doctorat, Université de Karlsruhe, 129 p.

WENTWORTH C.K., 1922. A scale grade and class terms for clastic sediments. Journal of Geology, 30: 377-392.

WERRITY A., 1992. Downstream fining in a gravel bed river in Southern Poland: lithological controls and the role of abrasion. In: Billi P., Hey R.D., Thorne C.R., Tacconi P. [eds], Dynamics of Gravel-Bed Rivers, John Wiley & Sons, Chichester, 333-346.

WHITCHER B., GUTTORP P., PERCIVAL D.B., 2000. Multiscale detection and location of multiple variance changes in the presence of long memory. Journal of Statistical Computation and Simulation, Vol. 68 (1), p.65-87.

WHITING P.J., KING J.G., 2003. Surface particle sizes on armoured gravel streambeds : effects of supply and hydraulics. Earth Surface Processes and Landforms, 28 : 1459-1471.

WHITE C.M., 1940. The equilibrium of grains on the bed of a stream. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 174, 322–338.

WHITE G.F., 1977. Environmental effects of complex river development. Westview boulder, USA, 172 p.

WILCOCK P.R., SOUTHARD J.B., 1988. Experimental study of incipient motion in mixed-size sediment. Water Resour. Res., 24, 1137–1151.

WILCOCK P.R., 1992. Flow competence: a criticism of a classic concept. Earth Surface Processes and Landforms, 17, p.289-298.

WILCOCK P.R., 1993. Critical shear stress of natural sediments. Journal of Hydraulic Engineering, 119 (4), p.194-505.

WILCOCK P.R., PITLICK J., CUI Y., 2009. Sediment transport primer: estimating bed-material transport in gravel bed rivers. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-226, 78 p.

WILLIAMS G.P., WOLMAN M.G, 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. USGS circular 781, 48 p.

WINGHART J., CHABERT J., 1965. Haut-Rhône à l'amont de Lyon : étude hydraulique de l'île de Miribel-Jonage. La Houille Blanche, 7, p.1-21.

WOLMAN M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. Transactions American Geophysical Union, 35 (6), p. 951-956.

WOLMAN M.G., 1955. The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania. USGS Professional Paper, 271.

YALIN M.S., 1977. Mechanics of Sediment Transport. 2nd ed., Pergamon, New York.

YANG C.T., 1971. Formation of riffles and pools. Water Resources Research, 7, 1567.

YANG C.T., 1984. Unit stream power equation for gravel. Journal of Hydraulic Engineering, 110, 1783-1797.

YOSSEF M.F.M., DE VRIEND H.J., 2010. Sediment exchange between a river and its groyne fields: a mobile-bed experiment. Journal of Hydraulic Engineering, 136 (9): 610-625.

TABLE DES FIGURES

FIGURE-1 : SCHEMA DE L'ORGANISATION GENERALE DES TRAVAUX DE THESE 19
FIGURE 1-1 : L'HYDROSYSTEME, UN SYSTEME COMPLEXE A TROIS DIMENSIONS BIDIRECTIONNELLES : AMONT-AVAL, CHENAL-MARGES, SURFACE-SOUTERRAIN (PIEGAY ET SCHUMM, 2003) 22
FIGURE 1-2 : INTERACTIONS ENTRE LES VARIABLES HIERARCHISEES DU SYSTEME FLUVIAL, RETROACTIONS (FLECHES VERTES) ET LES ACTIONS ANTHROPIQUES (FLECHES ROUGES) (D'APRES THORNE, 1997 ET BLEDSOE, 2010, MODIFIE PAR ARNAUD, 2012). .. 23
FIGURE 1-3 : BALANCE DE LANE (1955) ILLUSTREE PAR BORLAND (1960) (MODIFIE, D'APRES BLEDSOE, 2010 ET ARNAUD, 2012) 24
FIGURE 1-4 : REPRESENTATION THEORIQUE DE LA REPONSE D'UN SYSTEME FLUVIAL SUITE A LA MODIFICATION SOUDAINE D'UNE VARIABLE DE CONTROLE (D'APRES KNIGHTON, 1984, MODIFIE PAR ROLLET, 2007) 25
FIGURE 1-5 : DESEQUILIBRE DE LA BALANCE AVEC L'ANTHROPISATION DES COURS D'EAU (MODIFIE, D'APRES BLEDSOE, 2010 ET ARNAUD, 2012) 26
FIGURE 1-6 : CONSEQUENCES DE LA REGULARISATION D'UN COURS D'EAU : COMPARAISON DES MORPHOLOGIES ET DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES ENTRE UN SEGMENT NATUREL ET UN SEGMENT CHENALISE. MODIFIE D'APRES CORNING (1975) ET WASSON ET AL. (1995). 30
FIGURE 1-7 : PROCESSUS DE PIEGEAGE DE LA CHARGE DE FOND PAR LE CREUSEMENT D'UNE FOSSE D'EXTRACTION (IRS, 2000) 31
FIGURE 1-8 : PROCESSUS D'EROSION PROGRESSIVE ET REGRESSIVE SUITE AU CREUSEMENT D'UNE FOSSE D'EXTRACTION (E. PARROT) 32
FIGURE 1-9 : MODELE CONCEPTUEL MONTRANT LA COMPLEXITE DES INTERRELATIONS ENTRE LES FACTEURS GEOMORPHOLOGIQUES CLES DU CHENAL PRINCIPAL ET DE SES AFFLUENTS A L'AVAL D'UN BARRAGE (D'APRES PHILLIPS, 2003, DANS ROLLET, 2007) .. 34
FIGURE 1-10 : REPRESENTATION DES ECHELLES DE TEMPS CARACTERISTIQUES DES VARIATIONS MORPHOLOGIQUES ET DES EVENEMENTS HYDROLOGIQUES (BELLEUDY, 2001) 35
FIGURE 1-11 : ECHELLES SPATIALES ET TEMPORELLES DE L'AJUSTEMENT DES FORMES FLUVIALES (AMOROS ET PETTS, 1993, D'APRES KNIGHTON, 1984) 36
FIGURE 1-12 : MODELE CONCEPTUEL DES LIENS ENTRE LES COMPARTIMENTS PHYSIQUES ET BIOLOGIQUES DANS LES SYSTEMES ALLUVIAUX (ARNAUD, 2012, D'APRES STILLWATER SCIENCES, 2005) 37
FIGURE 1-13 : TYPOLOGIE DES INTERVENTIONS HUMAINES TOUCHANT LE MILIEU PHYSIQUE D'EAU COURANTE. ADAPTEE PAR WASSON ET AL. (1995) D'APRES BROOKES (1985) ET MALAVOI (1990). 40
FIGURE 1-14 : PRINCIPALES OPTIONS DE RESTAURATION PHYSIQUE DES COURS D'EAU SELON LA NATURE DES ALTERATIONS HYDRO-MORPHOLOGIQUES (MODIFIE PAR ARNAUD, 2012, D'APRES HABERSACK ET PIEGAY, 2008) 41
FIGURE 2-1 : REGIONALISATION DU BASSIN VERSANT DU RHONE EN SOUS-BASSINS HYDROLOGIQUES. MODIFIE D'APRES OLIVIER ET AL. (2009) 49
FIGURE 2-2 : LE BASSIN DU RHONE A L'AVAL DU LEMAN, SON RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET SON OROGRAPHIE. 53
FIGURE 2-3 : CARTE LITHOLOGIQUE SIMPLIFIEE DU BASSIN VERSANT DU RHONE, REALISEE A PARTIR DE LA CARTE LITHOLOGIQUE AU 1/1 000 000 DU BRGM (DISPONIBLE SUR LE SITE INFOTERRE.BRGM.FR) 55
FIGURE 2-4 : LA GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU RHONE, (ARNAUD-FASSETTA, 1998) 56
FIGURE 2-5 : ECHELLE STRATIGRAPHIQUE INTERNATIONALE REALISEE EN 2008 PAR L' « INTERNATIONAL COMMISSION ON STRATIGRAPHY » ET TRADUITE PAR E. LE FOL (2009) 57
FIGURE 2-6 : RISQUES DE CRUES SIMULTANEES ENTRE A) L'AFFLUENT ET LE RHONE (TOUS TYPES DE CRUES CONFONDUES – SERIES 1920 A 1998) ET B) LES AFFLUENTS PAR TYPOLOGIE DE CRUE (SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1) 58
FIGURE 2-7 : EVOLUTION DES SUPERFICIES DRAINEES ET DE L'ABONDANCE ANNUELLE DU RHONE (BRAVARD ET CLEMENS, 2008) ... 61
FIGURE 2-8 : DEBITS DE POINTE DES AFFLUENTS POUR LES CRUES DE PERIODE DE RETOUR 10, 100 ET 1000 ANS (SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1) 62
FIGURE 2-9 : QUELQUES EXEMPLES DE ZONES DE TRESSAGE SUR LE RHONE 68
FIGURE 2-10 : PROFIL LONGITUDINAL DE LA LIGNE D'EAU DU RHONE A L'ETIAGE DE 1867-1868 SUR LE HAUT-RHONE ET DE 1902-1903 SUR LE BAS-RHONE, ENTRE SEYSSEL ET LA MER 71
FIGURE 2-11 : VARIATIONS DE LA PENTE KILOMETRIQUE DE LA LIGNE D'EAU DU RHONE A L'ETIAGE DE 1867-1868 SUR LE HAUT-RHONE ET DE 1902-1903 SUR LE BAS-RHONE (ENTRE SEYSSEL ET LA MER). DONNEES ANTERIEURES AUX GRANDS AMENAGEMENTS. MODIFIEE D'APRES MALAVOI ET BRAVARD (2010), ISSUE DE BRAVARD (2010) 72

