



HAL
open science

Analyse de l'évolution géométrique du corridor de Genève à mer. Action 1

E. Parrot, Hervé Piégay, Lise Vaudor, Guillaume Fantino, Michal Tal

► **To cite this version:**

E. Parrot, Hervé Piégay, Lise Vaudor, Guillaume Fantino, Michal Tal. Analyse de l'évolution géométrique du corridor de Genève à mer. Action 1. [Rapport de recherche] CNRS UMR 5600 - EVS; CNRS UMR 7330 - CEREGE. 2014. hal-03446806

HAL Id: hal-03446806

<https://hal.science/hal-03446806>

Submitted on 24 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

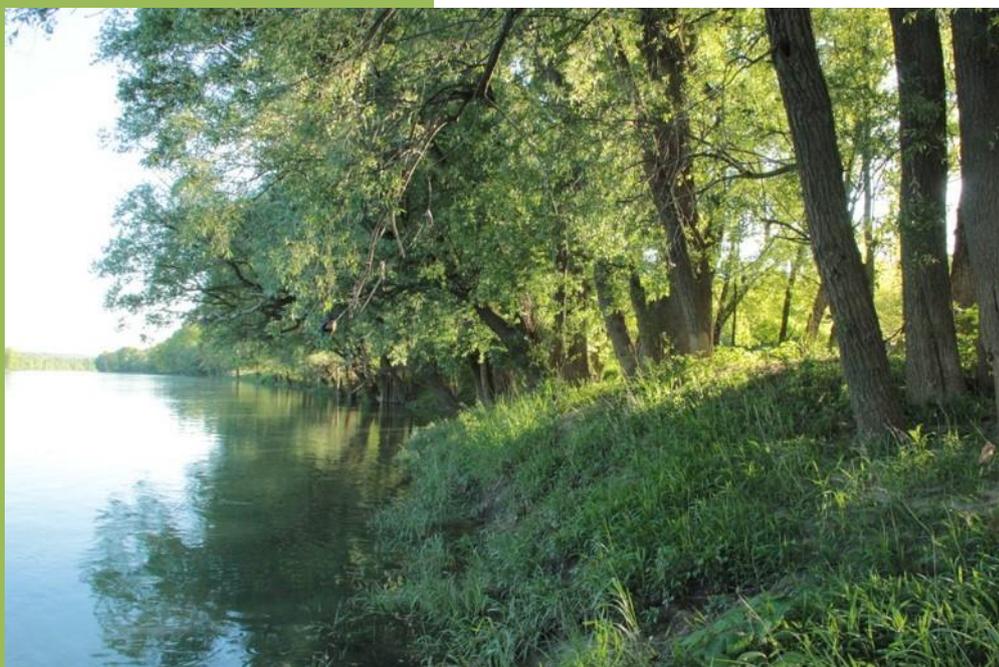
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de l'évolution géométrique du corridor de Genève à la mer



Action 1

Version finale – avril 2014



2013 – SEMESTRE 8

Rédacteurs	Equipe de recherche
<i>Elsa Parrot, Hervé Piégay, Lise Vaudor, Guillaume Fantino</i>	Environnement Ville et Société (EVS), CNRS UMR 5600, ENS de Lyon
<i>Michal Tal</i>	Aix-Marseille Université CEREGE UMR 7330

**ANALYSE DE L'EVOLUTION GEOMETRIQUE DU
CORRIDOR DE GENEVE A LA MER**

Table des matières

INTRODUCTION	4
1) OBJECTIFS	4
2) CONTEXTE	4
3) LE FONCTIONNEMENT D'UN COURS D'EAU.....	8
a. <i>Le système fluvial</i>	8
b. <i>L'hydrosystème fluvial</i>	8
4) L'ETUDE DU PROFIL EN LONG	9
a. <i>Profil en long, pente et mésoformes</i>	9
b. <i>Trois niveaux scalaires à prendre en compte dans le diagnostic morphologique</i>	9
c. <i>Les faciès morphologiques</i>	10
5) LES IMPACTS MORPHOLOGIQUES DES ACTIONS ANTHROPIQUES	17
MATERIELS ET METHODES	22
1) DONNEES DISPONIBLES	22
2) ETUDE DE L'EVOLUTION ALTIMETRIQUE DU LIT ENTRE LES DATES D'OBSERVATION.....	25
a. <i>Extraction du profil en long à partir des profils en travers et des cartes bathymétriques anciennes</i> ..	25
b. <i>Interprétation des changements</i>	26
3) ETUDE DES FORMES DU FOND DU CHENAL.....	27
a. <i>Détection et caractérisation des méso-formes du fond par la moyenne mobile</i>	27
b. <i>La méthode des ondelettes</i>	29
RESULTATS	31
1) EVOLUTION VERTICALE DU LIT ENTRE 1951 ET 2011 DE GENEVE A LA MER	31
a. <i>Etude de l'évolution verticale entre le lac Léman et Lyon</i>	31
b. <i>Etude de l'évolution verticale du lit entre Lyon et la mer</i>	40
2) EVOLUTION ALTIMETRIQUE DU LIT ENTRE 1897/1907-08 ET 2010 DE LYON A LA MER	43
a. <i>Elaboration et comparaison de 5 profils en long synthétisant 5 grandes phases</i>	43
b. <i>Etude quantifiée des évolutions verticales du lit par période</i>	56
c. <i>Analyse des tendances longitudinales par le cumul du différentiel altimétrique par période</i>	64
d. <i>Réactivité et sensibilité verticale du lit actuel aux épisodes de crue</i>	71
3) EVOLUTION LONGITUDINALE ET TEMPORELLE DES FORMES DU LIT A PARTIR DE LA MOYENNE MOBILE	73
a. <i>Extraction des méso-formes à partir du profil en long lissé</i>	73
b. <i>Segmentation en 55 tronçons homogènes</i>	77
c. <i>Régionalisation des tronçons homogènes en fonction des caractéristiques des formes fluviales</i>	80
d. <i>Evolution temporelle des formes du fond sur trois secteurs</i>	83
4) EVOLUTION GENERALES DES FORMES DU LIT ENTRE 1897-1907 A 2011 PAR LA METHODE DES ONDELETTES.....	87
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	89
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	95
TABLE DES ILLUSTRATIONS	99
TABLE DES TABLEAUX	101
TABLE DES ANNEXES	102
ANNEXES	103

Introduction

L'anthropisation du linéaire du Rhône au cours de ces 150 dernières années, en termes d'aménagements (digues, épis, barrages ...) et de changements d'occupation du sol (l'agriculture favorisant l'érosion des sols, l'industrialisation impliquant leur fermeture...), a provoqué la modification morphologique du lit. Cette étude propose de rendre compte de ces évolutions morphologiques, en se basant sur une analyse historique quantifiée de la topographie du chenal.

1) Objectifs

Cette action a ainsi pour but d'établir un diagnostic objectif et partagé de l'état et de l'évolution morphologique du lit au cours du dernier siècle sur tout le continuum.

La connaissance détaillée de l'histoire de cette géométrie permet également de comprendre les évolutions du fonctionnement sédimentaire du fleuve et les impacts des aménagements successifs depuis la moitié du XIX^{ème} siècle. Cette action permet de constituer une base de connaissances pour aborder, de manière plus opérationnelle, les conditions de transport solide et les risques associés, les questions en lien avec la restauration écologique, l'état des habitats. Cette caractérisation à large échelle, c'est-à-dire celle de l'ensemble du corridor, réalisée conjointement avec l'action 2, sert d'état de référence pour le système d'observation.

Ce travail consiste, dans un premier temps, à recenser les données topographiques disponibles permettant de caractériser les effets morphologiques des différentes phases d'anthropisation du fleuve depuis la fin du 19^{ème} siècle. Puis, dans un deuxième temps, il s'agit d'analyser ces données afin de comprendre l'organisation longitudinale en termes de pente et d'agencement des formes du fond du lit (les faciès morphologiques) qu'elles soient actuelles ou passées. L'analyse historique est également complétée par une analyse de la position altimétrique (incision/exhaussement) du lit.

2) Contexte

Le Rhône a enregistré au cours des deux derniers siècles plusieurs phases d'aménagement qui ont conduit à la géométrie actuelle. La première phase d'aménagement a eu lieu entre 1860 et 1930. Elle a consisté en la construction de digues, afin de contenir le fleuve lors des crues, et d'épis transversaux (casiers Girardon) pour favoriser l'incision du lit, le dépôt de sédiments fins sur les marges, et faciliter la navigation (augmentation du tirant d'eau, auto-curage). La deuxième phase d'anthropisation s'est déroulée entre 1948 et 1986 avec la construction d'usines hydro-électriques pour les besoins en énergie. La configuration du Rhône a alors évolué en fonction de ces aménagements : de façon générale, on a creusé un canal de dérivation (canal d'amenée + canal de fuite) sur lequel est implanté une usine et une écluse, et construit un barrage de retenue sur le bras du Rhône d'origine pour contrôler les débits (Figure 1). Ainsi, le bras « naturel » du Rhône se retrouve court-circuité en un vieux Rhône (Figure 1) maintenu à un débit réservé plus faible et donc soumis à une réduction dans le transport sédimentaire.

Nous étudions le linéaire d'origine du Rhône, c'est-à-dire le Rhône total et les vieux Rhône, canaux exclus (Figure 1), du secteur de Génissiat au secteur du Grand Rhône, Petit Rhône exclu (Figure 3).

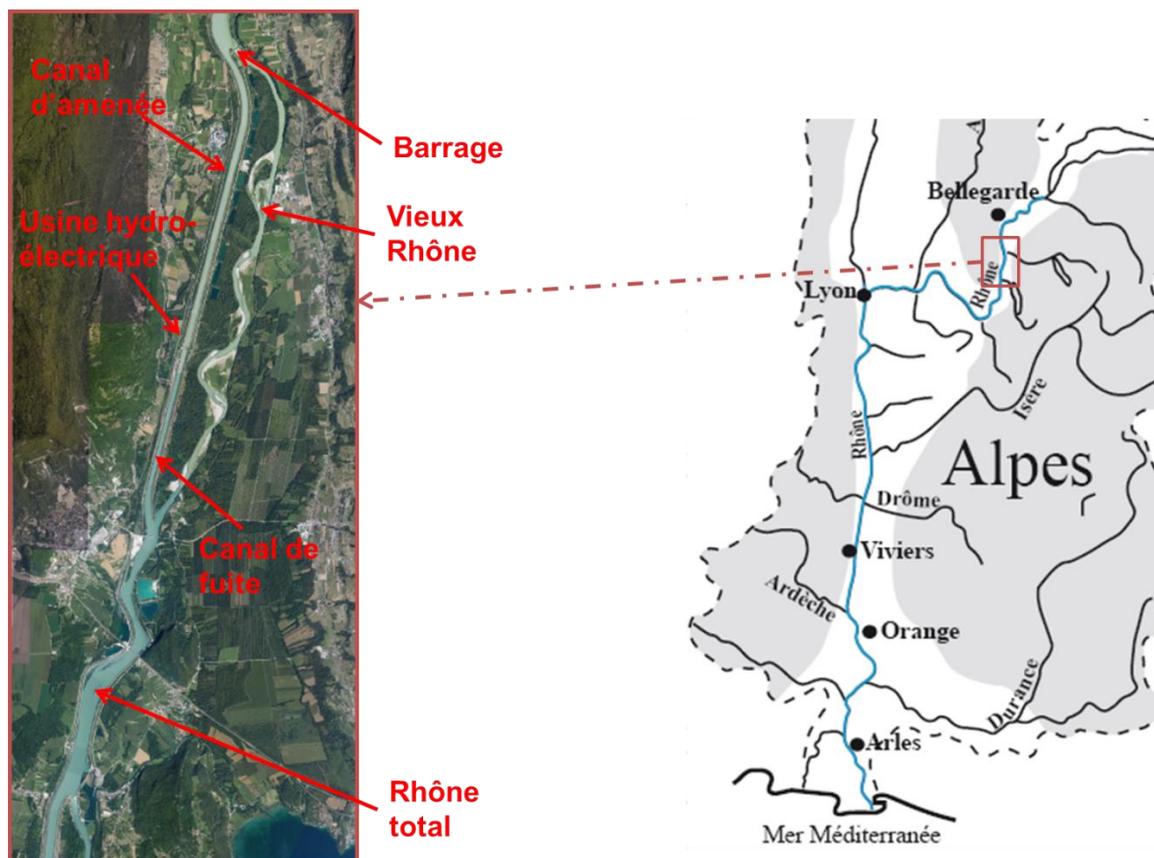
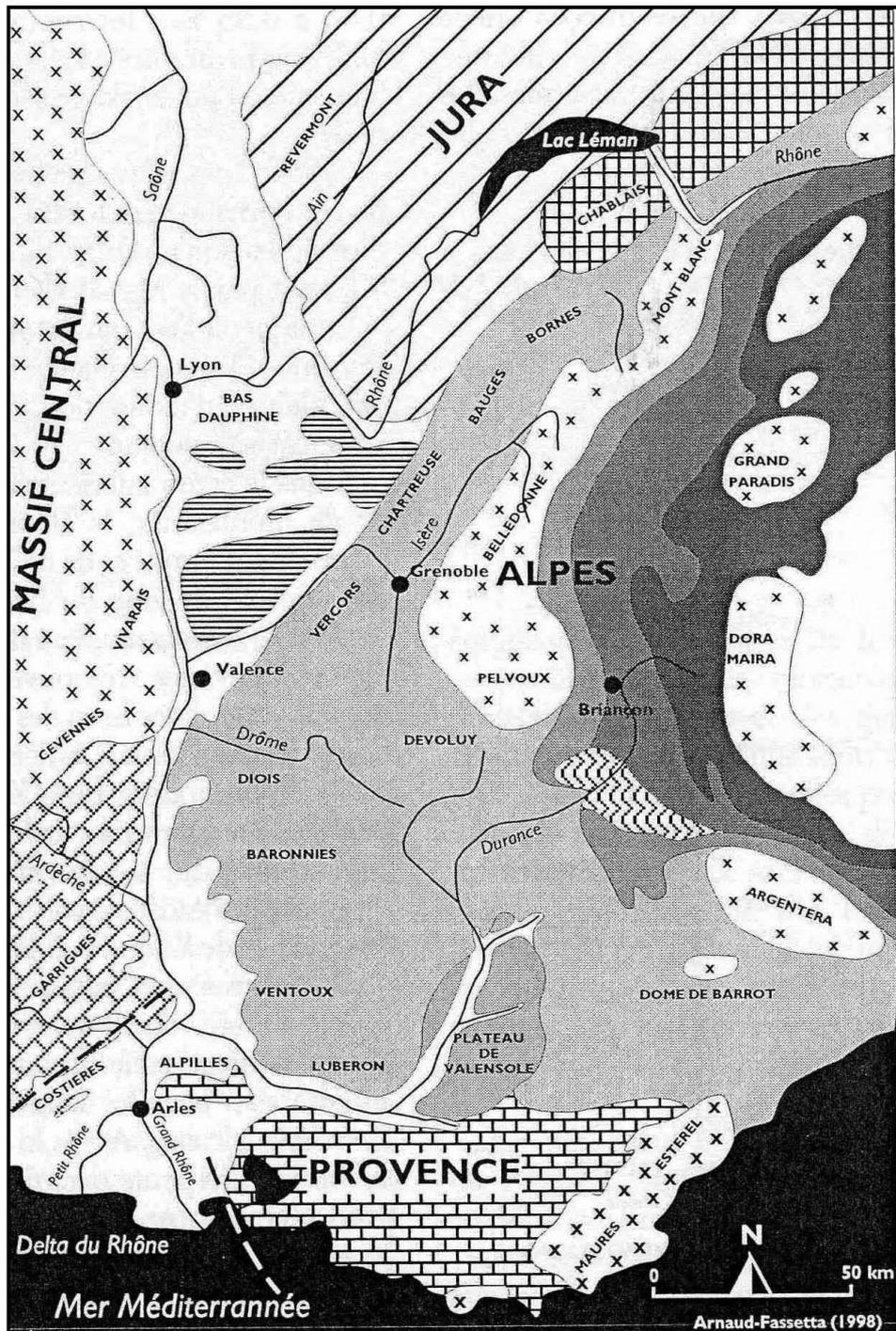


Figure 1 : Configuration type des aménagements présents sur le Rhône (à gauche : orthophotographie, IGN, 2006)

Le Rhône traverse des unités topographiques et géologiques très diversifiées (Figure 2). D'après Beaudouin et Rycx (2000), à l'aval du Lac Léman, le fleuve est contraint dans les gorges du massif calcaire du Jura (correspondant aux secteurs amont jusqu'à Sault-Brénaz-SBR, Figure 3). La haute vallée du Rhône est caractérisée depuis la fonte du glacier würmien par une tendance au remblaiement d'une succession d'ombilics glaciaires de Brégnier-Cordon (BRC) à Sault-Brénaz (Berger et al. 2008, Bravard, 1986). Puis il s'ouvre largement dans la région du bas Dauphiné, caractérisée par des terrains calcaires et des marnes sableuses (entre SBR et LYM, Figure 3). Cette région correspond aux dépôts fluvio-glaciaires issus des eaux de fontes 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, le Rhône s'écoulant dans des gorges épigéniques (jusqu'à Baix le Logis Neuf-BLN, Figure 3). A partir de Montélimar (MON, Figure 3), les affluents de rive droite (Ardèche, Cèze, Gardon) drainent en partie les Cévennes cristallines 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 3). Après la confluence avec la Durance, le delta du Rhône prend naissance à partir d'Arles (de BEC jusqu'à la mer).