FIGURE 2-12 : ATTELAGE DE CHEVAUX REMONTANT DES BATEAUX SUR LE RHONE (1831), PAR ALEXANDRE DUBUISSON (1805-1870). COLL. SYLVESTRE, MUSEE DES BEAUX-ARTS DE LYON. 74
FIGURE 2-13 : CARACTERISTIQUES DES HAUTS-FONDS DE TYPE BON (1) ET MAUVAIS (2) PASSAGES HYDRAULIQUES POUR LA NAVIGATION. MODIFIE D'APRES CHAMBOREDON (S.D.) IN PERIAL (2012). 77
FIGURE 2-14 : L'AMENAGEMENT A COURANT LIBRE PAR LA METHODE GIRARDON. REALISE PAR DELAHAYE (2009), D'APRES BETHEMONT (1972). 78
FIGURE 2-15 : VUE AERIENNE D'UN SYSTEME DE CASIERS (OU CARRES) DIT GIRARDON QUE FORME L'ENSEMBLE « TENON-DIGUE » AVANT LEUR SEDIMENTATION. 79
FIGURE 2-16 : PROFIL EN LONG D'UN EPI PLONGEANT DANS LE CHENAL (POINSART ET SALVADOR, 1993) 79
FIGURE 2-17 : RESSERREMENT DU LIT ET MODIFICATION DE L'AXE DU CHENAL POUR FAVORISER LA NAVIGATION PAR AMENAGEMENT D'EPIS NOYES, D'EPIS PLONGEANTS ET DE SEUILS DE FOND SELON LE SYSTEME GIRARDON (BRAVARD ET CLEMENS, 2008, D'APRES POINSART ET SALVADOR, 1993). 80
FIGURE 2-18 : PROFIL EN LONG D'UN EPI NOYE DANS LE CHENAL (POINSART ET SALVADOR, 1993) 81
FIGURE 2-19 : PROFIL EN LONG D'UN SEUIL DE FOND DANS LE CHENAL (POINSART ET SALVADOR, 1993) 81
FIGURE 2-20 : EVOLUTION DU RHONE A PIERRE-BENITE ENTRE 1881 ET 1920 (POINSART ET SALVADOR, 1993) 83
FIGURE 2-21 : EVOLUTION DU TRACE DU RHONE A DONZERE-MONDRAGON ENTRE 1780 ET 1947 (POINSART, 1992) 83
FIGURE 2-22 : CARTE DES AMENAGEMENTS DE LA COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE DEPUIS LA FRONTIERE SUISSE A LA MER (DELAHAYE, 2009) 86
FIGURE 2-23 : AMENAGEMENT CNR TYPE SUR LE RHONE (PHOTOTHEQUE CNR DANS BRAVARD ET CLEMENS, 2008) 88
FIGURE 2-24 : HYDROGRAMMES DU RHONE ET DES CANAUX DE MIRIBEL ET JONAGE POUR L'ANNEE 1986 (POINSART ET AL., 1989) 88
FIGURE 2-25 : PROFIL LONGITUDINAL DE LA LIGNE D'EAU CONTROLEE PAR LES BARRAGES DE LA CNR (BRAVARD ET CLEMENS, 2008) 89
FIGURE 2-26 : CHANGEMENT DU PROFIL TRANSVERSAL DU RHONE A LA SUITE DES DIFFERENTS TRAVAUX DE RECTIFICATION DE SON COURS DEPUIS 1850. A – 1870 : PROFIL AVANT LES ENDIGUEMENTS GIRARDON ; B – 1970 : PROFIL UN SIECLE APRES LES PREMIERS ENDIGUEMENTS GIRARDON ; C – PROFIL APRES L'AMENAGEMENT CNR (FRUGET, 2003, IN PERSAT ET AL., 1995).95
FIGURE 2-27 : EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES PLAINES ALLUVIALES DE CHAUTAGNE SUR LE HAUT-RHONE (A - D'APRES KLINGEMAN ET AL., 1998) ET DE PEAGE-DE-ROUSSILLON SUR LE RHONE MOYEN (B - D'APRES FRUGET, 1989) AVANT LES ENDIGUEMENTS DU 19IEME SIECLE, APRES LES ENDIGUEMENTS DU 19IEME SIECLE ET APRES LES AMENAGEMENTS CNR. TIRE DE FRUGET (2003) 97
FIGURE 2-28 : EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA PLAINE ALLUVIALE DE MIRIBEL-JONAGE A) 1847, AVANT AMENAGEMENT – B) 1857-66, APRES ACHEVEMENT DE L'ENDIGUEMENT – C) 1930, APRES LA CONSTRUCTION DU CANAL DE JONAGE ET UN IMPORTANT ASSECHEMENT DE LA PLAINE ENTRE LES DEUX CANAUX – D) 1980, L'ETAT ACTUEL. (POINSART ET AL. 1989) 98
FIGURE 3-1 : SCHEMA THEORIQUE DE L'EVOLUTION AMONT-AVAL D'UN COURS D'EAU ET DES CARACTERISTIQUES DES TROIS GRANDES VARIABLES DE REPONSE : PENTE, STYLE FLUVIAL, GEOMETRIE EN TRAVERS (MALAVOI ET BRAVARD, 2010). 103
FIGURE 3-2 : SCHEMA DE L'EROSION REGRESSIVE PAR RAPPORT AUX VARIATIONS DU NIVEAU DE BASE DU COURS D'EAU (PARROT). 104
FIGURE 3-3 : BASCULEMENT DU PROFIL EN LONG SUITE A UNE REDUCTION DRASTIQUE DU DEBIT SOLIDE (MALAVOI ET BRAVARD, 2010) 104
FIGURE 3-4 : REPRESENTATIONS SCHEMATIQUES EN PLAN DES ALTERNANCES DE FACIES TYPIQUES DE SUBSTRATS ALLUVIONNAIRES A FAIBLES DEBITS : (A) SUCCESSION DE CASCADES PRESENTANT DES DEBITS TURBULENTS AUTOUR DES BLOCS ; (B) ALTERNANCE DE PLATS-MOUILLES AVEC DES ZONES TURBULENTES AU NIVEAU DES PLATS, ET PLUS CALMES AU NIVEAU DES MOUILLES ; (C) PLAT PRESENTANT UN FLUX UNIFORME ; (D) ALTERNANCE SEUIL-MOUILLE AVEC DES DEBITS IMPORTANTS SUR LES SEUILS ET FAIBLES AU NIVEAU DES MOUILLES ; (E) ALTERNANCE DUNES-RIDES FORMES EN FONCTION DE LA DIRECTION DU COURANT. MONTGOMERY ET BUFFINGTON (1997). 108
FIGURE 3-5 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROFIL LONGITUDINAL DES CINQ ALTERNANCES DE FACIES TYPE : (A) CASCADES ; (B) PLATS-MOUILLES ; (C) PLAT ; (D) SEUILS-MOUILLES ; (E) DUNES-RIDES. MONTGOMERY ET BUFFINGTON (1997). 108
FIGURE 3-6 : UN EXEMPLE DE PROFIL EN TRAVERS DU CHENAL DU RHONE A PARTIR DUQUEL LE TALWEG A ETE EXTRAIT. 109
FIGURE 3-7 : BILAN DES DONNEES BATHYMETRIQUES DISPONIBLES A LA CNR DEPUIS LES DERNIERS AMENAGEMENTS (UN PROFIL EN TRAVERS TOUS LES 500 M) 110
FIGURE 3-8 : EXEMPLES DE CARTES BATHYMETRIQUES DU CHENAL DATANT DE 1897, ENTRE LE BK 76 ET BK 93. 112

FIGURE 3-9 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE REALISE ENTRE LES PROFILS EN LONG CORRESPONDANT A CHAQUE PERIODE D'ETUDE (AVANT/APRES AMENAGEMENTS-CRUES MORPHOGENES)..... 114
FIGURE 3-10 : CUMUL DU DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE INTERANNUEL EN CHAQUE POINT DU PROFIL EN LONG REPRESENTE PAR LES PK (EVOLUTION NETTE DES ALTITUDES Z AU COURS DU TEMPS), DEPUIS LES IMPLANTATIONS DES BARRAGES (A PARTIR DE 1951) A NOS JOURS (2011) (=SOMME DES VARIATIONS ALTIMETRIQUES ENTRE TOUTES LES DATES DISPONIBLES). ZONE EN AMONT DE LYON, REPRESENTATION DES SECTEURS DE GENISSIAT (GEN), SEYSSEL (SEY), CHAUTAGNE (CHA), BELLEY (BEL), BREGNIER-CORDON (BRC), SAULT-BRENAZ (SBR) ET L'AIN (AIN)..... 118
FIGURE 3-11 : PROFILS EN LONG DEPUIS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES DANS LES SECTEURS DE GENISSIAT ET SEYSSEL (EXTRAITS BD BATHY CNR)..... 119
FIGURE 3-12 : PROFILS EN LONG DEPUIS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES DANS LES SECTEURS DE SEYSSEL, CHAUTAGNE ET BELLEY (EXTRAITS BD BATHY CNR)..... 120
FIGURE 3-13 : PROFILS EN LONG DEPUIS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES DANS LES SECTEURS DE BELLEY ET BREGNIER-CORDON (EXTRAITS BD BATHY CNR)..... 122
FIGURE 3-14 : PROFILS EN LONG DEPUIS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES DANS LES SECTEURS DE BREGNIER-CORDON ET SAULT-BRENAZ (EXTRAITS BD BATHY CNR) 123
FIGURE 3-15 : EVOLUTION NETTE DES ALTITUDES Z EN CHAQUE POINT DU PROFIL EN LONG (REPRESENTE PAR LES PK) AU COURS DU TEMPS, DEPUIS LES IMPLANTATIONS DES BARRAGES (A PARTIR DE 1951) A NOS JOURS (2011) (=SOMME DES VARIATIONS ALTIMETRIQUES ENTRE TOUTES LES DATES DISPONIBLES). ZONE EN AVAL DE LYON, REPRESENTATION DES SECTEURS DE LYON-MIRIBEL (LYM), PIERRE-BENITE (PBN), VAUGRIS (VAU), PEAGE DE ROUSSILLON (PDR), SAINT-VALLIER (VAL), BOURG-LES-VALENCE (BLV), BEAUCHASTEL (BEA), BAIX-LE-LOGIS NEUF (BLN), MONTELIMAR (MON), DONZERE-MONDRAGON (DZM), CADEROUSSE (CAD), AVIGNON (AVI), BEAUCAIRE (BEC) ET GRAND RHONE (GRO)..... 125
FIGURE 3-16 : EVOLUTION NETTE DES PROFILS EN LONG DE 1957 A 2010 A L'AVAL DE LYON ENTRE LES PK 126 ET 204, ENTRE LA DROME ET L'ARDECHE. LES VARIATIONS SONT ETUDIEES AU NIVEAU DES BARRAGES DU POUZIN (BAIX-LE LOGIS NEUF), DE ROCHEMAURE (MONTELIMAR) ET DE DONZERE (DONZERE-MONDRAGON). LES AFFLEUREMENTS ROCHEUX SONT SYMBOLISES PAR UN TRIANGLE. REALISE PAR TROUSSIER (2012). 126
FIGURE 3-17 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE ENTRE TOUS LES POINTS DE LYON A LA MER, ENTRE LE PROFIL DE 1897-1907/08 ET LE PROFIL RECENT (PERIODE 0) 128
FIGURE 3-18 : COMPARAISON DES MOYENNES MOBILES (D'ORDRE 10 EN TRAITS PLEINS) ET DE LEURS COURBES DE TENDANCE (POLYNOMIALES D'ORDRE 6 EN POINTILLES) DES DIFFERENTIELS ALTIMETRIQUES DE LYON A LA MER POUR LA PERIODE 1 (FIGURE 3-21), LA PERIODE 2 (FIGURE 3-23) ET LA PERIODE 3 (FIGURE 3-25). LES VALEURS DE LA PERIODE 2 INCISEES PAR LES EXTRACTIONS ONT ETE CORRIGEES..... 129
FIGURE 3-19 : LES MOYENNES MOBILES (ORDRE 10 TRAIT PLEIN) ET LEURS COURBES DE TENDANCE (POLYNOMIALES D'ORDRE 6 EN POINTILLES) DES VITESSES DE VARIATIONS ALTIMETRIQUES DES PERIODES 1 A 3. LES VALEURS DE LA PERIODE 2 INCISEES PAR LES EXTRACTIONS ONT ETE CORRIGEES..... 130
FIGURE 3-20 : CUMUL DES EVOLUTIONS VERTICALES TOTALES DU FOND DU LIT OBSERVEES TOUS LES 500 M ENTRE 1897/1907 ET 2007/2010 SUR LE RHONE DE LYON A LA MER. LE PROFIL EN LONG ACTUEL A ETE TRACE EN PARALLELE AFIN DE SOULIGNER LA DIFFERENCE DES VALEURS ALTIMETRIQUES ENTRE LE PROFIL CUMULE ET NORMAL. 131
FIGURE 3-21 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE ENTRE TOUS LES POINTS DE LYON A LA MER POUR LA PERIODE 1 (AVANT LA CONSTRUCTION DES AMENAGEMENTS CNR)..... 132
FIGURE 3-22 : CUMUL DES EVOLUTIONS VERTICALES DU FOND DU LIT OBSERVEES TOUS LES 500 M ENTRE DEUX DATES SUR LE RHONE DE LYON A LA MER : EN BLEU LA PERIODE CORRESPONDANT AUX AMENAGEMENTS GIRARDON, AVANT LES BARRAGES [1897/1907-08 - 1953/1981], EN ROUGE LA PERIODE APRES LA CONSTRUCTION DES BARRAGES [1953/1999 - 2007/2010], EN ORANGE LE PERIODE APRES LA CONSTRUCTION DES BARRAGES RECTIFIEE PAR RAPPORT AUX EXTRACTIONS, ET EN VERT LA PERIODE COUVRANT LES EFFETS DES CRUES DE 2001-2003 [1996/2000 - 2004/2007]. 135
FIGURE 3-23 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE ENTRE TOUS LES POINTS DE LYON A LA MER POUR LA PERIODE 2 (APRES LA CONSTRUCTION DES AMENAGEMENTS CNR) 138
FIGURE 3-24 : CUMUL DES EVOLUTIONS VERTICALES DU FOND DU LIT OBSERVEES TOUS LES 500 M ENTRE DEUX DATES SUR LE RHONE DE LYON A LA MER : EN ROUGE LA PERIODE APRES LA CONSTRUCTION DES BARRAGES [1953/1999 - 2007/2010], EN ORANGE LE PERIODE APRES LA CONSTRUCTION DES BARRAGES RECTIFIEE PAR RAPPORT AUX EXTRACTIONS, ET EN VERT LA PERIODE COUVRANT LES EFFETS DES CRUES DE 2001-2003 [1996/2000 - 2004/2007]. 139

FIGURE 3-25 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE ENTRE TOUS LES POINTS DE LYON A LA MER POUR LA PERIODE 3 (AVANT ET APRES LES CRUES DE 2001 A 2003) 142
FIGURE 3-26 : CUMUL DES EVOLUTIONS VERTICALES DU FOND DU LIT OBSERVEES TOUS LES 500 M SUR LE RHONE DE LYON A LA MER ENTRE LES DEUX DATES [1996/2000 & 2004/2007] COUVRANT LES EFFETS DES CRUES DE 2001-2003. 143
FIGURE 3-27 : PROFIL EN LONG DE LA PERIODE RECENTE ENTRE LA CONFLUENCE DE L'AIN ET LYON, EXTRAIT DE L'ANNEXE 4 146
FIGURE 3-28 : EVOLUTION DU PROFIL EN LONG (TALWEG) DU CANAL DE MIRIBEL (EN HAUT) ET BILAN DES EXTRACTIONS DE GRAVIERS SUR DIFFERENTS TRONÇONS DU SECTEUR (EN BAS). REALISE PAR POINSART (1994) D'APRES L'ETUDE EFFECTUEE PAR WINGHART ET CHABERT (1965) ET PAR LA COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE (CNR) 147
FIGURE 3-29 : EVOLUTION DU PROFIL EN LONG DU CANAL DE MIRIBEL ENTRE 1990 ET 1996 EN HAUT (MALAVOI, 2000 & 2008) ET ENTRE 1996 ET 2006 AU MILIEU (MALAVOI, 2008). EVOLUTION DU FOND MOYEN DU CANAL DE MIRIBEL ENTRE 2006 ET 2011 EN BAS (ARTELIA, 2012) 148
FIGURE 3-30 : AGRANDISSEMENT SUR UNE ZONE DE L'EXTRACTION DES PARAMETRES D'AMPLITUDE (A) ET DE LONGUEUR D'ONDE (Λ) DES MESO-FORMES, A PARTIR DE LA MOYENNE MOBILE DU PROFIL (VERT) ET LE PROFIL EN LONG DU RHONE (NOIR). 151
FIGURE 3-31 : PRETRAITEMENT DES PARAMETRES PHYSIQUES POUR L'ANALYSE STATISTIQUE. 152
FIGURE 3-32 : FREQUENCES DE REPARTITION DES CLASSES DE HAUTEUR (EN M) DE SEUIL (A) ET DE PROFONDEUR DE MOUILLE (B) ET LA FREQUENCE CUMULEE ASSOCIEE SUR L'ENSEMBLE DU RHONE. 155
FIGURE 3-33 : HAUTEURS MOYENNES DES SEUILS ET PROFONDEURS DES MOUILLES (EN M) PAR TRONÇON HOMOGENE. SEUIL (HAUTEUR MOYENNE TOTALE = 1,64 M – MINIMUM = 0,014 M – MAXIMUM = 17,7 M) – MOUILLE (PROFONDEUR MOYENNE TOTALE = 2,06 M – MINIMUM = 0,008 M – MAXIMUM = 27 M). POUR 76% DES TRONÇONS : PROFONDEUR DES MOUILLES > HAUTEUR DES SEUILS. 156
FIGURE 3-34 : PROFIL EN LONG DU RHONE SEGMENTE EN 55 TRONÇONS HOMOGENES EN TERMES DE PENTE MOYENNE ET MISE EN EVIDENCE DE SA STRUCTURE ET DES DIFFERENTES CONTRAINTES NATURELLES ET ANTHROPIQUES 157
FIGURE 3-35 : RESULTAT D'UNE CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE APPLIQUEE SUR LES COMPOSANTES D'UNE ACP REGROUPANT LES TRONÇONS HOMOGENES EN TROIS GROUPES. LES NUMEROS DE TRONÇON SONT REPRESENTES SUR LA FIGURE 3-34 159
FIGURE 3-36 : REPARTITION LONGITUDINALE DES CLASSES PAR TRONÇON HOMOGENE : VUE SCHEMATIQUE SUR LE LINEAIRE DU RHONE EN PLAN (A), PAR TRONÇON AMONT-AVAL EN FONCTION DE L'AMPLITUDE (B) ET DE LA LONGUEUR D'ONDE (C) NORMALISEES PAR LA LARGEUR (BOITES A MOUSTACHES) 160
FIGURE 3-37 : CARACTERISTIQUES DES CLUSTERS EN FONCTION DE LA TAILLE DES FORMES FLUVIALES ET DE LEUR VARIABILITE. 161
FIGURE 3-38 : EVOLUTION DIACHRONIQUE DES FORMES FLUVIALES DANS LE SECTEUR DE CHAUTAGNE ENTRE 1978 ET 2009 163
FIGURE 3-39 : EVOLUTION DIACHRONIQUE DES FORMES FLUVIALES DANS LE SECTEUR DE PIERRE-BENITE, ENTRE 1968 ET 2006 .. 164
FIGURE 3-40 : EVOLUTION DIACHRONIQUE DES FORMES FLUVIALES DANS LE SECTEUR DE DONZERE-MONDRAGON, ENTRE 1953-57 A 2007 165
FIGURE 3-41 : ORGANISATION LONGITUDINALE DE LA MORPHOLOGIE DU FOND DU LIT DU RHONE OBSERVEE A PARTIR DE L'ANALYSE DE LA VARIABILITE DE L'ALTITUDE A L'ECHELLE LOCALE (TOUS LES 500 M). L'AXE DES ORDONNEES REPRESENTE L'ALTITUDE ET L'AXE DES ABSCISSES LA DISTANCE AMONT – AVAL (LE 0 ETANT A LYON). LES VALEURS INDIQUEES CORRESPONDENT AUX ECARTS-TYPES MOYENS DES COEFFICIENTS D'ONDELETTES SOMMES POUR LES ECHELLES 600M ET 1200M. A) ETAT ACTUEL, B) ETAT EN 1897-1907 (DISPONIBLE UNIQUEMENT A L'AVAL DE LYON). REALISEE PAR VAUDOR, 2013. 167
FIGURE 4-1 : CARACTERISATION DES AXES PRINCIPAUX D'UNE PARTICULE (E. PARROT). 173
FIGURE 4-2 : A) DICHOTOMIE CHARRIAGE-SUSPENSION. B) COURBE DE HJULSTRÖM (1935). D'APRES MALAVOI ET BRAVARD (2010) 175
FIGURE 4-3 : PRODUCTION, TRANSFERT ET STOCKAGE DE LA CHARGE DE FOND, D'APRES SEAR ET NEWSON (1993) ET MODIFIE PAR MALAVOI ET BRAVARD (2010). LES DUREES DE STOCKAGE INDIQUEES SONT DES ORDRES DE GRANDEUR. 176
FIGURE 4-4 : VUE LONGITUDINALE (EN HAUT) ET PLANIMETRIQUE (EN BAS) D'UNE SEQUENCE SEUIL-MOUILLE. LE SEUIL EST LOCALISE AU DROIT DU BANC. D'APRES NEWBURY ET GABOURY (1993). 177
FIGURE 4-5 : VUE LONGITUDINALE (EN HAUT) ET EN PLAN (EN BAS) D'UNE SEQUENCE SEUIL-MOUILLE (=RIFFLE-POOL). ICI, LE LOBE FRONTAL DIAGONAL DU BANC (=BAR) CORRESPOND A LA PARTIE IMMERGEE DU SEUIL. CHURCH ET JONES (1982), MODIFIEE PAR BUNTE ET ABT (2001). 178