Arnaud-Fassetta (1998)

UNITES MORPHOSTRUCTURALES REGIONALES

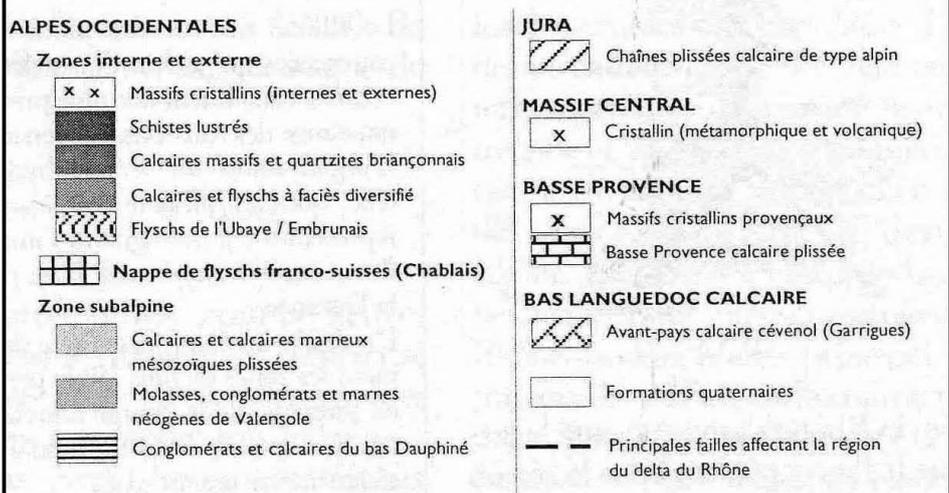


Figure 2 : La géologie du bassin versant du Rhône, (Arnaud-Fassetta, 1998)

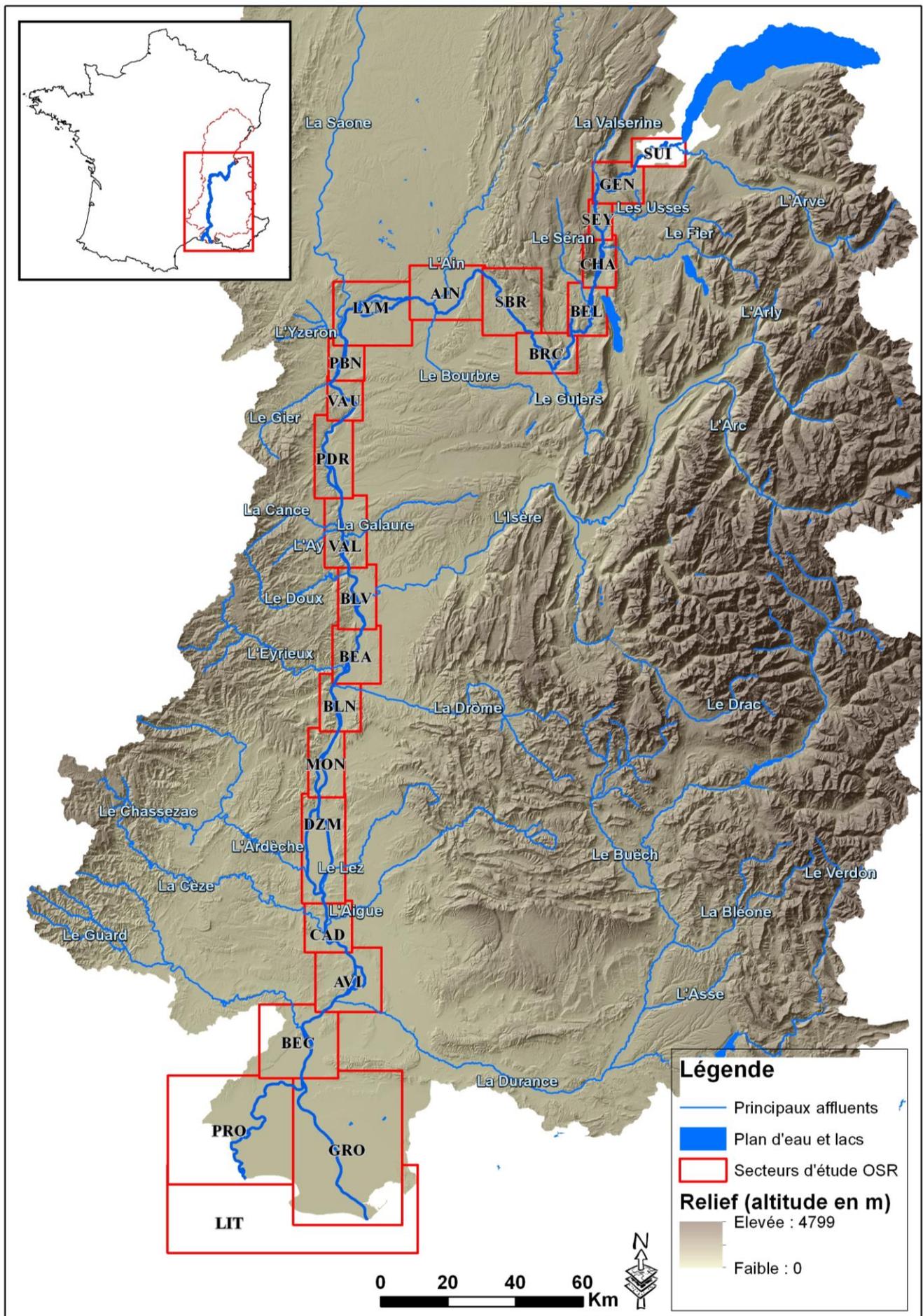


Figure 3 : Le Bassin du Rhône, son réseau hydrographique et son orographie. Localisation des secteurs du fleuve Rhône : Génissiat (GEN), Seyssel (SEY), Chautagne (CHA), Belley (BEL), Brégnier-Cordon (BRC), Sault-Brenaz (SBR), l'Ain (AIN), Lyon-Miribel (LYM), Pierre-Bénite (PBN), Vaugris (VAU), Péage 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 par G. Fantino)

3) Le fonctionnement d'un cours d'eau

En géomorphologie fluviale, comme en écologie, le cours d'eau est le plus souvent appréhendé en s'appuyant sur les concepts complémentaires de système fluvial et d'hydrosystème fluvial (Figure 4).

a. Le système fluvial

Schumm (1977) décrit les transferts longitudinaux d'eau et de sédiments dans le bassin versant. Il est divisé en trois zones, au sein desquelles coexistent les processus d'érosion, de transport et de dépôt (Church, 2002) :

- la zone de production : en termes de bilan l'érosion l'emporte sur le dépôt
- la zone de transfert : les deux processus s'équilibrent
- la zone de stockage : le dépôt l'emporte sur l'érosion

b. L'hydrosystème fluvial

Il est un sous-ensemble du système fluvial, qui appréhende les échanges et les interactions dans quatre dimensions (Roux, 1982 ; Amoros et Petts, 1993) :

- longitudinale : de l'amont vers l'aval
- latérale : entre le lit mineur et la plaine alluviale
- verticale : entre le chenal et la nappe d'accompagnement
- temporelle

Les diverses connectivités écologiques (Amoros et Roux, 1988, cités par Muhar et Jungwirth, 1998) qui régissent un hydrosystème fluvial impliquent des flux d'eau, de sédiments, d'énergie, de substances nutritives, de détritiques ainsi que le transit passif ou actif d'organismes vivants. Ces flux sont bidirectionnels et peuvent être étudiés à des niveaux scalaires emboîtés.

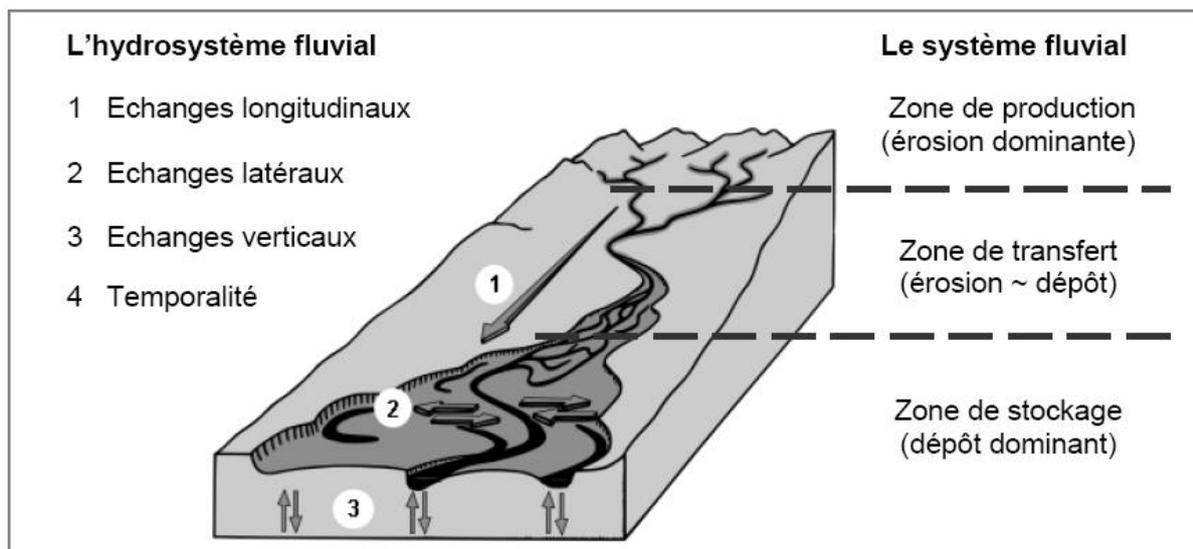


Figure 4 : Emboîtement schématisé de l'hydrosystème fluvial dans le système fluvial (d'après Amoros et Petts, 1993)

4) L'étude du profil en long

a. Profil en long, pente et mésoformes

Le profil en long d'un cours d'eau représente graphiquement l'altitude du lit en fonction de la distance aval. Il en existe plusieurs types :

- la ligne d'eau, bien souvent la ligne d'eau d'étiage qui lisse la variabilité locale des formes fluviales,
- le fond du lit, correspondant fréquemment au thalweg, c'est-à-dire à la ligne des plus bas-fonds.

La ligne d'eau est bien utile pour déterminer les pentes car le point altimétrique aval est toujours plus bas que le point immédiatement amont. Le fond du lit est par contre plus intéressant pour étudier les faciès morphologiques puisqu'il décrit l'irrégularité topographique du fond où l'altitude ne décroît pas d'un point à l'autre. Le fond d'un cours d'eau montre une rugosité qui matérialise une alternance de pentes positives et négatives.

Les perturbations (crues importantes, gros apports sédimentaires) peuvent modifier la topographie du lit d'un cours d'eau et aussi influencer les conditions d'habitat aquatique (Madej, 1999).

Aussi, lorsqu'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. Le profil en long d'un cours d'eau trace souvent une forme concave quand il est à l'équilibre (Church, 1995). Tandis qu'en étudiant la pente locale (ici tous les 500 m), plus adaptée à l'étude de faciès, nous cherchons à comprendre les changements locaux résultant des différents aménagements (casiers Girardon et barrages).

Lorsque plusieurs profils en long ont été levés, il est possible d'étudier l'évolution altimétrique du lit entre ces levés et d'identifier des zones d'exhaussement et d'incision. Ceci peut se faire avec les lignes d'eau d'étiage ou avec le thalweg. 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.

b. Trois niveaux scalaires à prendre en compte dans le diagnostic morphologique

La structuration morphologique des rivières s'exprime à différentes échelles spatiales. On compte trois principaux niveaux scalaires (Frissel, 1986 ; Amoros et Petts, 1993 ; Wasson et al., 1998) :

- L'échelle régionale (Figure 5), où se fait la segmentation des vallées en tronçons homogènes en fonction des conditions physiographiques du bassin résultant du contexte géologique, des héritages quaternaires et de la hiérarchisation du réseau hydrographique (ordre de Strahler).
- L'échelle d'un tronçon fluvial de quelques kilomètres au plus (Figure 5). Il s'agit, à ce niveau, de segmenter le continuum fluvial en séquences de faciès morpho-dynamiques ou de méso-habitats si l'on se réfère aux communautés piscicoles. Ce découpage se fait selon des variations locales, comme la pente, le substrat, la largeur et la profondeur du lit ou la végétation riveraine, soumises à des facteurs naturels et anthropiques.

- L'échelle locale du faciès (Figure 5) : les différences longitudinales ou transversales de l'écoulement ainsi que les particularités physiques permettent de distinguer des ambiances différentes et des microhabitats.

L'étude d'un profil en long peut rendre compte des caractères morphologiques d'un cours d'eau et de leur évolution à ces trois échelles.

c. Les faciès morphologiques

Les perturbations (crues importantes, gros apports sédimentaires) peuvent modifier la topographie du lit d'un cours d'eau et aussi influencer les habitats aquatiques (Madej, 1999). L'étude du thalweg, c'est-à-dire le point le plus bas de la section en travers d'un cours d'eau, peut être réalisée à la fois dans une dimension spatiale et temporelle. 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 lignes d'eau qui ont tendance à lisser les anomalies locales (Couvert et al., 1999). Dans notre cas, nous exploitons les profils en long du thalweg dont l'intérêt est de fournir une caractérisation de la variabilité des faciès, notamment après chaque phase d'aménagement.

Ainsi, le thalweg peut renseigner sur 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 thalweg pour calculer un indice de diversité des habitats (thalweg diversity ou TWD). Ils ont par ailleurs souligné que la pente du thalweg, dans les cours d'eau naturels, variait de façon importante du fait de la présence des seuils et des mouilles et impliquait un fort TWD, tandis que dans le cas d'une section chenalisée, la pente du thalweg restait plutôt uniforme.

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 détache et l'espace de liberté du chenal est limité géométriquement) et colluvions (particules très fines provenant principalement du lessivage des terres) sont à différencier de ceux constitués d'alluvions. Les cours d'eau de type alluvions 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). Nous nous concentrerons donc sur les sections alluvionnaires, plus représentatives de notre terrain, et décrivant les ondulations du fond des lits.

CADRE PHYSIQUE

FONCTIONS BIOLOGIQUES

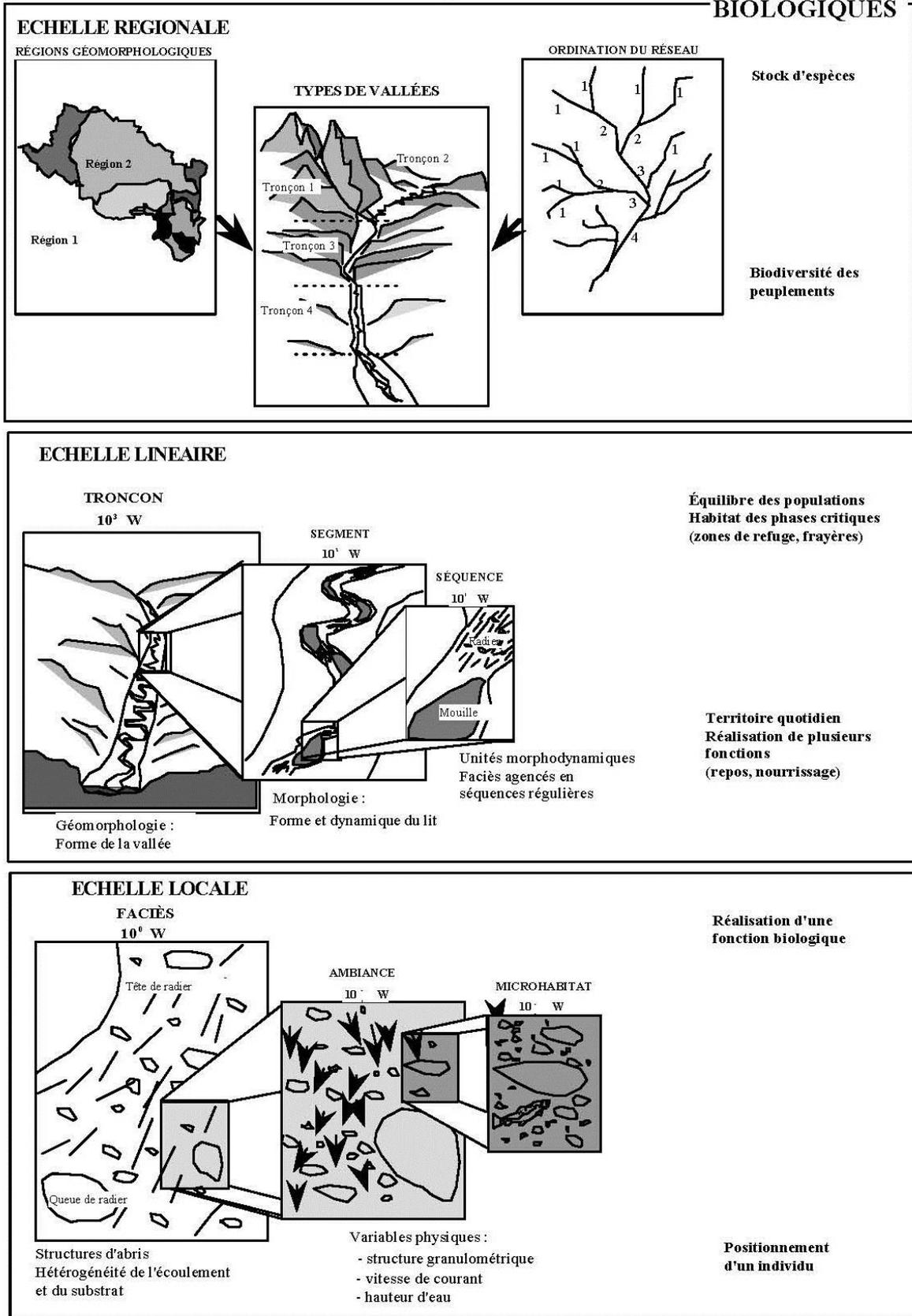


Figure 5 : Habitat et morphologie : des échelles emboîtées (Wasson et al. 1995)

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 caractéristique, une pente de la surface en eau, une profondeur, une granulométrie et une vitesse type.