FIGURE 4-6 : LES STRATES COURAMMENT RENCONTREES AU SEIN DES COURS D'EAU A GRAVIERS : UN ARMURAGE, C'EST-A-DIRE UNE ARMURE SUPERPOSEE A UNE COUCHE DE SUBSURFACE (A GAUCHE), QUI SE DISTINGUE DU DEPOT SEDIMENTAIRE MEUBLE DE SURFACE RECOUVRANT UNE COUCHE SEDIMENTAIRE DE SUBSURFACE (A DROITE). D'APRES BUNTE ET ABT (2001). 182
FIGURE 4-7 : RESULTAT DU PROCESSUS SEGREGATIF OU UNE COUCHE DE SURFACE GROSSIERE RECOUVRE UNE COUCHE DE SUBSURFACE (CLICHES E. PARROT, 2012) 182
FIGURE 4-8 : SEDIMENTS ET FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE DES COURS D'EAU, MODIFIE PAR VALVERDE (2012) D'APRES SOUCHON (2011) 183
FIGURE 4-9 : (A) GABARIT A MAILLES CARREES ET (B) PIED A COULISSE (CLICHES E. PARROT, 2011) 184
FIGURE 4-10 : (A) DECOUVERTE DE LA COUCHE DE SUBSURFACE (CLICHE E. PARROT, 2012). (B) COMPTAGE ALEATOIRE REALISE DANS LA COUCHE DE SUBSURFACE EN PRESENCE DE FINES (CLICHE E. PARROT, 2012) 185
FIGURE 4-11 : TAMIS DE TERRAIN A MAILLES CARREES (CLICHE M. TAL, 2011) 186
FIGURE 4-12 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE EN LABORATOIRE NECESSITANT UN TAMISAGE A L'AIDE D'UNE COLONNE DE TAMIS SUR UNE SECOUEUSE (GAUCHE), LA SEPARATION DE CHAQUE CLASSE (HAUT) ET LEUR PESEE (BAS) (CLICHES E. PARROT, 2013) .. 187
FIGURE 4-13 : COOPER SCOOPER DEPLOYEE A PARTIR D'UN BATEAU ET TRACTEE A L'AIDE D'UN TREUIL (SINGER, 2008) 190
FIGURE 4-14 : A GAUCHE : PRELEVEURS COOPER SCOOPER (GRAND A GAUCHE ET PETIT A DROITE), CALIBRES PAR M. SINGER (AU MILIEU). EN HAUT : BATEAU DE L'IRSTEA UTILISE LORS DES ESSAIS ET LA GROSSE COOPER SCOOPER (CLICHES E. PARROT, 2011) 190
FIGURE 4-15 : RESULTATS DES PRELEVEMENTS-TESTS EFFECTUES SUR LE SECTEUR DE DONZERE-MONDRAGON PAR DIFFERENTES TECHNIQUES. LES D_{50} SONT PRESENTES EN FONCTION DES PK 191
FIGURE 4-16 : DRAGUE CNR SUSPENDUE A LA POTENCE LORS DE LA REMONTEE (A GAUCHE) ET SON CONTENU (A DROITE) (CLICHES E. PARROT, 2012) 192
FIGURE 4-17 : BATEAU DE LA CNR (CLICHE E. PARROT, 2012) 193
FIGURE 4-18 : A GAUCHE : PETITE CS REMONTEE AVEC QUELQUES PARTICULES. A DROITE : GRANDE CS REMPLIE AVEC LES SEDIMENTS REMONTES PAR LA DRAGUE CNR (CLICHES E. PARROT, 2012) 193
FIGURE 4-19 : EXEMPLE DE PRELEVEMENT REMONTE A LA DRAGUE DANS LE SECTEUR DE BELLEY (CLICHE E. PARROT, 2012) 195
FIGURE 4-20 : A. MESURES GRANULOMETRIQUES DES PARTICULES LES PLUS GROSSIERES REALISEES AVEC UN GABARIT DIRECTEMENT SUR LE BATEAU B. SYSTEME POUR PESER CHAQUE CLASSE DE TAILLES (CLICHES E. PARROT, 2012) 195
FIGURE 4-21 : REPARTITION DES D_{50} MESURES PAR COMPTAGES WOLMAN LORS DE LA CAMPAGNE D'ECHANTILLONNAGE DES BANCS EN 2011 197
FIGURE 4-22 : MESURE PAR COMPTAGE DU DIAMETRE MEDIAN (MM) DES ECHANTILLONS PRELEVES SUR LES BANCS ET DANS LE CHENAL AU NIVEAU DES TETES DE BANCS (2012) 200
FIGURE 4-23 : REPARTITION AMONT/AVAL DES INDICES DE PAVAGE CALCULES SUR LES TETES DE BANCS ET DANS LE CHENAL ADJACENT (CAMPAGNES REALISEES EN 2012) 201
FIGURE 4-24 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES D_{50} (ECHELLE LOGARITHMIQUE) DU LINEAIRE DU RHONE ETABLIE A PARTIR DES DONNEES DE TERRAIN (RT, RCC ET WOLMAN) ET DES DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES 203
FIGURE 4-25 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (D_{50} EN MM) DU FOND DU LIT DU RHONE DU SECTEUR DE GENISSIAT A BREGNIER-CORDON (PK -186 A -83). LES NUMEROS FONT REFERENCE AUX RESULTATS DES CAMPAGNES DE TERRAIN DE 2012 ET 2013 ET LES DONNEES ENTRE PARENTHESES AUX INDICES DE PAVAGE (RESULTATS DANS LES TABLEAU 4-1 & TABLEAU 4-2) 204
FIGURE 4-26 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (D_{50} EN MM) DU FOND DU LIT DU RHONE DU SECTEUR DE BREGNIER-CORDON A PIERRE-BENITE (PK -93 A 21). LES NUMEROS FONT REFERENCE AUX RESULTATS DES CAMPAGNES DE TERRAIN DE 2012 ET 2013 ET LES DONNEES ENTRE PARENTHESES AUX INDICES DE PAVAGE (RESULTATS DANS LES TABLEAU 4-1 & TABLEAU 4-2) 205
FIGURE 4-27 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (D_{50} EN MM) DU FOND DU LIT DU RHONE DU SECTEUR DE VAUGRIS A BEAUCHASTEL (PK 23 A 126). LES NUMEROS FONT REFERENCE AUX RESULTATS DES CAMPAGNES DE TERRAIN DE 2012 ET 2013 ET LES DONNEES ENTRE PARENTHESES AUX INDICES DE PAVAGE (RESULTATS DANS LES TABLEAU 4-1 & TABLEAU 4-2) 206
FIGURE 4-28 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (D_{50} EN MM) DU FOND DU LIT DU RHONE DU SECTEUR DE BAIX LE LOGIS NEUF A CADEROUSSE (PK 126 A 225). LES NUMEROS FONT REFERENCE AUX RESULTATS DES CAMPAGNES DE TERRAIN DE 2012 ET 2013 ET LES DONNEES ENTRE PARENTHESES AUX INDICES DE PAVAGE (RESULTATS DANS LES TABLEAU 4-1 & TABLEAU 4-2) 207
FIGURE 4-29 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (D_{50} EN MM) DU FOND DU LIT DU RHONE DU SECTEUR D'AVIGNON AU LITTORAL (PK 225 A 330). LES NUMEROS FONT REFERENCE AUX RESULTATS DES CAMPAGNES DE TERRAIN DE 2012 ET 2013 ET LES DONNEES ENTRE PARENTHESES AUX INDICES DE PAVAGE (RESULTATS DANS LES TABLEAU 4-1 & TABLEAU 4-2) 208

FIGURE 4-30 : REPARTITION GRANULOMETRIQUE DU DIAMETRE MEDIAN (D_{50} EN ECHELLE LOG) DES PRELEVEMENTS EFFECTUES DANS LE CHENAL DU RHONE EN BATEAU (RC&RCC) ET A PIED (RCC) – EN COLLABORATION AVEC LA CNR (2012-2013) – *ECHELLE LOG METTANT EN EVIDENCE LA DISTRIBUTION DES FINES* 211
FIGURE 4-31 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE LONGITUDINALE SUR LE PROFIL EN LONG ACTUEL DU RHONE (CAMPAGNES WOLMAN ET DRAGAGES CNR 2012-13). LE DIAMETRE DES CERCLES REPRESENTE LE D_{50} DE L'ECHANTILLON REDUIT A 12% DU D_{50} REEL (VALEURS CONSULTABLES TABLEAU 4-1 ET TABLEAU 4-2). 212
FIGURE 4-32 : REPARTITION GRANULOMETRIQUE DU DIAMETRE MEDIAN (D_{50} EN MM) DES PRELEVEMENTS EFFECTUES DANS LE CHENAL DU RHONE EN BATEAU (RC&RCC) ET A PIED (RCC) – EN COLLABORATION AVEC LA CNR (2012-2013) – *ECHELLE ARITHMETIQUE METTANT EN EVIDENCE LA REPARTITION DES SEDIMENTS GROSSIERS* 213
FIGURE 4-33 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE COMPARTIMENTEE EN QUATRE GRANDS SECTEURS. LA REPARTITION DES D_{50} DE CETTE SECTORISATION EST REPRESENTEE SOUS LA FORME DE BOITES A MOUSTACHES DONNANT LES VALEURS DE D_{50} MEDIAN POUR LE HAUT RHONE = 20 MM, LE RHONE MEDIAN = 46 MM, LE BAS RHONE = 56 MM ET LE DELTA = 30 MM. 214
FIGURE 4-34 : DISTRIBUTION DE LA MOYENNE DES D_{16}, D_{50}, D_{84} ET D_{90} DES ECHANTILLONS NORMALISES PAR LEUR MOYENNE SUR CHAQUE SECTEUR DEPUIS LA CONFLUENCE AVEC LES AFFLUENTS VERS L'AMONT ET VERS L'AVAL JUSQU'A UN « OBSTACLE » (BARRAGE OU CONFLUENCE). COURBE DE L'EVOLUTION DE LA PENTE MOYENNE PAR SECTION. VALEURS DES DISTANCES RECENSEES DANS LE TABLEAU 4-3 217
FIGURE 4-35 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (D_{50}) AUTOUR DES CONFLUENCES DU FIER ET DU GUIERS 218
FIGURE 4-36 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (D_{50}) AUTOUR DES CONFLUENCES DE L'AIN ET DE LA SAONE 219
FIGURE 4-37 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (D_{50}) AUTOUR DES CONFLUENCES DU DOUX, DE L'ISERE, DE L'EYRIEUX ET DE LA DROME 220
FIGURE 4-38 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE (D_{50}) AUTOUR DES CONFLUENCES DE L'ARDECHE, DU LEZ, DE LA CEZE, DE L'AIGUE, DE L'OUVEZE, DE LA DURANCE ET DU GARD 221
FIGURE 4-39 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES PRELEVEMENTS REALISES DANS LE RHONE TOTAL (RT) ET LE VIEUX RHONE (RCC) – MISSION 2012-13 225
FIGURE 4-40 : DISTRIBUTION DE LA MOYENNE DES D_{16}, D_{50}, D_{84} ET D_{90} DES ECHANTILLONS NORMALISES PAR LEUR MOYENNE SUR CHAQUE SECTEUR DEPUIS LE BARRAGE JUSQU'A L'EXTREMITE AMONT DE LA RETENUE (DISTANCES OBSERVEES A RESPECTIVEMENT 25%, 50%, 75% ET 100% DE LA LONGUEUR DE LA RETENUE SELON LE TABLEAU 4-5), DANS LES VIEUX RHONE (RCC) ET LES RHONE TOTAUX (RC). COURBES DE L'EVOLUTION DE LA PENTE DE LA LIGNE D'EAU MOYENNE ACTUELLE ET DE LA PENTE DU FOND DU LIT ACTUEL PAR SECTION. 226
FIGURE 4-41 : EVOLUTION LONGITUDINALE DU D_{50} EN FONCTION DES PENTES DU FOND DU LIT ACTUEL, DE LA LIGNE D'EAU ACTUELLE ET DE CELLE DE 1867-1903. [AFFLUENTS : 1-FIER, 2-GUIERS, 3-AIN, 4-SAONE, 5-DOUX, 6-ISERE, 7-EYRIEUX, 8-DROME, 9-ARDECHE, 10-LEZ, 11-CEZE, 12-AIGUE, 13-OUVEZE, 14-DURANCE, 15-GARD] 230
FIGURE 4-42 : PENTES DE LA LIGNE D'EAU ACTUELLE, DU FOND DU LIT ACTUEL ET DE LA LIGNE D'EAU DE 1867-1903 ET LEURS LOIS POLYNOMIALES D'ORDRE 3 RESPECTIVES 231
FIGURE 4-43 : EVOLUTION LONGITUDINALE DES D_{50} GRAVELEUX (FINES EXCLUES) ET AJUSTEMENT D'UNE LOI POLYNOMIALE D'ORDRE 3 232
FIGURE 5-1 : EVOLUTION DES DEBITS CARACTERISTIQUES DU RHONE. (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A2) 238
FIGURE 5-2 : VARIATIONS DE LA PUISSANCE BRUTE DU RHONE, CALCULEE A PARTIR DE LA PENTE DE 1860. LES SECTEURS ONT ETE AJOUTES EN MARRON ET VERT (MODIFIE, D'APRES BRAVARD, 2010) 239
FIGURE 5-3 : VARIATIONS DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE DU RHONE, CALCULEE A PARTIR DE LA PENTE DE 1860. LES SECTEURS ONT ETE AJOUTES EN MARRON ET VERT ET LES BARRAGES EN ORANGE : PB=PIERRE-BENITE, VS=VAUGRIS, MO=MONTELIMAR, DM=DONZERE-MONDRAGON ET CA=CADEROUSSE (MODIFIE, D'APRES BRAVARD, 2010). 240
FIGURE 5-4 : REGIME DES PENTES (‰) DANS LES RETENUES DE SEYSSEL A VALLABREGUES, SAULT-BRENAZ ET JONS EXCLUS (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4) 241
FIGURE 5-5 : FREQUENCE DU TRANSPORT DES GRAVIERS (J/AN) DANS LES VIEUX RHONE ENTRE CHAUTAGNE ET VALLABREGUES, SAULT-BRENAZ ET JONS EXCLUS (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4) 242
FIGURE 5-6 : CAPACITE DE TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE DANS LES RHONE TOTAUX ET LES VIEUX RHONE AVANT (BLEU) ET APRES (BLANC) LES AMENAGEMENTS GIRARDON ET CNR, SOREAH-EGR (2000-V3D1A2) 244
FIGURE 5-7 : CUMUL DU DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE ENTRE LES PROFILS APRES ET AVANT LES CRUES DE 2001 A 2003 (Q10 A Q100) COMPARE A LA LARGEUR DU CHENAL (EN M), A LA PERIODE DE RETOUR DES CRUES, AUX DIAMETRES MEDIANS (D_{50} EN

MM) DES SEDIMENTS PRELEVES DANS LE FOND DU LIT (SUR LES POINTS HAUTS DU THALWEG) ET MOYENNES PAR BIEF (EXCEPTE LA FRACTION FINE) ET AUX INDICES DE PAVAGES MESURES DANS LES VIEUX RHONE. 248
FIGURE 5-8 : LOCALISATION DES TROIS SITES RESTAURES DANS LE VIEUX RHONE DE PIERRE-BENITE (CISELANDE, JARICOT ET TABLE RONDE) (LAMOUROUX ET AL., 2012) 250
FIGURE 5-9 : LE VIEUX RHONE DE MONTELIMAR ET LES LONES EN PROJET DE RESTAURATION (LAMOUROUX ET AL., 2012) 251
FIGURE 5-10 : LE VIEUX RHONE DE DONZERE-MONDRAGON ET LES LONES EN PROJET DE RESTAURATION (LAMOUROUX ET AL., 2012) 252
FIGURE 5-11 : VARIATIONS VERTICALES DU PROFIL EN LONG DU CHENAL DU RHONE AVANT ET APRES LES CRUES DE 2001 A 2003, DE LA CONFLUENCE DE LA SAONE AU BARRAGE DE VAUGRIS 254
FIGURE 5-12 : VARIATIONS VERTICALES DU PROFIL EN LONG DU CHENAL DU RHONE AVANT ET APRES LES CRUES DE 2001 A 2003, SUR LE SECTEUR DE MONTELIMAR..... 256
FIGURE 5-13 : VARIATIONS VERTICALES DU PROFIL EN LONG DU CHENAL DU RHONE AVANT ET APRES LES CRUES DE 2001 A 2003, DU RHONE TOTAL DE DONZERE-MONDRAGON AU BARRAGE DE CADEROUSSE 258
FIGURE 5-14 : EXEMPLES D'ORDRES DE GRANDEURS DU COEFFICIENT DE STRICKLER EN FONCTION DES SURFACES RENCONTREES (DEGOUTTE, 2006)..... 260
FIGURE 5-15 : FORCES PERPENDICULAIRE (DP) ET TANGENTIELLE (DF) APPLIQUEES PAR L'EAU SUR LES PAROIS DU CHENAL (DEGOUTTE, 2006) 261
FIGURE 5-16 : DIAGRAMME DE SHIELDS-YALIN REPRESENTANT LA MISE EN MOUVEMENT DES PARTICULES UNIFORMES : EVOLUTION DU PARAMETRE DE SHIELDS (ADIMENSIONNEL) EN FONCTION DU DIAMETRE SEDIMENTOLOGIQUE (EN M). MODIFIE D'APRES DEGOUTTE (2006) ET GROSPRETRE (2011) 263
FIGURE 5-17 : COMPARAISON DES DOMAINES DE VALIDITE DES DIFFERENTES FORMULES DE TRANSPORT EN FONCTION DE (A) LA GRANULOMETRIE MOYENNE DES SEDIMENTS ET DE (B) LA CONTRAINTE (PARAMETRE DE SHIELDS Θ). D'APRES BELLEUDY (2001) 269
FIGURE 5-18 : COMPARAISON ENTRE LE CHARRIAGE CALCULE ET MESURE POUR LA TOTALITE DES DONNEES DE TERRAIN (6319 VALEURS) A PARTIR DE LA FORMULATION DE RECKING (2010) (THIS STUDY), DE PARKER (1979), DE MEYER-PETER ET MÜLLER (1948) ET DE SCHOKLITSCH (1962). LES VALEURS TRACEES PARALLELEMENT A L'AXE DES ORDONNEES CORRESPONDENT A DES PREDICTIONS NULLES (CALCULEES) POUR UN TRANSPORT SOLIDE MESURE NON NUL. LES LIGNES PARALLELES A LA TANGENTE D'EGALITE ENTRE LES VALEURS CALCULEES ET MESUREES CORRESPONDENT A UN ECART A CETTE TANGENTE DE : $\mathbf{0.1} < \boldsymbol{r} = \boldsymbol{qscalcul}\mathrm{E}\boldsymbol{qsmesur}\mathrm{E} < \mathbf{10}$ (RECKING, 2010)..... 271
FIGURE 5-19 : RESULTATS VALIDES (SCORE) DU CALCUL DU TRANSPORT SOLIDE ($\boldsymbol{r} = \boldsymbol{qscalcul}\mathrm{E}\boldsymbol{qsmesur}\mathrm{E}$) SUR LES MESURES INSTANTANEES DE TERRAIN (A) ET SUR LES MESURES DE LABORATOIRE (B) A PARTIR DE LA FORMULE DE RECKING (2010) EN COULEURS VIVES ET 15 AUTRES FORMULES CONNUES DANS LA LITTERATURE, DANS L'ORDRE : ACKERS ET WHITE (1973), BAGNOLD (1980), EINSTEIN (1950) ET BROWN (1950), ENGELUND ET HANSEN (1967), LEFORT (2007), MIZUYAMA (1977), MEYER-PETER ET MÜLLER OU MPM (1948), PARKER (1979), RECKING ET AL. (2008), RICKENMANN (1990), SCHOKLITSCH (1962), SMART ET JAEGGI (1983), LEFORT-SOGREAH (1991), VAN RIJIN (1984), YANG (1984). (RECKING ET AL., 2010). 272
FIGURE 5-20 : EFFICACITE (RESULTATS VALIDES = SCORE) DE LA FORMULE DE RECKING (2010) (TIRETS DANS LES CADRES ROUGES) ET DES AUTRES EQUATIONS, TESTEES DANS L'INTERVALLE $\mathbf{0.1} < \boldsymbol{r} < \mathbf{10}$, EN FONCTION DE LA PENTE (S), DU DIAMETRE (D) ET DE LA CONTRAINTE ($\boldsymbol{\theta}/\boldsymbol{\theta c}$). (RECKING ET AL., 2010) 273
FIGURE 5-21 : LES TROIS TYPES DE RESEAUX MODELISABLES PAR MAGE (FAURE, 2013) 276
FIGURE 5-22 : CAPTURE D'ECRAN DE L'INTERFACE DU MODELE MAGE : EN HAUT A GAUCHE, UNE VUE EN PLAN DU BIEF AVEC SES COORDONNEES X ET Y EN LAMBERT 93 ; EN HAUT A DROITE, LE PROFIL EN LONG DU BIEF AVEC LA LIGNE DE FOND, LES LIGNES DES BERGES ET LES PROFILS GEOMETRIQUES DU BIEF (ROUGE) ; EN BAS, LA VUE EN COUPE D'UN DES PROFILS SELECTIONNES (NOIR=PROFIL VISUALISE, JAUNE=PROFIL AU PK SUIVANT). LE GUERN (2013) 276
FIGURE 5-23 : TRONÇON MODELISE DU SECTEUR DE PIERRE-BENITE, ENTRE LE PK 0,4, CONFLUENCE SAONE/RHONE A LYON, ET LE PK 33,8, AVAL DU BARRAGE DE VAUGRIS/AMONT DE LA LONE DE LA CHEVRE. V. DUGUE 277
FIGURE 5-24 : TRONÇON MODELISE DU SECTEUR DE DONZERE-MONDRAGON, ENTRE LE PK 143,66, DEBUT DU RHONE TOTAL DE MONTELIMAR, ET LE PK 229,8, AU BARRAGE DE SAUVETERRE SUR L'AMENAGEMENT D'AVIGNON. V. DUGUE 278