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 sont différents. Comme le soulignent Jowett (1993) et les différents tests qu'il a conduit, la détermination des seuils et des mouilles est très complexe. De nombreuses études se sont heurtées au problème, sans réellement arrêter de critères précis afin d'identifier les méso-formes, mais en se basant sur des points spécifiques et descriptifs :

- 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.

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 de ces faciès constituant un type de chenal sont répertoriés et caractérisés dans le Tableau 1. La Figure 6 et la Figure 7 montrent respectivement une illustration en plan et en coupe longitudinale des cinq alternances de faciès décrites par Montgomery et Buffington (1997).

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

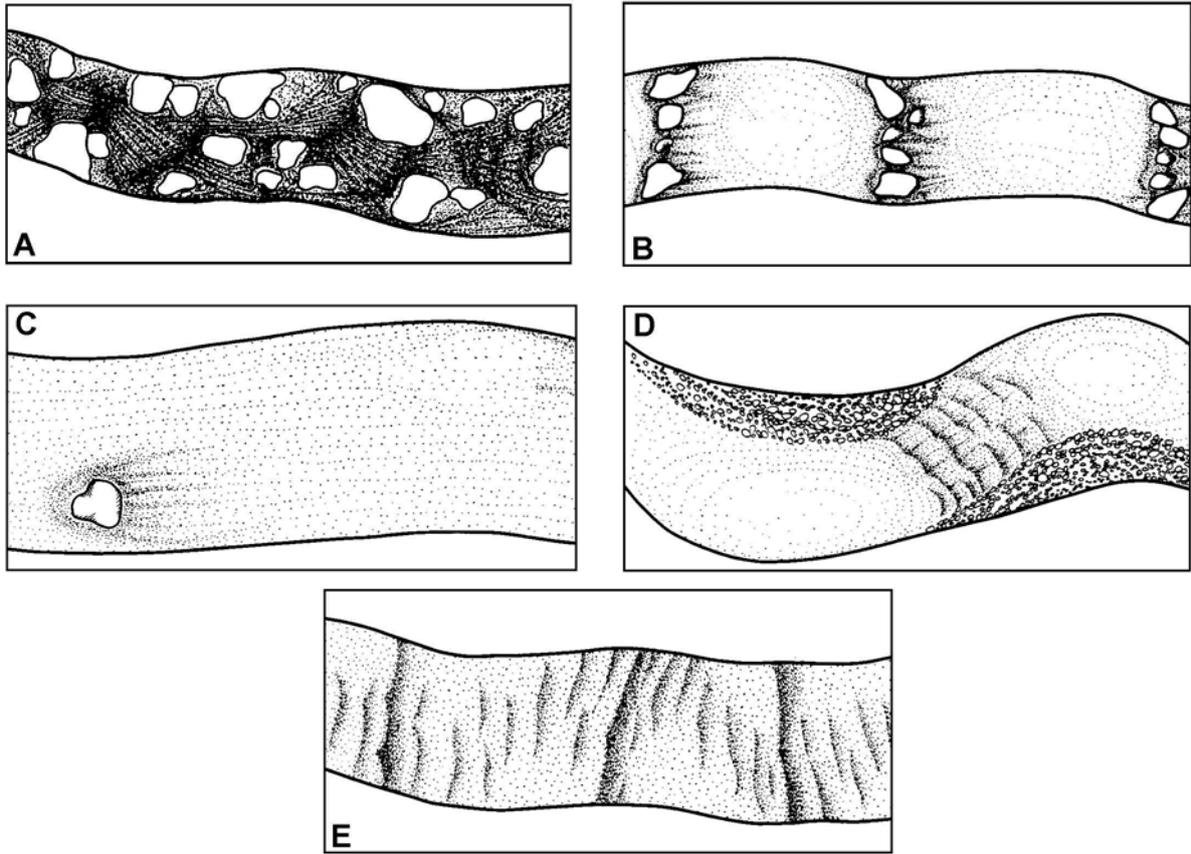


Figure 6 : Représentation schématique en plan des alternances de faciès typique de substrat alluvionnaire à faible débit : (A) succession de cascades présentant des débits turbulents autour des blocs ; (B) alternance de plats-mouilles avec des zones turbulentes au niveau des plats, et plus calmes au 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.

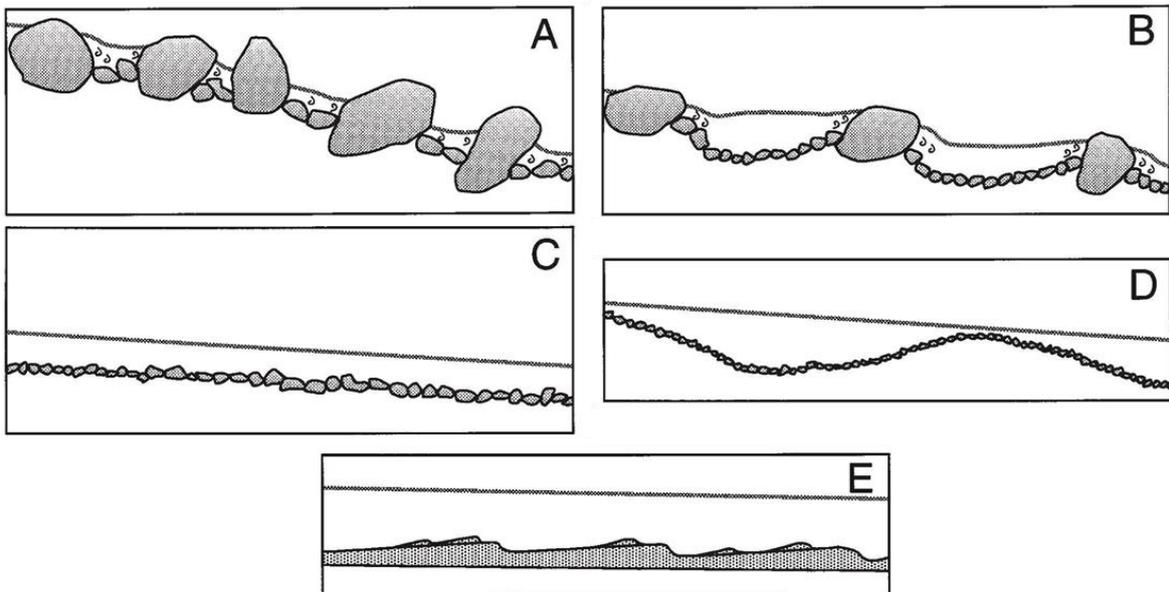


Figure 7 : Représentation schématique du profil longitudinal des cinq alternances de faciès type : (A) cascades ; (B) plats-mouilles ; (C) plat ; (D) seuils-mouilles ; (E) dunes-rides

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 2).

Faciès morphologiques	Mouille	Seuil	Rapide	Cascade	Plat
Pente moyenne (%)	0.005	0.011	0.029	0.055	0.173

Tableau 2 : Pentes moyennes du lit de chaque faciès morphologiques, déterminées par Grant et al. (1990) sur deux cours d'eau en Oregon

L'étude de Grant et al. (1990) indique que les séquences de faciès ne sont pas aléatoires. La pente du faciès amont est inversement corrélée à la pente de l'unité aval. Les séquences de faciès qui se suivent préférentiellement ont été mises en évidence dans leurs travaux. Il a été démontré que les alternances les plus fréquentes ramenaient la succession de faciès à forte pente (rapides, cascades, plats) vers les mouilles (Figure 8). La formation des mouilles pourrait résulter de l'accélération et de la convergence des écoulements dans les faciès immédiatement en amont. Les faibles pentes et l'absence de convergence des écoulements sur les niveaux de seuils réduisent la probabilité de former des mouilles à l'aval par affouillement. D'autre part, les mouilles aboutissent préférentiellement à des cascades ou des plats, suggérant un autre mécanisme de formation. Les cascades et les plats sont suffisamment raides pour servir de barrage-déversoir critique lorsque le débit est faible à modéré. La formation des mouilles en amont de ces unités est favorisée par les remous derrière ces barrages rocheux naturels.

En hydrogéomorphologie, les faciès, principalement les alternances seuils-mouilles, sont considérés comme étant des unités fondamentales des cours d'eau (Malavoi et Souchon, 2002 ; O'Neil et Abrahams, 1984 ; Newbury et Gaboury, 1993). Ces faciès 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, l'identification des seuils et des mouilles constitue une part importante de la caractérisation des lits fluviaux. 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 dépeint les rivières comme une combinaison de tendances à grande échelle en énergie, en matière, et en structure d'habitat dans les cours d'eau. L'application de ce concept fluvial nécessite des informations sur la distribution spatiale des habitats à travers les systèmes fluviaux.

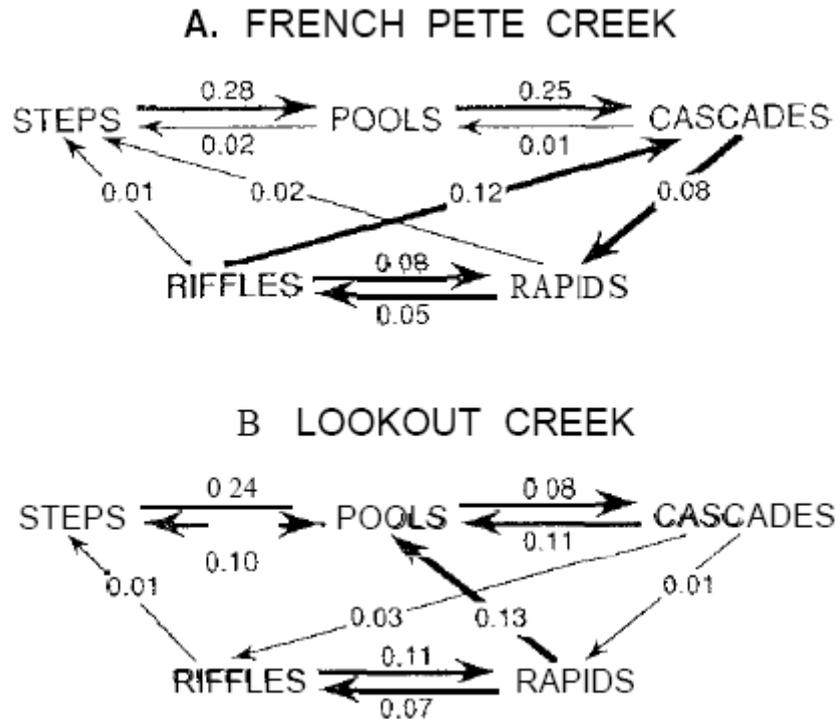


Figure 8 : Diagrammes de relations-séquence réalisés sur deux cours d'eau, la French Pete Creek (A) et la Lookout Creek (B). Les chiffres indiqués sont les différences entre les probabilités de transition observées et aléatoires. Les flèches en gras indiquent les probabilités de transition > 0,05 (Grant et al., 1990)

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 géomorphologues définissent les faciès par rapport à la topographie du lit du fait qu'elle retranscrit les conditions hydrauliques (Richards, 1976). Ils définissent alors ces faciès comme étant des ondulations dans la topographie du lit (O'Neill et Abrahams, 1984).

L'étude des paramètres physiques de ces formes est une étape essentielle dans la caractérisation des faciès, en termes de combinaison de différents paramètres. Le rapport de la profondeur des faciès (par rapport à la ligne d'eau) sur la largeur mouillée (A/W), nommé coefficient de forme (Malavoi et Souchon, 2002) est utilisé pour décrire la géométrie des différents faciès d'écoulement ; un rapport élevé caractérise les faciès profonds et un rapport faible, les faciès peu profonds.

Le rapport de la longueur d'onde des faciès sur la largeur mouillée (λ/W), découle du principe que la largeur influence 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 étant un bon guide pour évaluer dans le temps les effets de certaines modifications sur la morphologie des cours d'eau (chenalisation, déboisement, reboisement, autres occupations des sols, aval de barrages) ou pour des questions de restauration morphologique (Newbury et Gaboury, 1993).

5) Les impacts morphologiques des actions anthropiques

Les aménagements qu'il s'agisse de rectifications et d'endiguements du chenal, ou de barrages peuvent avoir des conséquences sur la morphologie du chenal.

D'après Wasson et al. (1995), 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. Ces modifications peuvent s'étendre au-delà de la section touchée, entraînant des effets sur du long terme après l'intervention, et aboutissant à une altération irréversible du milieu physique. Il faut donc tenir compte à la fois :

- de l'extension spatiale en distinguant :
 - les effets locaux qui se développent au sein du segment directement touché
 - les effets induits qui apparaissent dans les segments situés de part et d'autre de ce dernier et particulièrement à l'aval (Allee et al., 1981; Simpson et al., 1982; Brookes, 1985, 1988) ;
- de l'évolution temporelle en distinguant :
 - les effets immédiats qui apparaissent dès l'intervention : dans le segment aménagé, modifications de la morphologie du lit (géométrie, faciès, substrats) et de ses caractéristiques hydrodynamiques (profondeur, vitesse) causées directement par les travaux; à l'aval, cet effet lié à la remise en suspension des sédiments fins puis dépôt et colmatage des substrats;
 - les effets à long terme, ou modifications morphodynamiques différées qui découlent des phénomènes de réajustement du cours d'eau en réponse à l'aménagement.

La Figure 9, d'après Brookes (1988) et modifiée par Wasson et al. (1995), synthétise bien la complexité des interactions aboutissant à ces impacts.