FIGURE 5-25 : EVOLUTION DU NOMBRE DE SHIELDS (Θ_R) CALCULE A PARTIR DE LA MEDIANE DES D_{50} DU BIEF A Q2, Q5, Q10 ET Q100 PAR RAPPORT AUX SHIELDS CRITIQUES (Θ_{C50}) CALCULES ET ESTIMES (ANNOTES DIRECTEMENT SUR LA FIGURE) DANS LE SECTEUR DE PIERRE-BENITE 287
FIGURE 5-26 : EVOLUTION DU NOMBRE DE SHIELDS (Θ_R) CALCULE A PARTIR DE LA MEDIANE DES D_{84} DU BIEF A Q2, Q5, Q10 ET Q100 PAR RAPPORT AUX SHIELDS CRITIQUES (Θ_{C84}) CALCULES ET ESTIMES (ANNOTES DIRECTEMENT SUR LA FIGURE) DANS LE SECTEUR DE PIERRE-BENITE 288
FIGURE 5-27 : DEBITS SOLIDES CALCULES DANS LE SECTEUR DE PIERRE-BENITE A Q2 (3200 M^3/S DANS LE RHONE TOTAL, 1820 M^3/S DANS LE VIEUX RHONE) 289
FIGURE 5-28 : DEBITS SOLIDES CALCULES DANS LE SECTEUR DE PIERRE-BENITE A Q5 (3900 M^3/S DANS LE RHONE TOTAL, 2520 M^3/S DANS LE VIEUX RHONE) 290
FIGURE 5-29 : DEBITS SOLIDES CALCULES DANS LE SECTEUR DE PIERRE-BENITE A Q10 (4500 M^3/S DANS LE RHONE TOTAL, 3120 M^3/S DANS LE VIEUX RHONE) 291
FIGURE 5-30 : DEBITS SOLIDES CALCULES DANS LE SECTEUR DE PIERRE-BENITE A Q100 (6100 M^3/S DANS LE RHONE TOTAL, 4037 M^3/S DANS LE VIEUX RHONE) 292
FIGURE 5-31 : EVOLUTION DU NOMBRE DE SHIELDS (Θ_R) CALCULE A PARTIR DE LA MEDIANE DES D_{50} DU BIEF A Q2, Q5, Q10 ET Q100 PAR RAPPORT AUX SHIELDS CRITIQUES (Θ_{C50}) CALCULES ET ESTIMES (ANNOTES DIRECTEMENT SUR LA FIGURE) DANS LE SECTEUR DE DONZERE 295
FIGURE 5-32 : EVOLUTION DU NOMBRE DE SHIELDS (Θ_R) CALCULE A PARTIR DE LA MEDIANE DES D_{84} DU BIEF A Q2, Q5, Q10 ET Q100 PAR RAPPORT AUX SHIELDS CRITIQUES (Θ_{C84}) CALCULES ET ESTIMES (ANNOTES DIRECTEMENT SUR LA FIGURE) DANS LE SECTEUR DE DONZERE 296
FIGURE 5-33 : DEBITS SOLIDES CALCULES DANS LE SECTEUR DE DONZERE-MONDRAGON A Q2 (DEBITS OBSERVES : 4300 M^3/S DANS LE RHONE TOTAL, 1500 M^3/S DE L'ARDECHE) 298
FIGURE 5-34 : DEBITS SOLIDES CALCULES DANS LE SECTEUR DE DONZERE-MONDRAGON A Q5 (DEBITS OBSERVES : 5300 M^3/S DANS LE RHONE TOTAL, 1900 M^3/S DE L'ARDECHE) 299
FIGURE 5-35 : DEBITS SOLIDES CALCULES DANS LE SECTEUR DE DONZERE-MONDRAGON A Q10 (DEBITS OBSERVES : 6100 M^3/S DANS LE RHONE TOTAL, 2300 M^3/S DE L'ARDECHE) 300
FIGURE 5-36 : DEBITS SOLIDES CALCULES DANS LE SECTEUR DE DONZERE-MONDRAGON A Q100 (DEBITS OBSERVES : 8100 M^3/S DANS LE RHONE TOTAL, 3200 M^3/S DE L'ARDECHE) 301
FIGURE 37 : SYNTHESE DES PRINCIPAUX ENJEUX IDENTIFIES SUR LE RHONE AVAL (PROVANSAL ET AL., 2012) 316

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1 : PRINCIPALES INTERVENTIONS HUMAINES DIRECTES SUR LA MORPHOLOGIE DES COURS D'EAU ET LEUR INTENSITE DE MODEREE (+) A FORTE (+) (MALAVOI, 2007) 27
TABLEAU 1-2 : PRINCIPAUX TYPES D'INTERVENTIONS EN RIVIERE RELEVANT DE LA CHENALISATION, MODIFIE D'APRES BROOKES (1988) ET WASSON ET AL. (1995) 28
TABLEAU 1-3 : IMPACTS ECOLOGIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES LIES A L'INCISION D'UN TRONÇON FLUVIAL AMENAGE (REALISE D'APRES BRAVARD ET AL., 1999 ; LANDON, 2007 ; ARNAUD, 2012 ; BRAUD ET AL. 2013) 39
TABLEAU 2-1 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE QUATRE FLEUVES FRANÇAIS MAJEURS SE JETANT DANS LES EAUX FRANÇAISES 48
TABLEAU 2-2 : CARACTERISTIQUES HYDROGRAPHIQUES DE QUELQUES GRANDS FLEUVES DANS LE MONDE 48
TABLEAU 2-3 : LISTE DES AFFLUENTS PRINCIPAUX ET SECONDAIRES DU RHONE, (*) SONT DES SOUS-AFFLUENTS. D'APRES SOGREAH-EGR (2000-V1D1A1) 51
TABLEAU 2-4 : GRANDEURS CARACTERISTIQUES DES CRUES SUR LE RHONE ET SES AFFLUENTS, CALCULEES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES (ANNEXE 1) (REALISE A PARTIR DE SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1 ET DE LA BANQUE HYDRO) 61
TABLEAU 2-5 : SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DES AFFLUENTS DU RHONE REALISEE A PARTIR DES DONNEES DE SOGREAH-EGR (2000-V3D1A4-5) 64
TABLEAU 2-6 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES DE LA COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE (SOURCE CNR) 87
TABLEAU 2-7 : PERTE DE CHARGE AU BARRAGE OBSERVEE LORS DES CRUES EXCEPTIONNELLES DU RHONE (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4) 91
TABLEAU 2-8 : BILAN DES EXTRACTIONS DE GRAVIERS ET DES REMOBILISATIONS DES MATERIAUX FINS REALISEES PAR LA CNR ENTRE 1970 ET 1999 (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A6) 93
TABLEAU 3-1 : CARACTERISTIQUES DE CHAQUE TYPE DE CHENAL (ENSEMBLE DE FACIES MORPHOLOGIQUES). MONTGOMERY ET BUFFINGTON (1997) 107
TABLEAU 3-2 : PENTE MOYENNE DU LIT DE CHAQUE FACIES MORPHOLOGIQUES, DETERMINEE PAR GRANT ET AL. (1990) SUR DEUX COURS D'EAU EN OREGON 107
TABLEAU 3-3 : DEBIT MAXIMAL INSTANTANE ET PERIODE DE RETOUR POUR LES CRUES DE 2001 A 2003 AUX DIFFERENTES STATIONS HYDROLOGIQUE ENTRE LYON ET LA MER (TERNAY AU PK 15.2, VALENCE AU PK 109.7, VIVIERS AU PK 166.5, BEAUCAIRE AU PK 269.6) 115
TABLEAU 3-4 : BILAN DES JEUX DE DONNEES BATHYMETRIQUES DISPONIBLES SUR LE RHONE 115
TABLEAU 3-5 : SYNTHESE DES VARIATIONS ALTIMETRIQUES DU LIT POUR LA PERIODE 1 A PARTIR DES PROFILS EN LONG TRACES DANS LES ANNEXE 5, ANNEXE 6, ANNEXE 7 ET DU CUMUL DES DIFFERENCES ALTIMETRIQUES DE LA FIGURE 3-22 133
TABLEAU 3-6 : SYNTHESE DES VARIATIONS ALTIMETRIQUES DU LIT POUR LA PERIODE 2 A PARTIR DES PROFILS EN LONG TRACES DANS LES ANNEXE 5, ANNEXE 6, ANNEXE 7 ET DU CUMUL DES DIFFERENCES ALTIMETRIQUES DES FIGURE 3-22 ET FIGURE 3-24 .. 136
TABLEAU 3-7 : SYNTHESE DES VARIATIONS ALTIMETRIQUES DU LIT POUR LA PERIODE 3 A PARTIR DES PROFILS EN LONG TRACES DANS LES ANNEXE 8, ANNEXE 9 ET ANNEXE 10 140
TABLEAU 3-8 : VALEURS MINIMALES, MAXIMALES ET MOYENNES DES PARAMETRES DE FORMES (AMPLITUDE, LONGUEUR D'ONDE ET HAUTEUR DES SEUILS ET PROFONDEUR DES MOUILLES) SUR L'ENSEMBLE DU LINEAIRE. DONNEES EN METRE. 154
TABLEAU 4-1 : REFERENCEMENT DES MESURES GRANULOMETRIQUES (D_{50} EN MM) REALISEES EN 2012 DANS LE CHENAL DES VIEUX RHONE PAR COMPTAGE SELON LA METHODE WOLMAN ET DES INDICES DE PAVAGE (D_{50} SURFACE/D_{50} SUBSURFACE DU BANC). EXTRAIT DE L'ANNEXE 26 209
TABLEAU 4-2 : REFERENCEMENT DES MESURES GRANULOMETRIQUES (D_{50} EN MM) REALISEES EN 2012 ET 2013 DANS LE CHENAL PAR DRAGAGE CNR. EXTRAIT DE L'ANNEXE 22 210
TABLEAU 4-3 : SEGMENTATION DU SECTEUR AMONT ET AVAL DE LA CONFLUENCE AVEC UN AFFLUENT JUSQU'A UN OUVRAGE OU UNE AUTRE CONFLUENCE SELON LES QUARTILES PROPRES DE LA DISTANCE A L'AFFLUENT (EN KM) 216
TABLEAU 4-4 : SYNTHESE DES APPORTS DES AFFLUENTS (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A5 ; LAUNEY, 2014) ET REPARTITION GRANULOMETRIQUE A L'AVAL DES AFFLUENTS INTERPRETEE A PARTIR DES FIGURE 4-35 A FIGURE 4-38 222
TABLEAU 4-5 : LONGUEUR DE LA RETENUE DE CHAQUE OUVRAGE EN KM 227

TABLEAU 5-1 : COMPARAISON ENTRE LES DONNEES GRANULOMETRIQUES DE LA MASSE ET DE LA SURFACE UTILISEES DANS L'EGR (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4) POUR CALCULER LE TRANSIT NATUREL ET CELLES CALCULEES DANS LA PRESENTE ETUDE (CHAPITRE 4) 245
TABLEAU 5-2 : DEBIT MAXIMAL INSTANTANE ET PERIODE DE RETOUR POUR LES CRUES DE 2001 A 2003 AUX DIFFERENTES STATIONS HYDROLOGIQUES ENTRE LYON ET LA MER (TERNAY AU PK 15,2, VALENCE AU PK 109,7, VIVIERS AU PK 166,5, BEAUCAIRE AU PK 269,6) 246
TABLEAU 5-3 : DONNEES GRANULOMETRIQUES ET VALEURS DE PENTES UTILISEES POUR LES CALCULS DE TRANSPORT SOLIDE 274
TABLEAU 5-4 : DONNEES TOPOGRAPHIQUES UTILISEES POUR LE SECTEUR DE PIERRE-BENITE ET DONZERE-MONDRAGON 278
TABLEAU 5-5 : LIGNES D'EAU UTILISEES POUR CALER LE MODELE (EN GRAS) ET POUR LE VALIDER (LES AUTRES) 279
TABLEAU 5-6 : COEFFICIENTS DE STRICKLER ET COTES DES LIGNES D'EAU NECESSAIRES A L'AJUSTEMENT DU MODELE POUR LES SECTEURS DE PIERRE-BENITE ET DONZERE-MONDRAGON 280
TABLEAU 5-7 : DEBITS DE CRUE DANS LE RHONE TOTAL A PIERRE-BENITE (PB) ET A DONZERE-MONDRAGON (DM) 281
TABLEAU 5-8 : COTES AUX PK 3 (PORT DE LYON) ET 3,82 (DIFFLUENCE) A UN DEBIT DONNE POUR L'AMENAGEMENT DE PIERRE-BENITE. LES DONNEES EN ROUGES REPRESENTENT LES VALEURS POUR LESQUELLES LES CONDITIONS NE SONT PLUS REPRESENTEES AVEC CERTITUDE 281
TABLEAU 5-9 : COTES AUX PK 28,6 (A VIENNE), 33 (AMONT DU BARRAGE) ET 33,5 (BARRAGE) A UN DEBIT DONNE POUR L'AMENAGEMENT DE VAUGRIS 282
TABLEAU 5-10 : COTES AUX PK 152,2 (BARRAGE), 163,5 (USINE) A UN DEBIT DONNE POUR L'AMENAGEMENT DE MONTELIMAR 282
TABLEAU 5-11 : COTES AUX PK 170,3 (DERIVATION), 187,2 (USINE) A UN DEBIT DONNE POUR L'AMENAGEMENT DE DONZERE .. 282
TABLEAU 5-12 : COTES AUX PK 203 (DERIVATION) ET 214,5 (USINE) A UN DEBIT DONNE POUR L'AMENAGEMENT DE CADEROUSSE 283
TABLEAU 5-13 : DONNEES D'ENTREE UTILISEES POUR FAIRE TOURNER LE MODELE. LES CONSIGNES N'ONT PAS ETE RESPECTEES SUR LES AMENAGEMENTS DE DONZERE-MONDRAGON ET CADEROUSSE (SURLIGNEES EN JAUNE) 284
TABLEAU 5-14 : DEBITS SOLIDES CALCULES A PARTIR DES FORMULES DE TRANSPORT ETABLIES PAR MEYER-PETER ET MÜLLER (1948 – MPM), PARKER (1979), SCHOKLITSCH (1962) ET RECKING (2010) SUR LE RHONE TOTAL ET LE VIEUX RHONE DE PIERRE-BENITE (PB) ET LE RHONE TOTAL DE VAUGRIS (VS) A Q2, Q5, Q10 ET Q100 293
TABLEAU 5-15 : DEBITS SOLIDES CALCULES A PARTIR DES FORMULES DE TRANSPORT ETABLIES PAR MEYER-PETER ET MÜLLER (1948 – MPM), PARKER (1979), SCHOKLITSCH (1962) ET RECKING (2010) SUR LE RHONE TOTAL (RT) ET LE VIEUX RHONE (VR) DE MONTELIMAR (MO), LE RHONE TOTAL ET LE VIEUX RHONE DE DONZERE-MONDRAGON (DM) ET LE RHONE TOTAL DE CADEROUSSE (CA) A Q2, Q5, Q10 ET Q100 302
TABLEAU 5-16 : COMPARAISON ENTRE LES DEBITS SOLIDES CALCULES A PARTIR DE LA FORMULE DE TRANSPORT ETABLIE PAR RECKING (2010) DANS LES VIEUX RHONE (VR) COURT-CIRCUITES (RCC) ET LES VIEUX RHONE « NATURELS » (ABSENCE DE LAMINAGE) DE PIERRE-BENITE (PB), DE MONTELIMAR (MO) ET DE DONZERE-MONDRAGON (DM) A Q2, Q5, Q10 ET Q100. LA REDUCTION DU TRANSPORT SOLIDE (TS) SUITE AUX AMENAGEMENTS EST RAPPORTEE EN POURCENTAGE 304
TABLEAU 5-17 : DEBITS SOLIDES CALCULES A PARTIR DE LA FORMULE DE TRANSPORT ETABLIE PAR RECKING (2010), DANS LE CAS D'UNE REINJECTION DE SEDIMENTS DE DIAMETRES MEDIANS (D_{50}) DE 35 MM ET DE 10 MM (ANNEXE 32), DANS LES VIEUX RHONE (VR) DE PIERRE-BENITE (PB), DE MONTELIMAR (MO) ET DE DONZERE-MONDRAGON (DM) A Q2 (3200 M^3/S A PB, 4300 M^3/S A MO ET DM) ET Q5 (3900 M^3/S A PB, 5300 M^3/S A MO ET DM). 307

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : PRINCIPALES STATIONS HYDROMETRIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU RHONE (SOGREAH-EGR, 2000-V1D2A1) 322
ANNEXE 2 : TYPOLOGIE DES OUVRAGES GIRARDON. REALISEE PAR PERIAL (2012), D'APRES GIRARDON (1894) 323
ANNEXE 3 : PROFILS EN LONG ENTRE LES PK-190 ET -90 DE LA PERIODE DE MISE EN SERVICE DES AMENAGEMENTS CNR (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT) 324
ANNEXE 4 : PROFILS EN LONG ENTRE LES PK-95 ET 0 DE LA PERIODE DE MISE EN SERVICE DES AMENAGEMENTS CNR (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT) 325
ANNEXE 5 : PROFILS EN LONG ENTRE LES PK0 ET 100 DE LA PERIODE DE CONSTRUCTION DES CASIERS GIRARDON (BLEU), DE MISE EN SERVICE DES BARRAGES (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT) 326
ANNEXE 6 : PROFILS EN LONG ENTRE LES PK100 ET 190 DE LA PERIODE DE CONSTRUCTION DES CASIERS GIRARDON (BLEU), DE LA MISE EN SERVICE DES BARRAGES (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT) 327
ANNEXE 7 : PROFILS EN LONG ENTRE LES PK190 ET 320 DE LA PERIODE DE CONSTRUCTION DES CASIERS GIRARDON (BLEU), DE LA MISE EN SERVICE DES BARRAGES (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT) 328
ANNEXE 8 : PROFILS EN LONG ENTRE LES PK 0 ET 100 AVANT LES CRUES DE 2001 A 2003 (1996/2000 EN POINTILLES ROUGE) ET APRES LES CRUES (2004/2007 EN BLEU) 329
ANNEXE 9 : PROFILS EN LONG ENTRE LES PK 100 ET 190 AVANT LES CRUES DE 2001 A 2003 (1996/2000 EN POINTILLES ROUGE) ET APRES LES CRUES (2004/2007 EN BLEU) 330
ANNEXE 10 : PROFILS EN LONG ENTRE LES PK 190 ET 320 AVANT LES CRUES DE 2001 A 2003 (1996/2000 EN POINTILLES ROUGE) ET APRES LES CRUES (2004/2007 EN BLEU) 331
ANNEXE 11 : ANALYSES STATISTIQUES DE PETTITT (1979, EN ROUGE) ET HUBERT (2000, EN BLEU) SUR LA PENTE LOCALE DU PROFIL EN LONG 332
ANNEXE 12 : FENETRE GLISSANTE REPRESENTANT DEUX FILTRES: LA FONCTION D'ONDELETTE (PREMIERE FENETRE) ET LA FONCTION D'ECHELLE (DEUXIEME FENETRE) 333
ANNEXE 13 : DECOMPOSITION DU SIGNAL DE PENTE LOCALE (GENISSIAT EXCLU) 334
ANNEXE 14 : RECOMPOSITION DU SIGNAL DE PENTE A PARTIR DES SIGNAUX OBTENUS PAR LA METHODE DES ONDELETTES 335
ANNEXE 15 : SYNTHESE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES FORMES PAR TRONÇON HOMOGENE. L'INDICE DE RUGOSITE CORRESPOND AU RAPPORT DE L'AMPLITUDE (A) SUR LA PERIODE (P). 336
ANNEXE 16 : DONNEES BRUTES DES PARAMETRES PHYSIQUES CARACTERISANT LES MESO-FORMES FLUVIALES EN CHAQUE POINT DU TALWEG A PARTIR DE L'ANALYSE DES EXTREMA ET DE LA MOYENNE MOBILE 338
ANNEXE 17 : ECHELLE GRANULOMETRIQUE, UTILISATION DE LA CLASSIFICATION DE WENTWORTH (1922). TABLEAU REALISE PAR D. CYR A PARTIR DES TRAVAUX DE SCHOENEBERGER ET AL. (2002) 343
ANNEXE 18 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE DES MESURES GRANULOMETRIQUES EFFECTUEES SUR LE RHONE 344
ANNEXE 19 : BILAN DES ECHANTILLONS PRELEVES A DONZERE-MONDRAGON : TESTS DES COOPER SCOOPERS, LA GRANDE ETANT NOTE (G), COMPTAGE WOLMAN SUR LES BANCS ET DANS LE CHENAL EN EAU, ECHANTILLONNAGE VOLUMETRIQUE SUR UN BANC .. 352
ANNEXE 20 : PLAN D'ECHANTILLONNAGE ETABLI SELON LE PROTOCOLE DE PRELEVEMENT SYSTEMATIQUE SUR LES POINTS HAUTS DU TALWEG DU LEMAN A LA MER 353
ANNEXE 21 : EXEMPLE D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE : DETERMINATION GRAPHIQUE ET CALCUL DES PERCENTILES 363
ANNEXE 22 : DONNEES STATISTIQUES DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE POUR CHAQUE ECHANTILLON ISSU DES CAMPAGNES DE 2012 A 2013 : PRELEVEMENTS PAR COMPTAGE WOLMAN ET PAR DRAGAGE (APRES FUSION DES 3 PRELEVEMENTS EFFECTUES AVEC LA DRAGUE DE LA CNR) – LES DONNEES GRISEES SONT EN-DESSOUS DE LA LIMITE DE DETECTION ; ELLES ONT ETE DETERMINEES A PARTIR D'UNE COURBE GRANULOMETRIQUE DE FAIBLE ETENDUE 364
ANNEXE 23 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE NORMALE EN FREQUENCE DE CHAQUE ECHANTILLON PRELEVE A LA DRAGUE ET PAR COMPTAGE SUR L'ENSEMBLE DU LINEAIRE DU RHONE (PRELEVEMENTS DE GENISSIAT EXCLU) 371
ANNEXE 24 : MESURES GRANULOMETRIQUES REALISEES SUR LES BANCS DES VIEUX RHONE DE CHAUTAGNE A DONZERE-MONDRAGON LORS DE LA CAMPAGNE DE 2011 380
ANNEXE 25 : LOCALISATION DES COMPTAGES WOLMAN REALISES SUR LES BANCS ET DANS LE CHENAL EN EAU DES VIEUX RHONE DE CHAUTAGNE A DONZERE-MONDRAGON – CAMPAGNES DE 2011 ET 2012 381