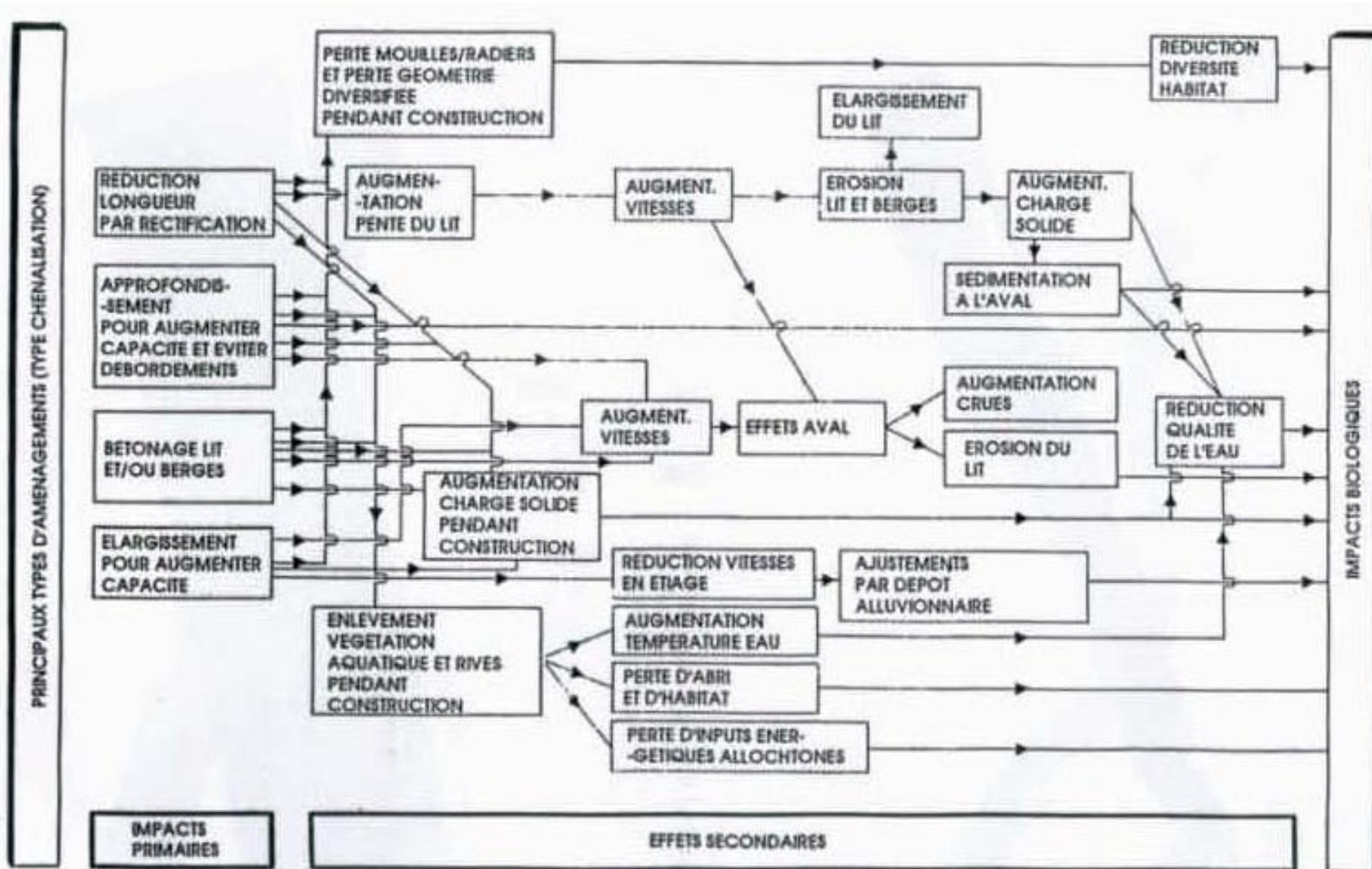


Figure 9 : Effets primaires et secondaires des aménagements en rivière, d'après Brookes (1988) cité par Wasson et al. (1995)

Brookes (1988) présente les 5 types majeurs de réajustement observés à la suite d'une chenalisation des cours d'eau danois qu'il a étudiés :

- **l'ajustement par encaissement** : réponse provoquée par l'augmentation de la pente directement consécutive à la rectification du tracé, augmentation provoquant généralement une accentuation des forces tractrices et donc une érosion verticale concomitante (régressive ou progressive). Ce type de réponse se produit sur des segments à énergie relativement élevée.
- la mise en place d'une **armure granulométrique**. Il s'agit d'une ségrégation progressive des matériaux du lit, liée généralement à une érosion verticale. Les éléments les plus fins sont peu à peu transportés vers l'aval, les éléments grossiers, dépassant la compétence du courant, formant à terme une protection du fond qui peut enrayer le processus d'encaissement, le rendant plus stable, voire immobile.
- le **développement d'un thalweg sinueux**, généralement observé sur des segments à pente forte.
- la **restauration d'une sinuosité globale du lit** (et non plus uniquement du thalweg). Cette réponse fut observée par Brookes sur 13 sites présentant des pentes très fortes.
- un **processus d'accrétion plutôt que d'incision**. Il est le plus souvent observé sur des segments ayant été sur-calibrés dans des zones à pente faible mais à forte fourniture alluviale provenant de l'amont.

D'après Wasson et al. (1995), 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. Cette situation se traduit par une homogénéisation des conditions d'écoulement et en parallèle à une disparition des structures d'abris. La Figure 10 compare schématiquement la physionomie d'un segment de cours d'eau dit naturel, offrant des conditions d'habitat diversifiées et une alternance de radiers et de mouilles avec celle d'un segment dit artificiel, montrant très clairement l'homogénéisation de l'habitat.

Une conséquence directe et constante de cette homogénéisation est l'aggravation des conditions physiques au cours des épisodes critiques du cycle hydrologique que sont les crues et les étiages. En crue, l'accélération et surtout l'homogénéisation des vitesses, la disparition des abris, la déstabilisation plus fréquente du substrat sont autant de facteurs aggravants. A l'étiage, l'étalement de la lame d'eau avec réduction des vitesses et disparition des mouilles est extrêmement pénalisant pour les poissons.

Au niveau du substrat les manifestations les plus fréquentes sont d'une part une déstabilisation induisant des remaniements plus fréquents, voire permanents jusqu'à obtention d'une structure stable, et très généralement un colmatage par des fines dans les zones calmes.

Enfin un point très important est la perte de connectivité transversale entre le chenal et le lit majeur. Les ouvrages transversaux de stabilisation qui accompagnent fréquemment la chenalisation aboutissent également à une diminution de la continuité amont-aval.

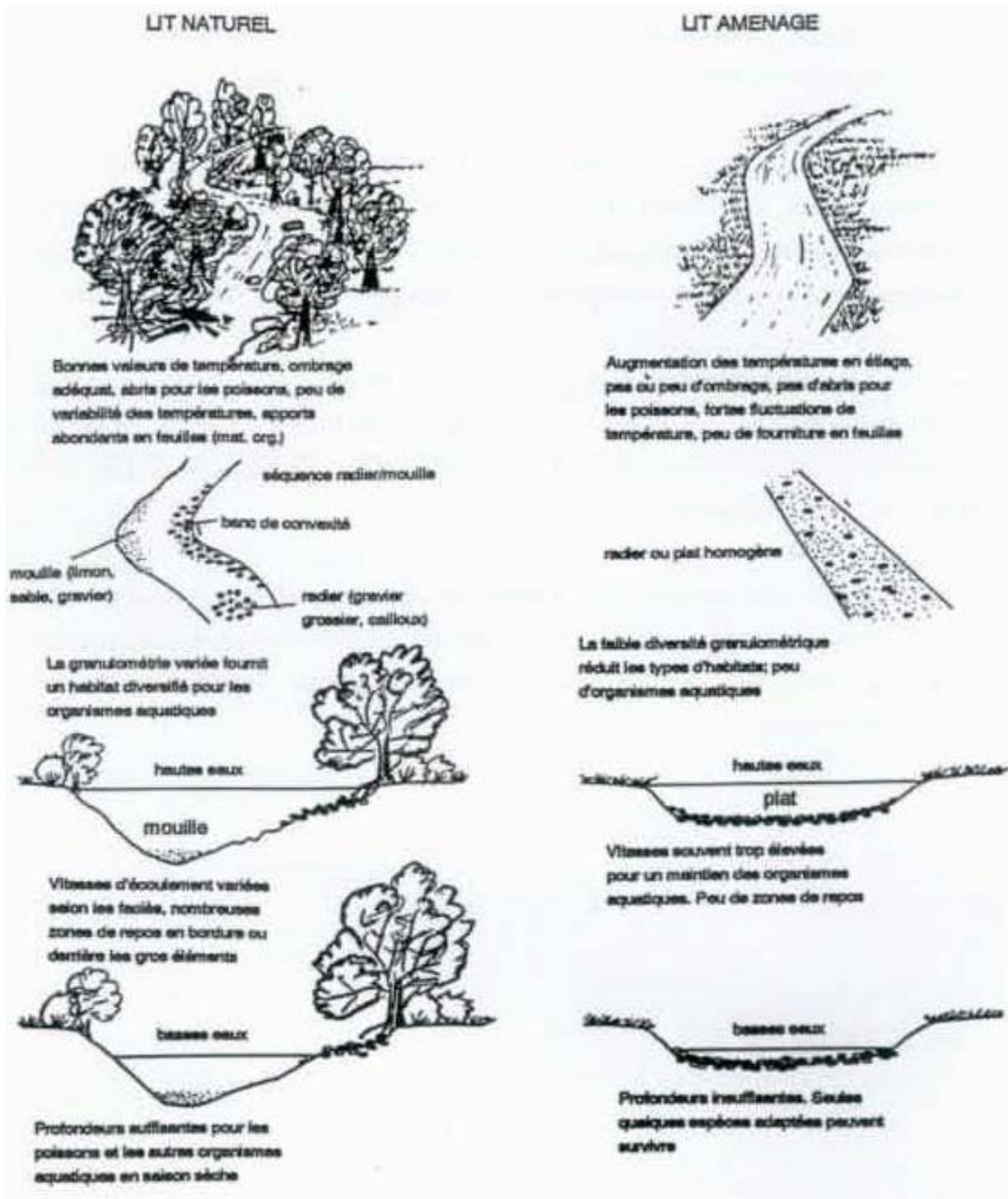


Figure 10 : Comparaison entre la morphologie et les paramètres hydrodynamiques sur un segment naturel et canalisé. D'après Corning (1975), dans Wasson et al. (1995).

F. Arnaud (2012) souligne également différents types d'impacts morphologiques sur le Rhin à l'aval de Kembs résultant à la fois des endiguements du 19^{ème} siècle et de la dérivation de l'écoulement dans un canal suite à la construction du barrage (Figure 11) : incision, simplification du fond du lit, armurage du fond du lit, rétraction du lit par végétalisation des bancs...

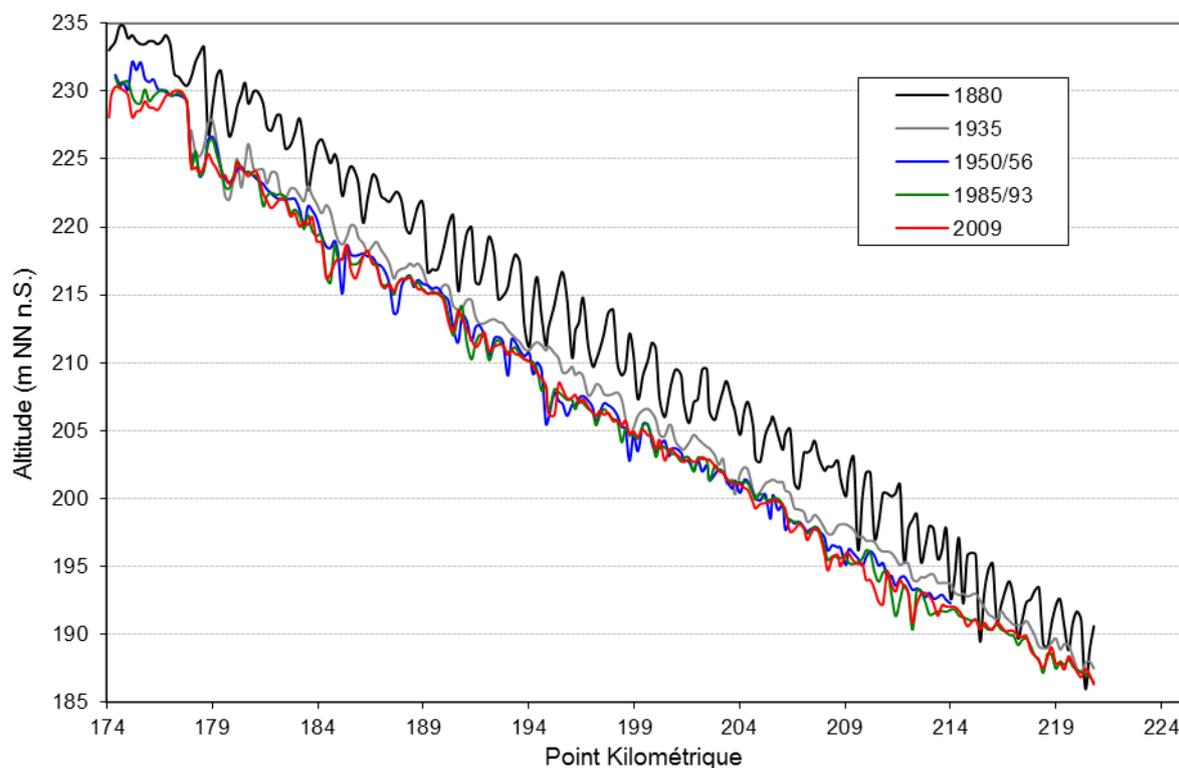


Figure 11 : Evolution des profils en long d'un tronçon endigué et court-circuité du Rhin à l'aval du Barrage de Kembs de 1880 à 2009, suite aux différentes phases d'aménagements (Arnaud, 2012).

En effet, les travaux de Church (1995) mettent en cause le rôle des barrages dans le blocage des sédiments et dans l'exhaussement du profil en long en amont de l'ouvrage. Aussi, le changement hydraulique causé par les barrages peut perturber la morphologie du profil en long. En amont des barrages, le profil en long peut s'exhausser du fait du blocage des sédiments. L'élévation du lit peut augmenter et la pente diminuer. A l'aval de l'ouvrage, du fait du déficit sédimentaire, il y a incision, celle-ci étant susceptible d'induire une augmentation de la pente (Antonelli, 2002). Suite à la diminution des débits de crue dans les vieux-Rhône résultant des dérivations, celui-ci n'est plus suffisamment compétent pour mettre en mouvement les sédiments. Il peut ainsi se créer des exhaussements au niveau des confluences lorsque les affluents introduisent des sédiments dans la section concernée, perturbant le profil en long.

Nous nous posons la question de savoir si le profil en long du Rhône a drastiquement changé suite aux deux phases d'aménagement comme cela a pu être observé par exemple sur le Rhin. Dès lors, quel a été l'impact de chaque opération sur le niveau altimétrique moyen du lit ou encore sur la géométrie et les types de faciès morphologiques ?

Matériels et méthodes

1) Données disponibles

Pour suivre l'évolution de la géométrie du lit, notre étude nécessite des données bathymétriques récentes et anciennes. Nous avons utilisé des données bathymétriques actuelles (entre 1999 et 2008) dans le 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-Brenaz et l'amont de Lyon). 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.

Le Tableau 4 a été obtenu suite au recensement des données bathymétriques disponibles sur le logiciel BATHY de la CNR. Elle permet de mettre 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 :

- en continue longitudinalement et à intervalle régulier au cours du temps
- à l'amont et à l'aval des aménagements
- avant la construction des barrages

Des scans de cartes de relevés bathymétriques (Figure 12), antérieures à la construction des barrages et postérieures aux ouvrages Girardon, ont été récupérés auprès de G. Raccasi. Ces cartes proviennent de :

- VNF (format papier) : correspondant au secteur de Saint Vallier-VAL, 1908
- La Direction Régionale CNR d'Avignon (format scan sans géo-référencement, G. Raccasi) : de Lyon à la mer, 1897 (de Lyon à Montélimar)-1907-08 (de Montélimar à la mer)

Le second jeu de données a été géo-référencé par J. Ambert et L. Mathieu (stages de L3) afin d'extraire les données bathymétriques. Le profil en long du thalweg est étudié afin de suivre son évolution à chaque intervalle des aménagements.