ANNEXE 26 : CARACTERISATION GRANULOMETRIQUE (D_{10}, D_{50} ET D_{90}) A PARTIR DE PRELEVEMENTS EFFECTUES SELON LA METHODE WOLMAN SUR LES BANCS (B) ET DANS LE CHENAL DU RHONE (E) MAJORITAIREMENT DANS LES VIEUX RHONE. DETERMINATION DES INDICES DE PAVAGE SUR LES BANCS ET DANS LE CHENAL – CAMPAGNES 2012 REALISEES A PIED. COLONNE 1 : LOCALISATION PAR RAPPORT A T=TETE, M=MILIEU, Q=QUEUE DU BANC. COLONNE 2 : PRELEVEMENT EN S=SURFACE, SS=SUBSURFACE, CH=CHENAL. COLONNE 3 : MESURE REALISEE SUR B=BANC, E=CHENAL EN EAU 393
ANNEXE 27 : AGRANDISSEMENTS DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE LONGITUDINALE (D_{50} EN MM) DU FOND DU CHENAL DU RHONE - CAMPAGNES WOLMAN ET DRAGAGES CNR 2012 -13 395
ANNEXE 28 : CAPACITE DE TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE CALCULEE EN VOLUME ANNUEL SUR TOUS LES BIEFS DU RHONE AVANT (ETAT NATUREL) ET APRES (ETAT ACTUEL) AMENAGEMENT (SOGREAH-EGR, 2000-V3D1A4) 420
ANNEXE 29 : DEBITS SOLIDES CALCULES A PARTIR DE LA FORMULE DE RECKING (2010) DANS LE VIEUX RHONE DE PIERRE-BENITE A L'ETAT NATUREL A Q2, Q5, Q10 ET Q100 422
ANNEXE 30 : DEBITS SOLIDES CALCULES A PARTIR DE LA FORMULE DE RECKING (2010) DANS LE VIEUX RHONE DE MONTELIMAR A L'ETAT NATUREL A Q2, Q5, Q10 ET Q100 423
ANNEXE 31 : DEBITS SOLIDES CALCULES A PARTIR DE LA FORMULE DE RECKING (2010) DANS LE VIEUX RHONE DE DONZERE-MONDRAGON A L'ETAT NATUREL A Q2, Q5, Q10 ET Q100 424
ANNEXE 32 : ESTIMATION DES STATISTIQUES GRANULOMETRIQUES DE REINJECTION ETABLIES A PARTIR DE LA MOYENNE DES DONNEES REELLES DU RHONE. LES DONNEES RETENUES (ENCADREES EN ROUGE) SONT CELLES POSSEDANT UN D_{50} (EN BLEU) DE 35 MM ET DE 10 MM 425
ANNEXE 33 : DEBIT SOLIDE CALCULE DANS LE SECTEUR ETENDU DE PIERRE-BENITE A Q2 – SIMULATION POUR UN D_{50} DE 35 MM (ANNEXE 32) 426
ANNEXE 34 : DEBIT SOLIDE CALCULE DANS LE SECTEUR ETENDU DE PIERRE-BENITE A Q5 – SIMULATION POUR UN D_{50} DE 35 MM (ANNEXE 32) 427
ANNEXE 35 : DEBIT SOLIDE CALCULE DANS LE SECTEUR ETENDU DE DONZERE-MONDRAGON A Q2 – SIMULATION POUR UN D_{50} DE 35 MM (ANNEXE 32) 428
ANNEXE 36 : DEBIT SOLIDE CALCULE DANS LE SECTEUR ETENDU DE DONZERE-MONDRAGON A Q5 – SIMULATION POUR UN D_{50} DE 35 MM (ANNEXE 32) 429
ANNEXE 37 : DEBIT SOLIDE CALCULE DANS LE SECTEUR ETENDU DE PIERRE-BENITE A Q2 – SIMULATION POUR UN D_{50} DE 10 MM (ANNEXE 32) 430
ANNEXE 38 : DEBIT SOLIDE CALCULE DANS LE SECTEUR ETENDU DE PIERRE-BENITE A Q5 – SIMULATION POUR UN D_{50} DE 10 MM (ANNEXE 32) 431
ANNEXE 39 : DEBIT SOLIDE CALCULE DANS LE SECTEUR ETENDU DE DONZERE-MONDRAGON A Q2 – SIMULATION POUR UN D_{50} DE 10 MM (ANNEXE 32) 432
ANNEXE 40 : DEBIT SOLIDE CALCULE DANS LE SECTEUR ETENDU DE DONZERE-MONDRAGON A Q5 – SIMULATION POUR UN D_{50} DE 10 MM (ANNEXE 32) 433
ANNEXE 41 : SYNTHESE DE L'EVOLUTION DU PROFIL A L'AVAL DE LYON SECTEUR SUR LA PERIODE 1 (GIRARDON-BARRAGE), LA PERIODE 2 (BARRAGE-RECENT) ET LA PERIODE 3 (AVANT/APRES CRUES 2001-03) 434

RESUME

Analyse spatiale et temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée

Cette thèse étudie l'organisation longitudinale du lit du Rhône français et son évolution depuis plus d'un siècle afin d'améliorer la gestion des sédiments du fleuve. Elle décrit d'abord la complexité géographique, géologique, et hydrologique des 512 km du système fluvial. Les extractions, l'endiguement, la chenalisation et les aménagements hydroélectriques ont simplifié le tracé latéral du chenal, incisé et pavé le fond du lit et appauvri les habitats aquatiques et riverains. La thèse caractérise ensuite plus précisément les dynamiques de fond. Elle repose sur des données bathymétriques de 1897-2010 et sur des données granulométriques issues de plus de 300 prélèvements réalisés dans le cadre de ces travaux sur l'ensemble du linéaire. Un protocole d'échantillonnage homogène a été spécialement élaboré. Les variations altimétriques du lit (zones de stockage-érosion et faciès morphologiques) et sa composition granulométrique (zones pavées ou comblées par des fines) ont été caractérisées afin d'évaluer la mobilité potentielle de la charge de fond, les apports des affluents et l'impact des ouvrages sur les conditions de transport. Il ressort 1) que l'incision du lit est principalement due à la chenalisation, 2) que les aménagements hydroélectriques ont compartimenté le continuum en provoquant le stockage de sédiments fins dans certaines retenues et en favorisant le pavage dans les vieux Rhône à l'aval de Lyon et 3) qu'une dynamique résiduelle subsiste lors de crues majeures avec une remobilisation modérée de la charge de fond. Les données des secteurs les plus pavés ont été intégrées dans un modèle hydraulique 1D permettant de quantifier la capacité de transport et le débit solide et confirmant les résultats précédents. Ces travaux permettent de formuler des recommandations de gestion durable et de restauration écologique du fleuve telles que l'ouverture des vannes de fond en crue, la modification des consignes aux barrages ou la réinjection de graviers.

Mots clés : Rhône, profil en long, faciès morphologique, distribution granulométrique, protocole d'échantillonnage, capacité de transport, extractions, barrages, casiers Girardon, restauration écologique.

ABSTRACT

Spatio-temporal analysis of the Rhone channel morphology from Geneva Lake to the Mediterranean Sea.

This thesis studies the French Rhone riverbed longitudinal organisation and its evolution over a century, with a view to improve the management strategy for the sediments. It first describes the geographic, geologic and hydrologic peculiarities of the 512-km long fluvial system. Gravel mining, dikes construction, channelization and dams construction have simplified the lateral pattern of the channel, incised and paved the riverbed and impoverished the aquatic and riparian habitats. The thesis then more precisely characterizes the riverbed dynamics. It relies on bathymetric data collected since 1897 and on grainsize data collected specifically for this study from over 300 samples on the whole 512-km river length. An homogeneous sampling protocol was elaborated on purpose. The vertical bed evolution and grainsize distribution were analysed to assess the riverbed potential mobility, tributaries' sediment recharge and infrastructures' impact on sediment transport. It thus appears that 1) riverbed incision is mainly due to channelization, 2) hydroelectric dams partitioned the continuum with the accumulation of fine sediments in some backwaters and the pavement of bypassed reaches downstream of Lyon and 3) a residual dynamic persists during major floods, with moderate gravels transport. The data of paved reaches were used in a 1D hydraulic model to quantify transport capacity and bedload discharge, confirming the aforementioned results. This study helps formulate such recommendations for sustainable river management and ecological restoration as opening slush gates during floods, changing dams management instructions or reinjecting gravel.

Keywords : Rhone River, long profile, bedforms, grainsize distribution, homogeneous sampling protocol, transport capacity, gravel mining, dams, Girardon groynes system, ecological restoration.