Bilan des données bathymétriques disponibles de la CNR (un profil en travers tous les 500m)

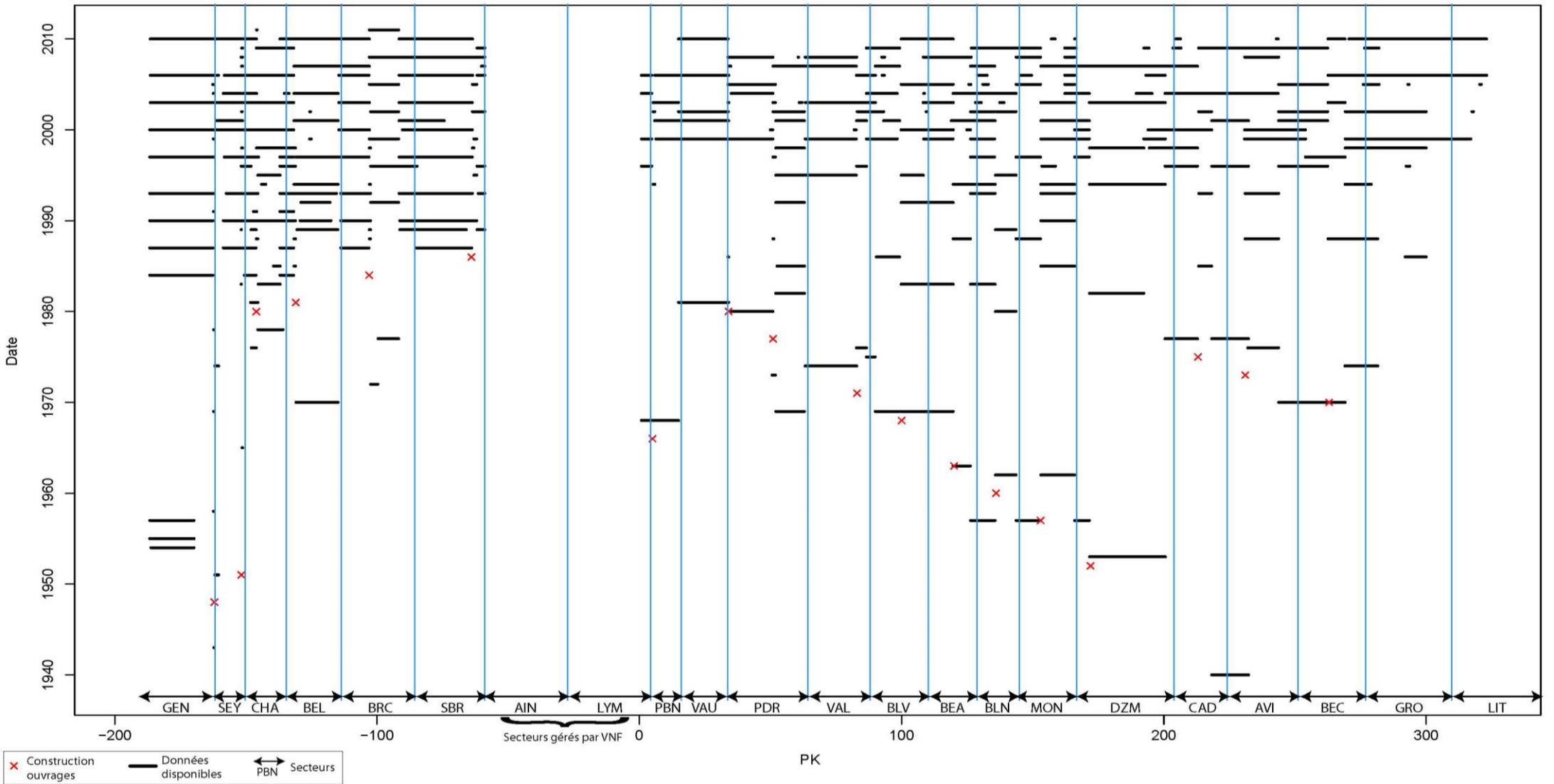


Tableau 3 : Bilan des données bathymétriques disponibles à la CNR depuis les derniers aménagements (un profil en travers tous les 500 m)

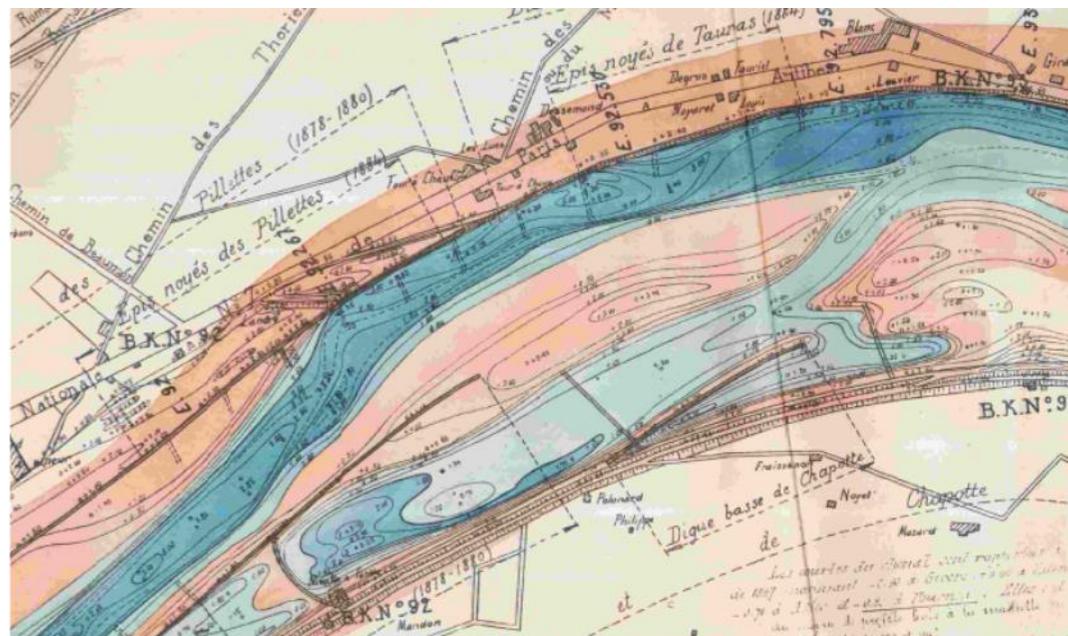
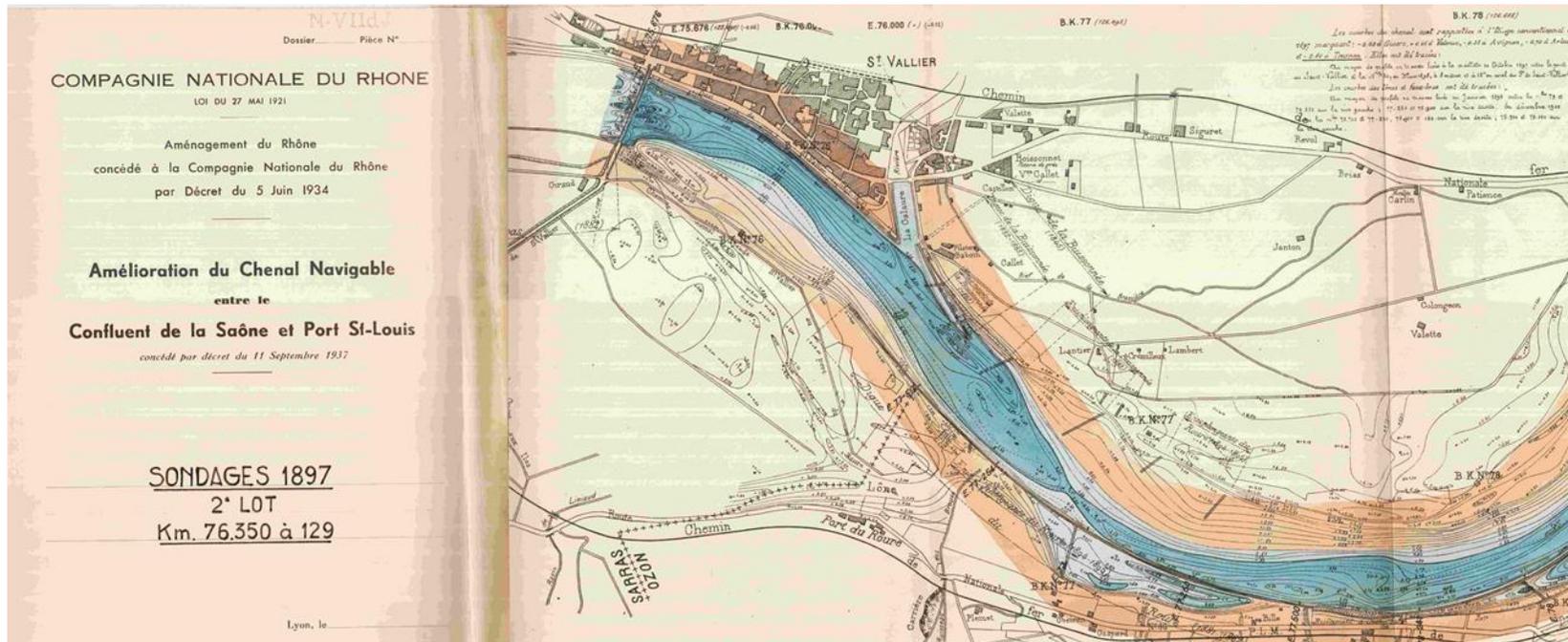


Figure 12 : Exemples de cartes bathymétriques du chenal, entre les BK 76 et 93, et datant de 1897

Nous abordons successivement :

- l'étude de l'évolution altimétrique du lit entre les dates d'observation
- l'étude de l'évolution des formes fluviales.

2) Etude de l'évolution altimétrique du lit entre les dates d'observation

a. Extraction du profil en long à partir des profils en travers et des cartes bathymétriques anciennes

Nous étudions un continuum : celui du Rhône avec d'une part les vieux Rhône (RCC) et d'autre part le Rhône total. Nous avons donc exclu les canaux qui sont des voies artificielles pour lesquelles il est difficile d'en interpréter les évolutions morphologiques sans avoir préalablement clarifié les évolutions du Rhône proprement dit.

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 thalweg (Figure 13).

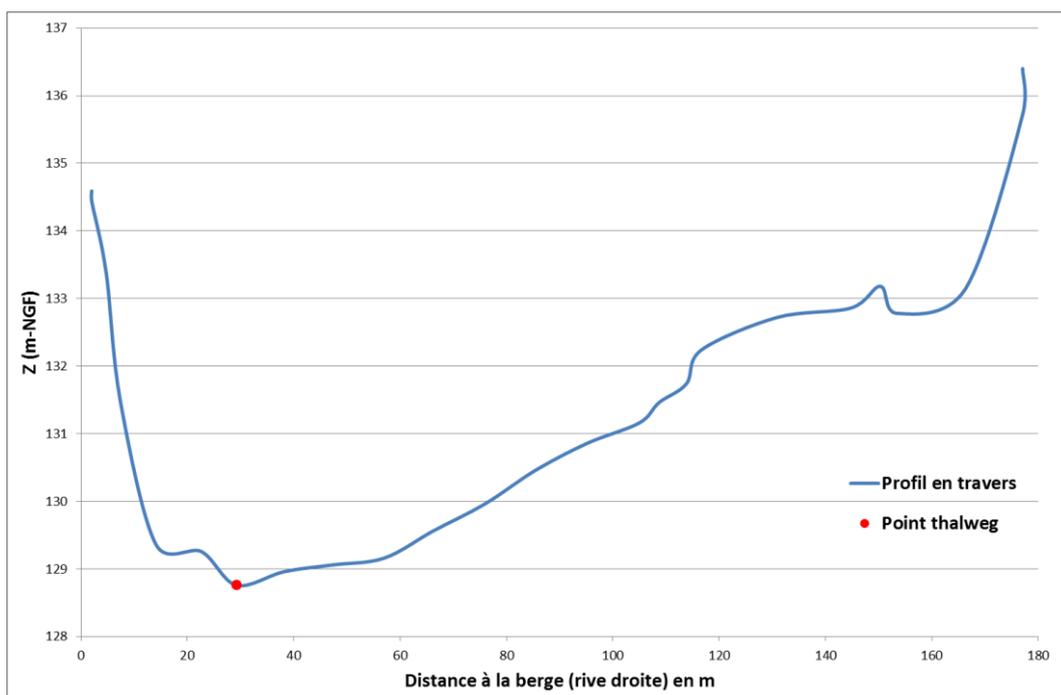


Figure 13 : Un exemple de profil en travers du chenal du Rhône à partir duquel le thalweg a été extrait

Ce 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.

Cette correction a été effectuée sur l'ensemble des données livrées par la CNR.

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

Le Tableau 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 correspondant au thalweg (points les plus bas des profils en travers). Disponibles entre chaque période d'aménagement, ils permettent de quantifier les impacts successifs de la construction des casiers Girardon puis des barrages.

b. Interprétation des changements

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. En effet, différents types de prélèvements dans le chenal ont été réalisés, soit pour des questions d'entretien ou d'augmentation de la chute à l'usine, tels que les dragages ou les extractions opérés par la CNR, soit dans un but d'extraire des matériaux de construction. Les extractions consistent en un prélèvement de sédiments (sables, graviers, galets) dans le fond du cours d'eau afin de les utiliser comme matériaux de construction. Les dragages 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 (dragages d'entretien). Il existe aussi des dragages et extractions afin de maintenir la production énergétique. Ils consistent à augmenter la hauteur de chute des usines hydro-électriques.

Ces données ont été prises en compte dans nos analyses bien qu'elles ne soient pas 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 (EGR-SOGREAH, 2000a6) 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. Nous ne sommes pas sûrs qu'elles répertorient l'intégralité 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 les prélèvements de type industriel dans le chenal des cours d'eau afin de ne plus déstabiliser le transit sédimentaire.

Il est aussi important de noter que les affluents ont été fortement aménagés (endiguements, barrages) et ont fait également l'objet d'importants prélèvements dans le cadre de concessions d'extraction, ce qui a pu réduire leurs apports sédimentaires.

3) Etude des formes du fond du chenal

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 :

- à partir de la caractérisation des formes par la moyenne mobile et d'une analyse statistique par tronçons de pente homogène
- à partir d'une analyse par ondelettes

a. 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 14).

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 apport sédimentaire (matériaux en suspension et charriage) et de leur débit (EGR-SOGREAH, 2000a5).

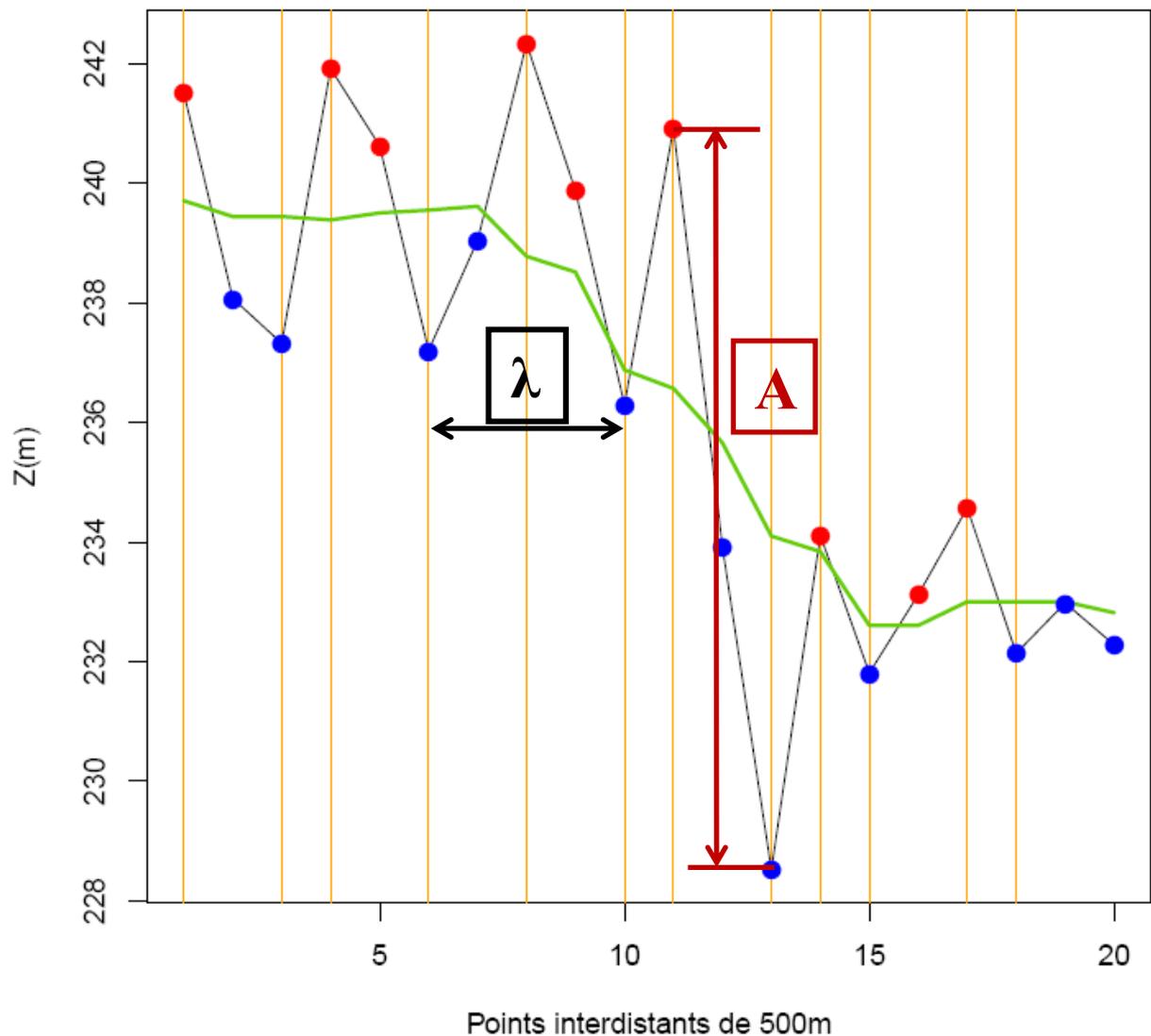


Figure 14 : Agrandissement sur une zone de l'extraction des paramètres d'amplitude (A) et de longueur d'onde (λ) des méso-formes, à partir de la moyenne mobile du profil (vert) et le profil en long du Rhône (noir).

Dans un deuxième temps, il s'agissait de détecter les ruptures de pente selon des méthodes d'analyses statistiques. Les tests de Pettitt et Hubert ont ainsi été programmés sur le logiciel R. 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 procède par le calcul statistique 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 nouveau test (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 en les interpolant à un pas régulier de 500 m exactement et une moyenne mobile d'un ordre de 10. Ces tests excluent la zone de Génissiat qui, de par sa très forte pente par rapport au reste du profil, introduit une forte singularité dans l'ensemble de l'analyse.

L'étude statistique par tronçons homogènes est réalisée afin de classer ces tronçons par proximité géographique de leurs paramètres sur l'ensemble du linéaire. En partant du principe que la largeur influait sur les paramètres de formes, nous avons décidé de prétraiter les données avant de réaliser une analyse statistique (Figure 15) :

Calcul des paramètres de la taille 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 de la taille des formes, notamment en hauteur lorsqu'il s'agit de l'amplitude et en largeur pour la longueur d'onde

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 .

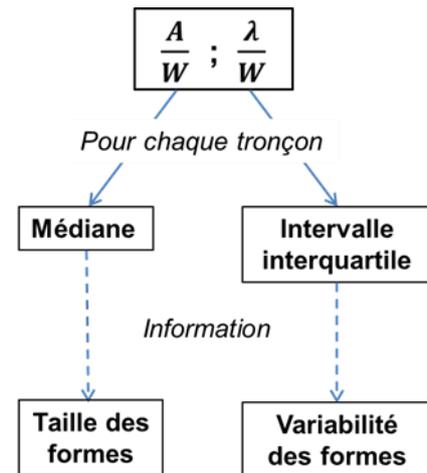


Figure 15 : Prétraitement des paramètres physiques pour l'analyse statistique.

On a également réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) et une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les quatre paramètres calculés précédemment pour regrouper les tronçons présentant les mêmes propriétés en termes de formes fluviales. Ces traitements ont aussi été réalisés à partir de données anciennes (des derniers aménagements à nos jours) sur quelques secteurs représentatifs.

b. La méthode des ondelettes

La méthode des ondelettes consiste en une décomposition du signal de la pente du profil en long, de la forme la plus globale au bruit. 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 mettre en œuvre une base différente, pas forcément sinusoïdale. Cette analyse distance-fréquence se fait à partir d'une fenêtre glissante prédéfinie (Annexe 1). 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 2). L'addition de ceux-ci permet d'approximer le signal de pente d'origine, modulant l'accumulation des erreurs lors de la décomposition (Annexe 3). A partir de cette méthode, l'idée est de retrouver les différentes structures qui ressortent de la décomposition : des grandes structures au niveau de décomposition la plus haute, aux petites structures au niveau le plus bas. Cette étude structurale fait encore état de tests, les premiers résultats n'ont pas permis d'extraire les faciès de type seuil-mouille au niveau de décomposition le plus bas. En effet, l'Annexe 4 nous montre bien que le niveau de décomposition le plus bas, qui devrait correspondre au signal des méso-formes, présente des longueurs de seuil et de mouille d'environ 20 km, ce qui n'est pas représentatif de la réalité.

Résultats

1) Evolution verticale du lit entre 1951 et 2011 de Genève à la mer

Une première étude de l'évolution nette du profil en long a été réalisée en chaque point et à chaque date où la mesure existait selon les données fournies par la base de données CNR depuis le milieu du 20^{ème} siècle à nos jours (Tableau 3). Le nombre d'années entre chaque point est en moyenne de 1,25 ans et peut varier entre 1 et 5 ans. Cette étude permet de mettre en relief les zones de stockages et de déstockages sédimentaires d'une année sur l'autre depuis 1951 (Figure 16 pour l'amont de Lyon et Figure 23 pour le Sud de Lyon).

a. Etude de l'évolution verticale entre le lac Léman et Lyon

Nous ne disposons que de très peu de données sur la partie amont du Rhône. Il n'existe pas de cartes bathymétriques anciennes comme pour la partie aval de Lyon étant donné que les casiers Girardon n'ont été construits que dans le Sud (l'amont de Lyon n'a pas été rendu navigable). De ce fait, nous n'avons pas d'état de référence du chenal avant la construction des barrages. De plus, les données numériques de la base de données de la CNR sont moins importantes dans le temps et dans l'espace. Il ne nous a donc pas été possible d'encadrer des événements de crues potentiellement morphogènes pour évaluer la réactivité actuelle du chenal.

La tendance globale à l'amont de Lyon (Figure 16) semble montrer des zones majoritairement en exhaussement (amont des barrages) et quelques zones en incision (aval des barrages) d'une année à l'autre. Le profil en long n'a pas drastiquement changé depuis l'implantation des barrages sur les quelques sections pour lesquelles les données sont disponibles (Figure 17 et Figure 18) mais il n'est pas possible de mesurer la conséquence de leur construction du fait de l'absence d'un état de référence. 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 (Figure 17). Par ailleurs, le profil n'a que très peu varié entre les secteurs de Brégnier-Cordon et Sault-Brénaz.

Les profils de la BD CNR entre 1951 et 2011 ont été projetés par secteur afin de suivre les changements induits par les barrages depuis leur mise en place. 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 19). L'aval immédiat du barrage de Génissiat se voit successivement incisé localement suite à sa construction, entre 1951 et 1974, puis exhaussement en 2003. Deux incisions marquées sont situées 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.

La fosse observée au PK-157,5 (Figure 19 et Figure 20) pourrait résulter d'un déficit sédimentaire qui serait potentiellement induit par le barrage de Génissiat (ici difficilement vérifiable puisque les données les plus anciennes datent de 1987). La retenue de Chautagne (Figure 20), à l'aval du Fier, montre un très faible exhaussement depuis 1988 qui pourrait correspondre aux 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 lissées au cours du temps. C'est le tronçon du haut-Rhône qui est le plus dynamique au cours de la période confirmant l'existence d'un transport solide encore actif et d'ajustements morphologiques en cours. 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. Les sédiments prélevés sont ici des fines.

L'aval du barrage de Belley montre de nombreuses variations topographiques de son lit (Figure 21). Le vieux Rhône de Belley est découpé en trois zones (PK [-130,5 : -127] ; [-127 : -117] ; [-117 : -114,5]) ayant respectivement subi une phase d'incision, une phase d'exhaussement et une phase d'incision entre 1970 et 1989. Depuis les années 90, une alternance entre incision et exhaussement du lit a pris le relais sur l'ensemble du vieux Rhône jusqu'à nos jours. Les fosses creusées lors des incisions entre 1970 et 1989 ne se sont pas comblées par la suite. Le Rhône total de Brégnier-Cordon s'est exhaussé depuis 1987 notamment à l'amont du barrage et de la retenue.

Dans le vieux Rhône de Brégnier (Figure 22), les formes du fond du lit ont été globalement lissées jusqu'à l'amont de la retenue, des exhaussements et une dynamique des formes fluviales sont observés à l'aval du Guiers confirmant que cet affluent amène une charge sédimentaire. Le profil n'a presque pas été modifié dans le reste de la retenue de Sault-Brénaz.

Que la granulométrie soit fine ou grossière, le haut Rhône a connu jusqu'en 2011 des modifications de son profil suite aux implantations des barrages. Le comblement ou non des fosses, le stockage à l'amont des barrages et l'incision à leur aval, les modifications des formes fluviales montrent que le transport sédimentaire est encore actif dans cette partie du Rhône et que les barrages ont modifié la dynamique sédimentaire.

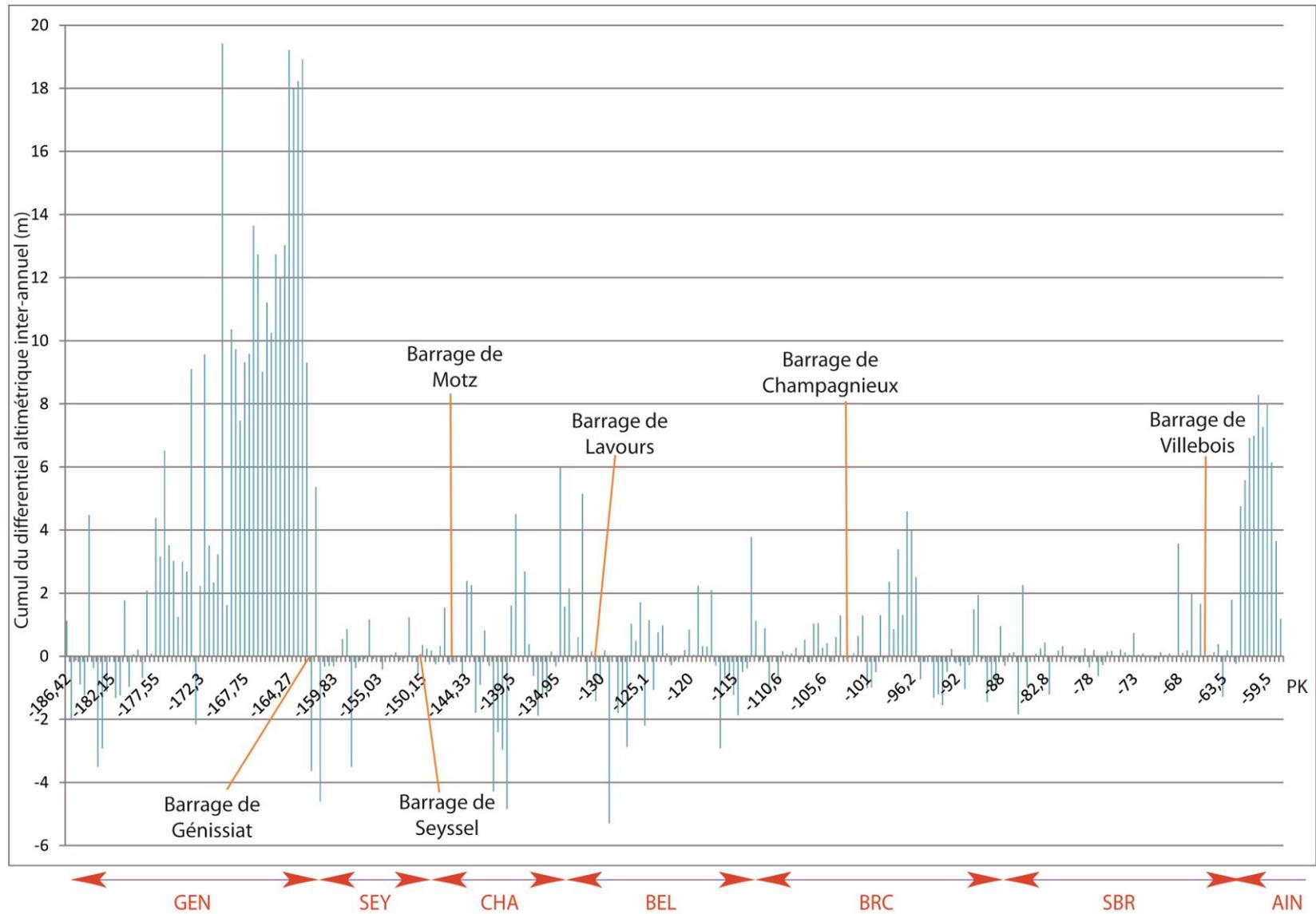


Figure 16 : Evolution nette des altitudes Z en chaque point du profil en long (représenté par les PK) au cours du temps, depuis les implantations des barrages (à partir de 1951) à nos jours (2011) (=somme des variations altimétriques entre toutes les dates disponibles). Zone en amont de Lyon, représentation des secteurs de Génissiat (GEN), Seyssel (SEY), Chautagne (CHA), Belley (BEL), Brégnier-Cordon (BRC), Sault-Brénaz (SBR) et l'Ain (AIN).

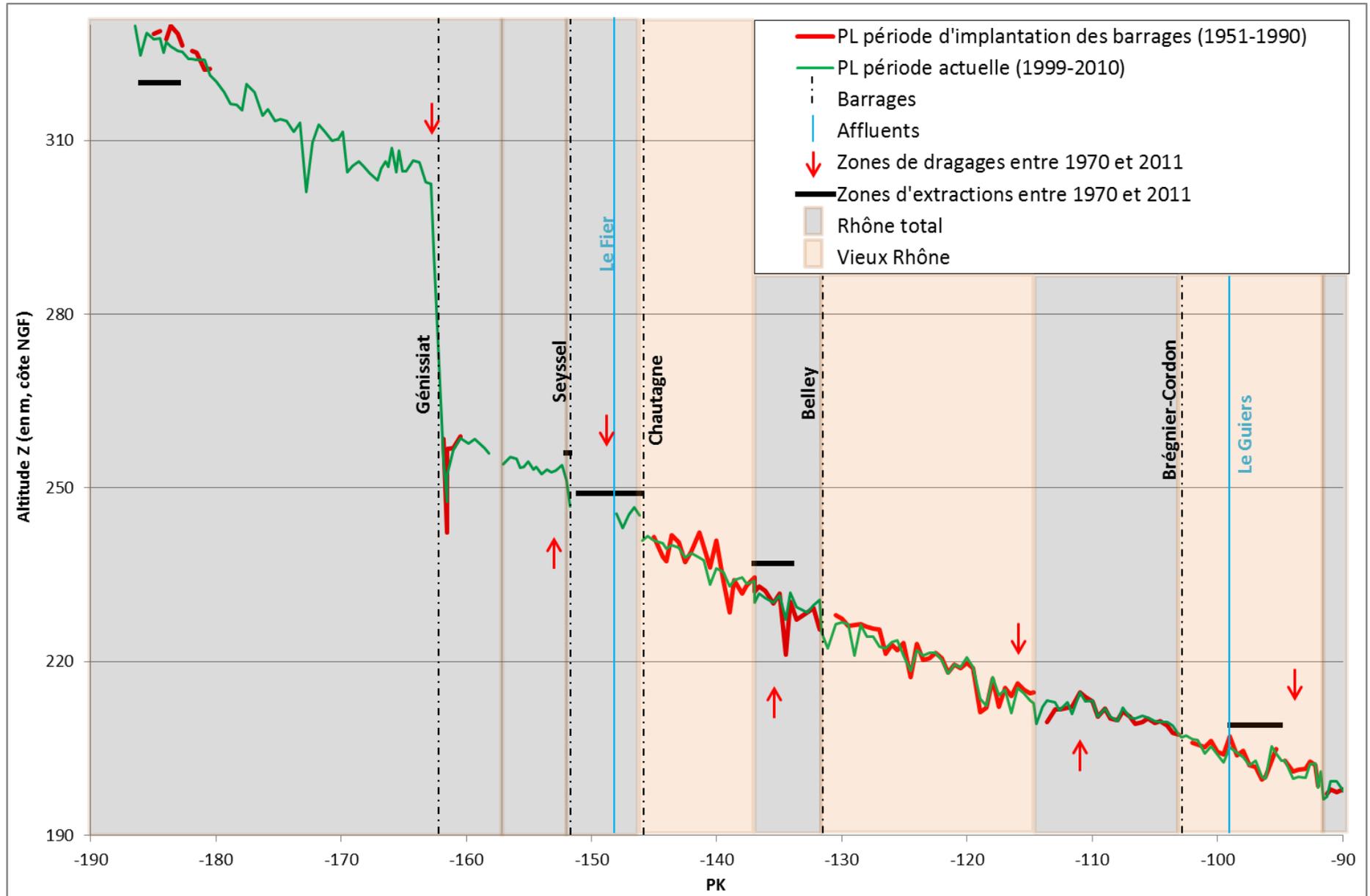


Figure 17 : Profils en long entre le PK-190 et -90 de la période de la mise en service des aménagements CNR (rouge) et de la période récente (vert)

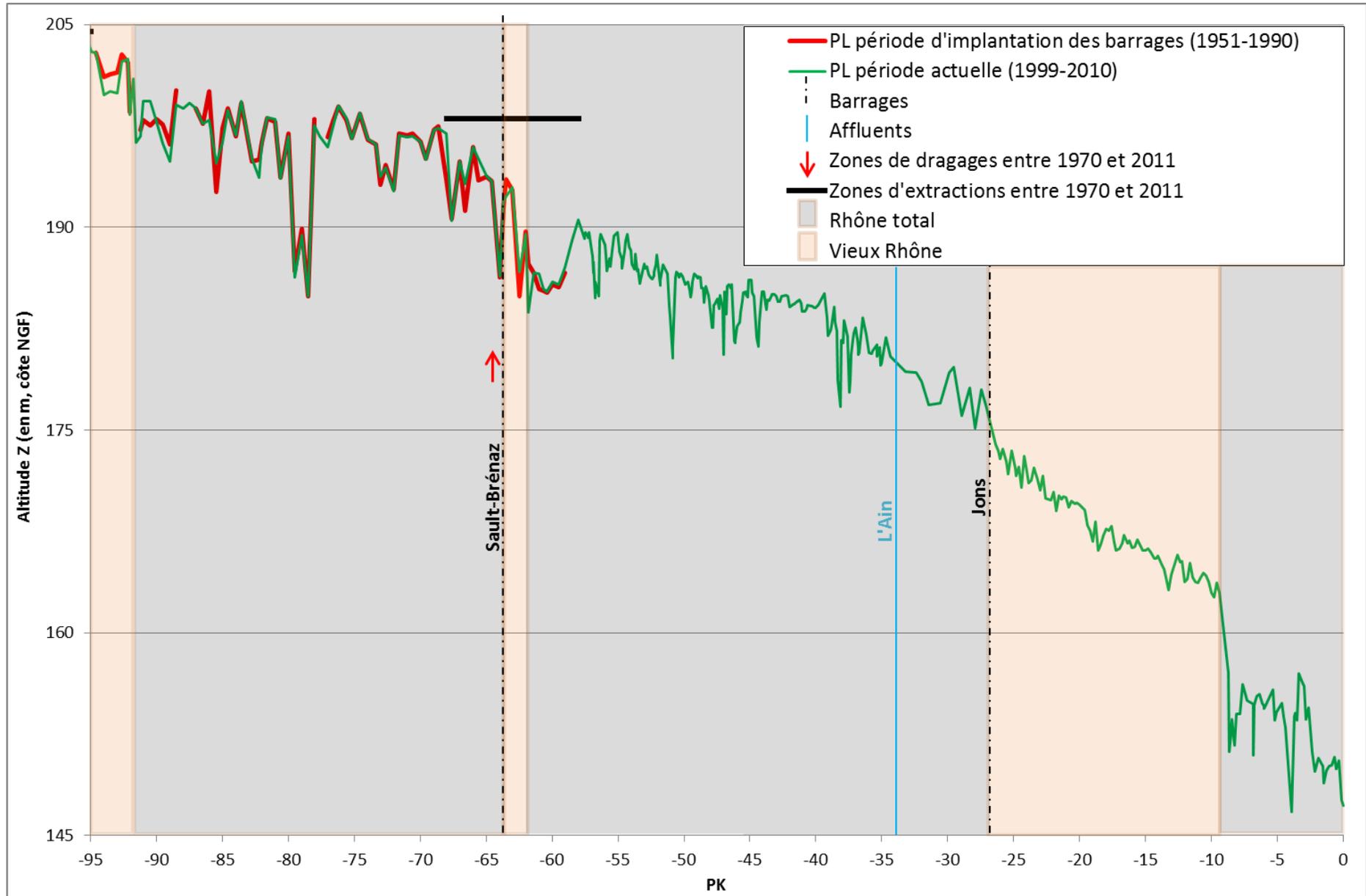


Figure 18 : Profils en long entre le PK-95 et 0 de la période de la mise en service des aménagements CNR (rouge) et de la période récente (vert)

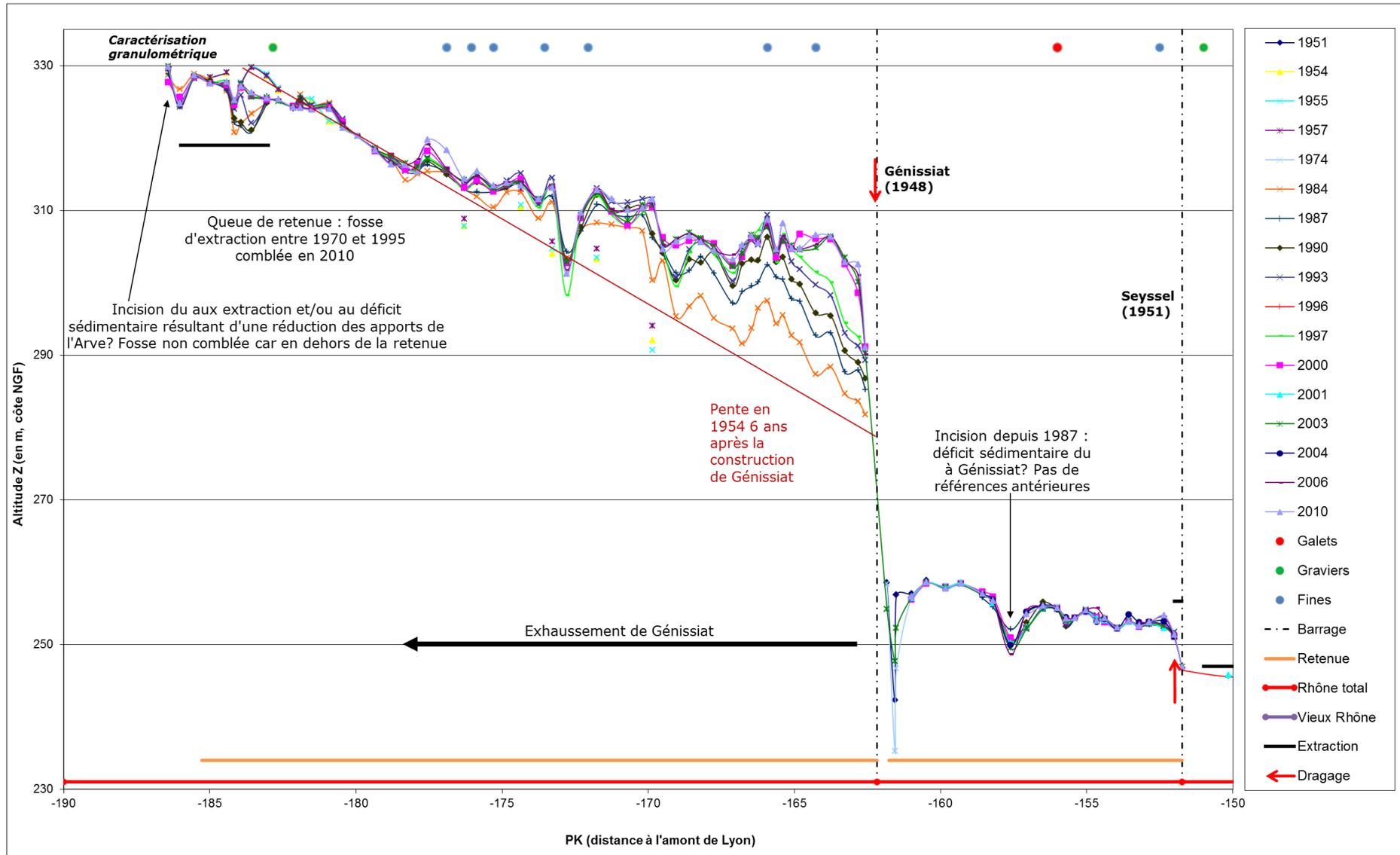


Figure 19 : Profils en long depuis la construction des barrages dans les secteurs de Génissiat et Seyssel (extraits BD BATHY CNR)

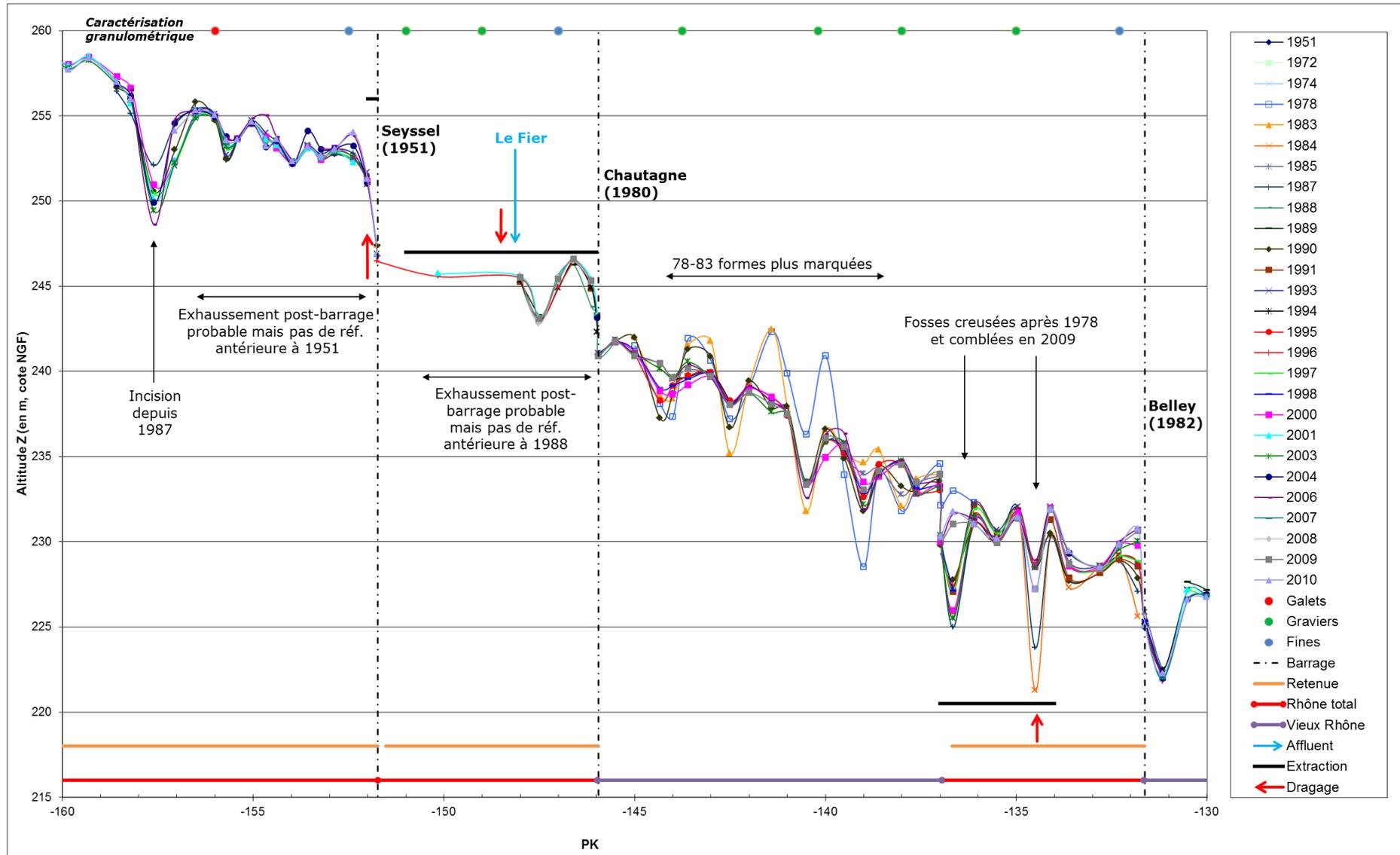


Figure 20 : Profils en long depuis la construction des barrages dans les secteurs de Seyssel, Chautagne et Belley (extraits BD BATHY CNR)

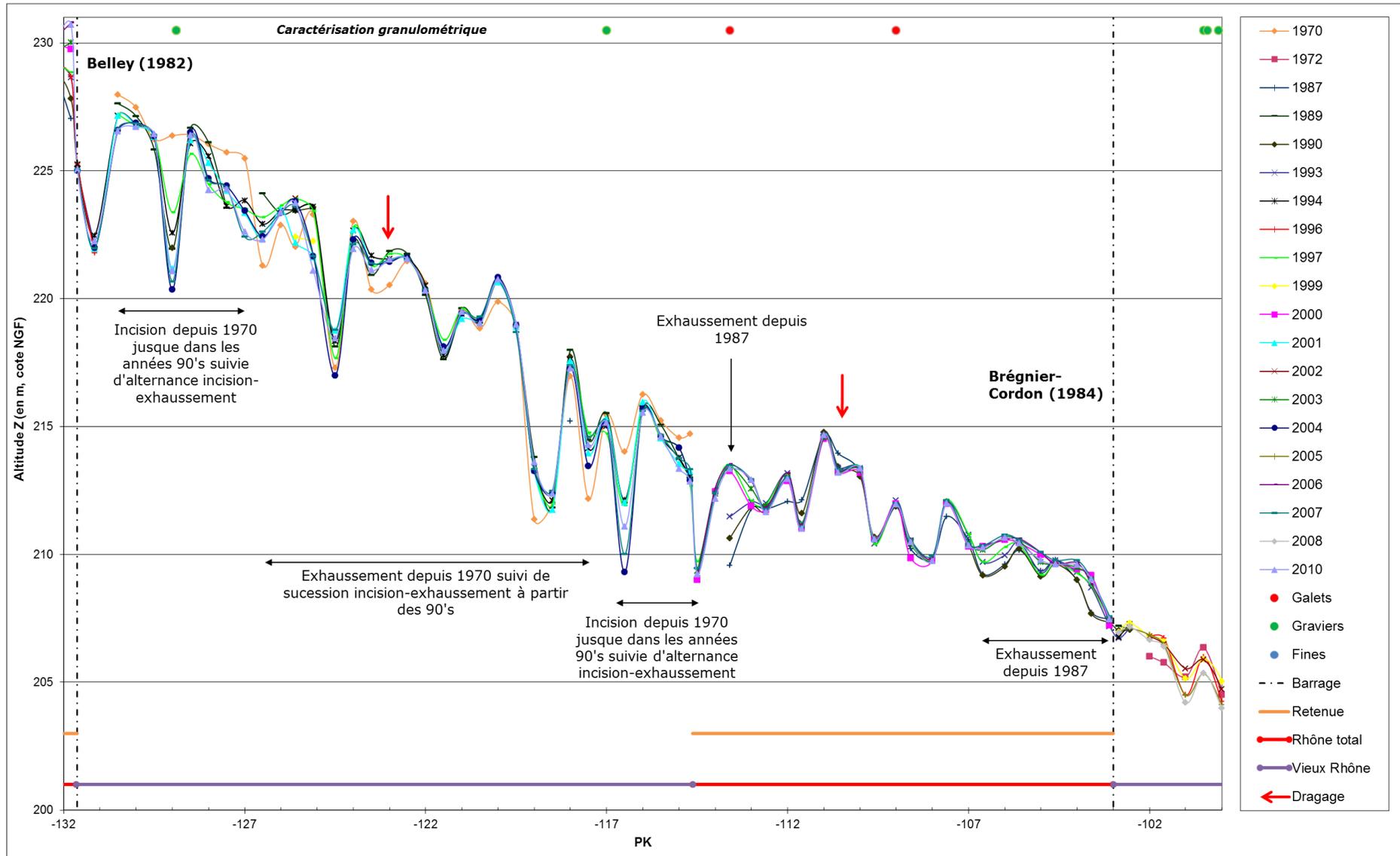


Figure 21 : Profils en long depuis la construction des barrages dans les secteurs de Belley et Brégnier-Cordon (extraits BD BATHY CNR)

b. Etude de l'évolution verticale du lit entre Lyon et la mer

En ce qui concerne la partie aval de Lyon (Figure 23), l'incision est globalement majoritaire (principalement à l'aval des barrages), avec néanmoins des zones d'exhaussement (à l'amont des barrages). Les données historiques manquantes des secteurs de l'Ain et de Lyon-Miribel (PK -58 à 1) font partie de la concession VNF qui indique ne pas posséder de telles données. A l'aval de Beaucaire (PK 255), nous disposons de très peu de données historiques, ne permettant pas de réaliser de calcul sur les changements altimétriques nets.

Le rôle des barrages dans les variations altimétriques du profil en long du Rhône n'est pas identique sur l'ensemble du linéaire. La tendance générale depuis 1951 montrant un exhaussement du lit en amont des barrages et une incision à l'aval n'est vérifiée que pour le secteur de Génissiat, les secteurs du Rhône médian et aval (sauf le secteur d'Avignon) avec des impacts parfois très localisés. L'hypothèse de départ que le profil en long établi un rééquilibrage entre chaque barrage paraît cohérente sur ces secteurs. Cette hypothèse est confirmée par l'étude menée par Troussier (2012), en stage de Master 1 pour l'OSR. Elle a étudié l'évolution du profil en long entre la confluence de la Drôme et celle de l'Ardèche depuis 1957, et a observé cette tendance d'accumulation à l'amont des barrages et d'incision à leur aval (Figure 24). A noter que cette étude ne prend pas en compte les nombreux dragages et extractions ayant eu lieu pour l'entretien du fleuve et l'exploitation des graviers comme matériaux de construction.

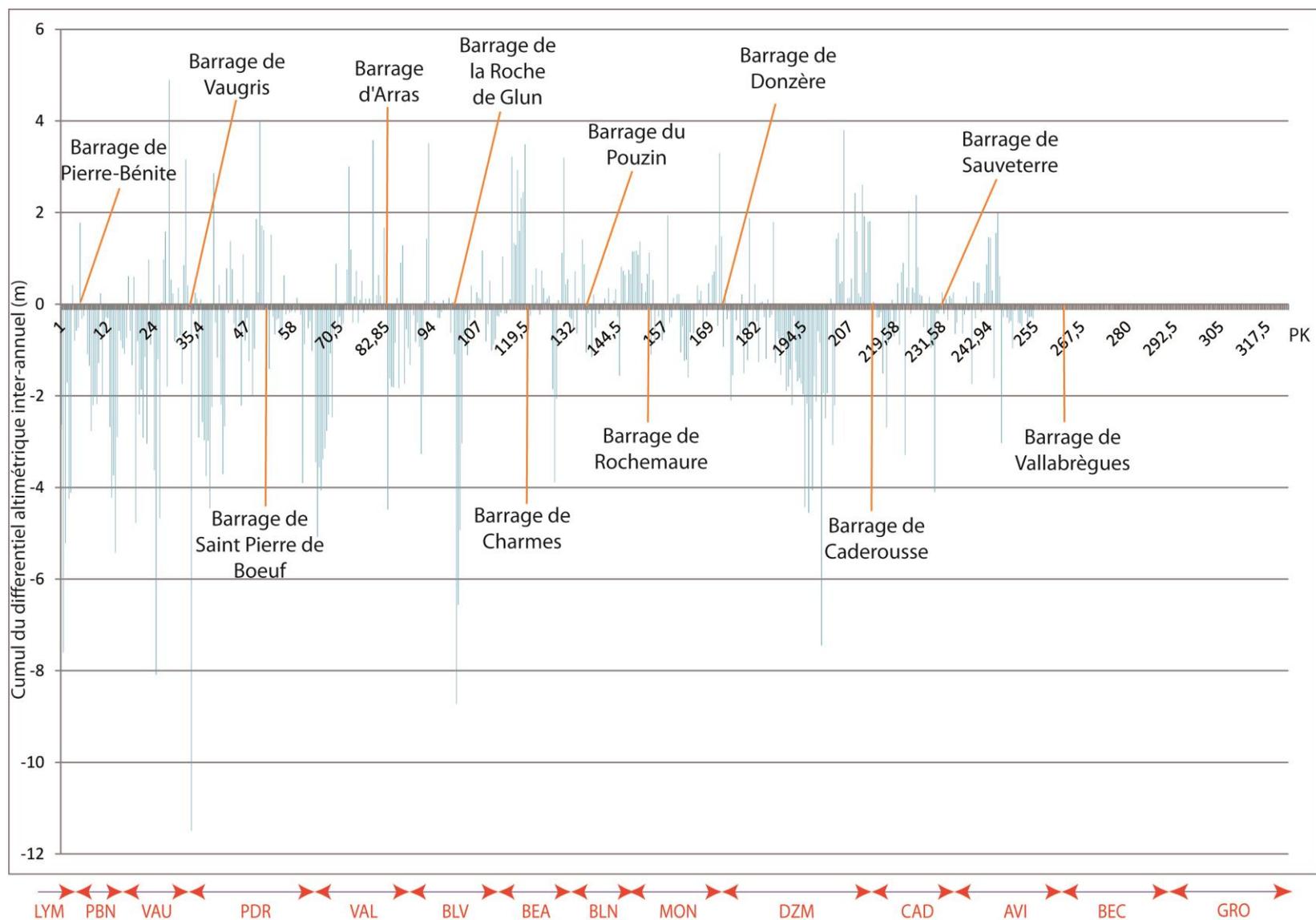


Figure 23 : Evolution nette des altitudes Z en chaque point du profil en long (représenté par les PK) au cours du temps, depuis les implantations des barrages (à partir de 1951) à nos jours (2011) (=somme des variations altimétriques entre toutes les dates disponibles). Zone en aval de Lyon, représentation 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)

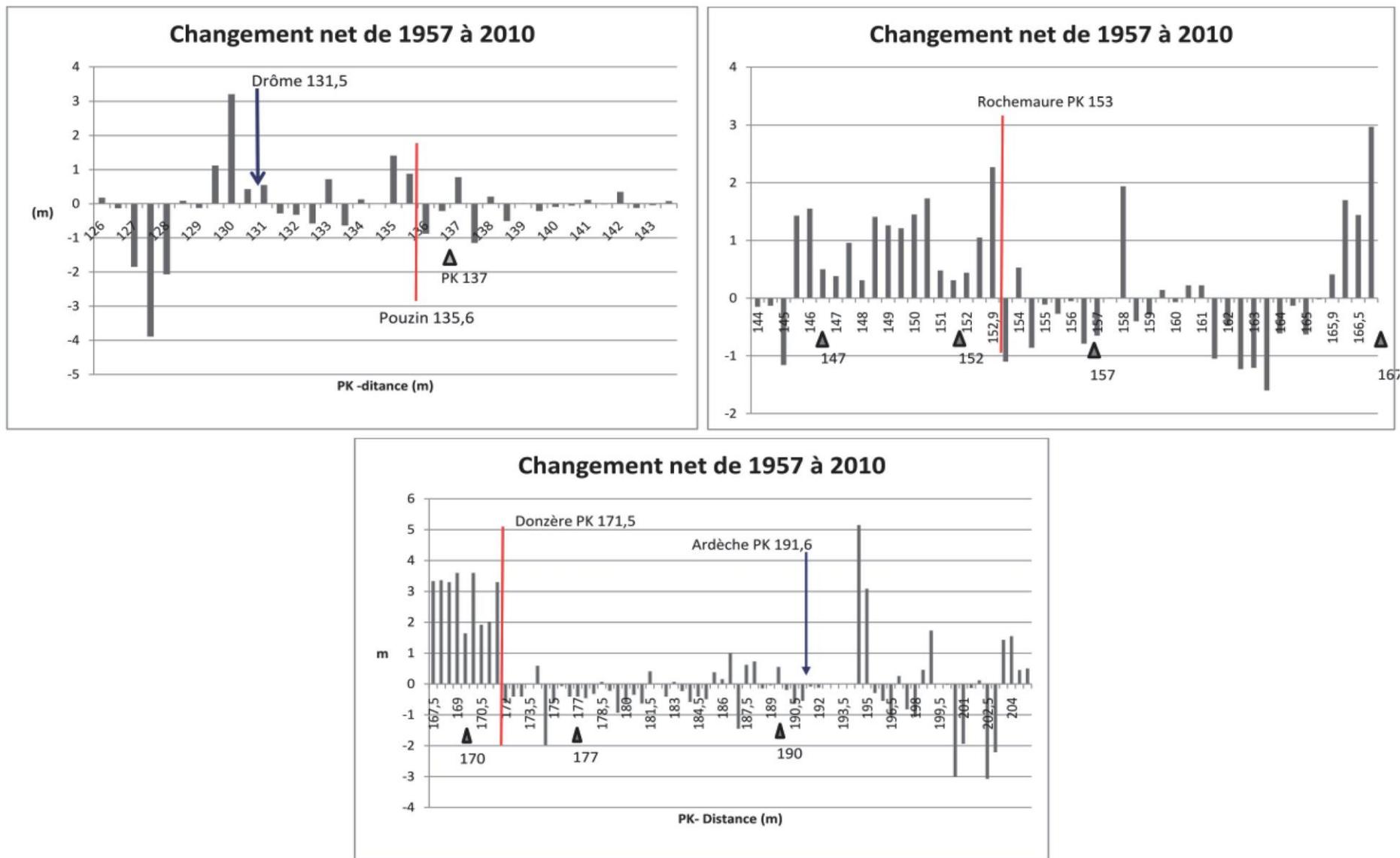


Figure 24 : Evolution nette des profils en long de 1957 à 2010 (aval de Lyon entre les PK 126 et 204), localisation des affluents (Drôme, Ardèche), des barrages (Pouzin, Rocheмаure, Donzère) et des affleurements rocheux (triangles). D'après Troussier (2012).

2) Evolution altimétrique du lit entre 1897/1907-08 et 2010 de Lyon à la mer

a. Elaboration et comparaison de 5 profils en long synthétisant 5 grandes phases

Afin de mieux évaluer l'effet potentiel des aménagements sur l'altitude du fond du lit du Rhône, nous avons reconstitué cinq profils en long synthétiques (correspondant aux thalwegs). Plusieurs levés répertoriés dans le Tableau 5 ont été rassemblés à l'aide des cartes bathymétriques historiques de 1897-1908 et des données numériques de la CNR.

La comparaison deux à deux des profils permet d'étudier différentes périodes : la période de construction des casiers Girardon (soit ici 13 ans environ après le début de leurs implantations et 57 ans après le début des endiguements qui débutèrent en 1840), celle résultant des aménagements CNR, la période dite actuelle (Figure 25), et les périodes antérieure et postérieure aux événements de crues de 2001, 2002 et 2003 (Annexe 6). En effet, trois crues potentiellement morphogènes se sont succédé durant cette phase (Tableau 6), avec des périodes de retour de 10 à 100 ans pour les crues les plus fortes.

La crue de mars 2001, provoquée par la Saône et l'Ain qui entrent en crue 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 eut 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 (événements cévenols) qui ont entraîné la crue des affluents du Rhône.

Dates du profil en long	Période correspondante	Sources	Période 0	Période 1	Période 2	Période 3
1897 (Lyon-Montélimar)-1907/08 (Donzère-mer)	Implantation des casiers Girardon (antérieur aux barrages)	Cartes bathymétriques historiques	Impact global des	Impact des casiers Girardon		
1953/1981 (Lyon-Arles)-1986/99 (aval)	Mise en service des barrages (± 5 ans)	Base de donnée numérique CNR			Impact des barrages	
2007-2010 (Lyon-mer)	Profil récent	Base de donnée numérique CNR	aménagements			
1996-2000 (Lyon-mer)	Période antérieure aux crues de 2001-2003	Base de donnée numérique CNR				Impact des crues :
2004-2007 (Lyon-mer)	Période postérieure aux crues de 2001-2003	Base de donnée numérique CNR				sensibilité du chenal

Tableau 5 : Recensement des cinq profils en long regroupés par date-clé afin d'étudier les évolutions verticales en effectuant un différentiel entre ces profils par grandes périodes : évolution globale du chenal entre 1897 et aujourd'hui [2007-2010]-[1897-1907], conséquence de l'implantation des casiers Girardon [1953-1999]-[1987-1907], des barrages [2007-2010]-[1953-1999], et mesure de la capacité de réponse du chenal d'aujourd'hui face à des crues décennales à centennales [2004-2007]-[1996-2000].

	Qmax instantané aux stations (m ³ /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 6 : 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 PK15,2, Valence au PK109,7, Viviers au PK166,5, Beaucaire au PK269,6)

Les trois premiers profils synthétiques du Tableau 5, correspondant aux différentes phases d'aménagements, sont représentés sur la Figure 25. La différence entre ces trois profils n'est pas évidente au premier abord. On constate que le lit ne s'enfoncé pas radicalement. L'incision n'a globalement pas changé la forme du profil en long, notamment dans la partie médiane du profil, entre les PK 140 et 190.

Cependant, une étude plus précise de l'évolution altimétrique du profil en long a été réalisée à partir de trois agrandissements, un pour la partie la plus amont [PK 0 à 100] en Figure 26, un autre pour la partie médiane [PK100 à 190] en Figure 27 et enfin pour la partie aval [PK 190 à 320] en Figure 28. Ils montrent des changements locaux importants avec :

- **Entre 1897-1907 et la phase de construction des barrages, on observe globalement une incision du linéaire (enfouissement du profil en long bleu par rapport au profil rouge de 1,33 m en moyenne) :**
 - Entre Lyon et Bourg-lès Valence (Figure 26), on a pu observer des incisions assez marquées, notamment depuis le secteur de Pierre-Bénite jusqu'au barrage de Vaugris [PK 0 à 30] (-2,6 m en moyenne), dans la retenue de Péage de Roussillon [PK 45 à 50] (-2 m en moyenne) et entre le vieux Rhône de Saint-Vallier et le secteur de Bourg-lès Valence [PK 85 à 105] (-1,7 m en moyenne). Dans la retenue de Péage de Roussillon, au niveau du PK 47, on observe une fosse d'environ 10 m qui semblait toutefois exister au moment de la construction des casiers au [PK 50], laissant penser à une migration de celle-ci vers l'amont.
 - Entre Beauchastel et Donzère-Mondragon (Figure 27), on remarque une certaine stabilité du profil comparativement au reste du linéaire. L'incision la plus importante (-2,3 m en moyenne) dans cette partie du Rhône est observée aux alentours de la confluence de l'Isère (vieux Rhône de Bourg-lès Valence). Une zone d'incision est aussi visible les quatre premiers kilomètres du Rhône total de Beauchastel [PK 108 à 112] (-1,7 m en moyenne). Entre le vieux Rhône de Beauchastel et la retenue de Baix-le Logis Neuf [PK 125 à 134] et entre la retenue de Montélimar et l'amont du Rhône total de Donzère-Mondragon [PK 150 à 168], l'incision a été moins importante mais continue le long de ces secteurs (respectivement -1,4 m et -1,1 m en moyenne).
 - Entre l'aval de Donzère et la mer (Figure 28), l'incision est localisée dans certains secteurs tels que le Rhône total de Caderousse au niveau de la confluence du Lez [PK200 à 210] (-2 m en moyenne), les sept premiers kilomètres du vieux Rhône d'Avignon en aval du barrage d'Avignon et autour de la confluence de l'Ouvèze [PK 230 à 236,5] (-1,95 m), et au niveau du Grand Rhône à partir de la restitution de Beaucaire jusqu'à l'aval [PK 270 à 317] (-2,6 m), exceptée la diffuence avec le Petit Rhône [PK 277 à 280] qui montre un exhaussement (+0,4 m). Le reste du profil ne semble pas avoir varié.

- **Entre la construction des barrages et aujourd'hui, on observe des incisions moins marquées que lors de la première phase mais plus localisées, et quelques retenues enregistrent un exhaussement (comparaison du profil rouge et vert avec un enfoncement moyen de 0,46 m) :**
 - Entre Lyon et Bourg-lès Valence (Figure 26), l'incision semble légèrement moins importante que la période précédente entre le secteur de Pierre-Bénite et le Rhône total de Vaugris [PK 0 à 25] (-2 m en moyenne), et la plupart des zones incisées correspondent approximativement 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. Le profil s'exhausse légèrement à l'amont direct du barrage de Vaugris (+1,47 m en moyenne). Les cinq premiers kilomètres amont du Rhône total de Saint-Vallier [PK 63,5 à 68,5] se retrouvent particulièrement incisés (-2,85 m en moyenne), le profil en long actuel formant une fosse correspondant à une extraction massive. Un léger exhaussement est observé à l'amont direct du barrage de Péage de Roussillon [PK 49,5 à 52] (+1,85 m). On constate également une incision depuis le vieux Rhône de Saint Vallier jusqu'à la retenue de Bourg-lès Valence [PK 84 à 91] (-0,93 m).
 - Entre Beauchastel et Donzère-Mondragon (Figure 27), tout comme la période précédente, on ne constate que quelques variations altimétriques localisées. L'incision au niveau de la confluence de l'Isère [PK 100 à 104] a été plus importante que celle de la période précédente (-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 ainsi des volumes significatifs de sédiments (EGR-SOGREAH, 2000a5) et pouvant être à l'origine aussi de cette incision. D'autres zones d'incisions, où des extractions ont été notées, sont constatés dans le Rhône total de Baix-le Logis Neuf à l'aval direct de la confluence de l'Eyrieux [PK 127 à 128] (-0,97 m), dans le vieux Rhône de Baix-le Logis Neuf [PK 136,5 à 139,5] (-0,27 m), à l'aval du vieux Rhône de Montélimar [PK 161,5 à 163,5], et dans le vieux Rhône de Donzère-Mondragon [PK 172,5 à 190] (-0,46 m). C'est dans cette partie du Rhône qu'on observe le plus de retenues en exhaussement, notamment les retenues de Beauchastel [PK 115 à 120] (+1,9 m), Baix-le Logis Neuf [PK 129,5 à 131] (+1,3 m) et Montélimar [PK 145,5 à 153] (+0,75 m).
 - Entre l'aval de Donzère et la mer (Figure 28), les incisions sont moins marquées là aussi. On retrouve des incisions plus locales et toujours proche des zones de dragages-extractions, notamment dans le vieux Rhône de Donzère et le Rhône total de Caderousse avec un maximum d'incision à environ 4 km en aval de la confluence de l'Ardèche et en amont de celle du Lez [PK 190 à 203] (-2 m), 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).

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. Ces actions peuvent biaiser l'observation en occultant les zones de stockage sédimentaire potentiel ou en favorisant une incision progressive ou régressive suite au prélèvement. Les exploitations de granulats ont laissé des fosses d'extraction qui peuvent être responsables d'une déstabilisation du transit sédimentaire en piégeant la charge de fond. 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.

Plus difficiles à préciser avec cette représentation, les profils stables semblent être plus nombreux lors de la deuxième période d'aménagement. Il est nécessaire de mettre en évidence les différentes tendances (incision, exhaussement, stabilisation du profil) en étudiant directement les différentiels altimétriques entre chaque profil.

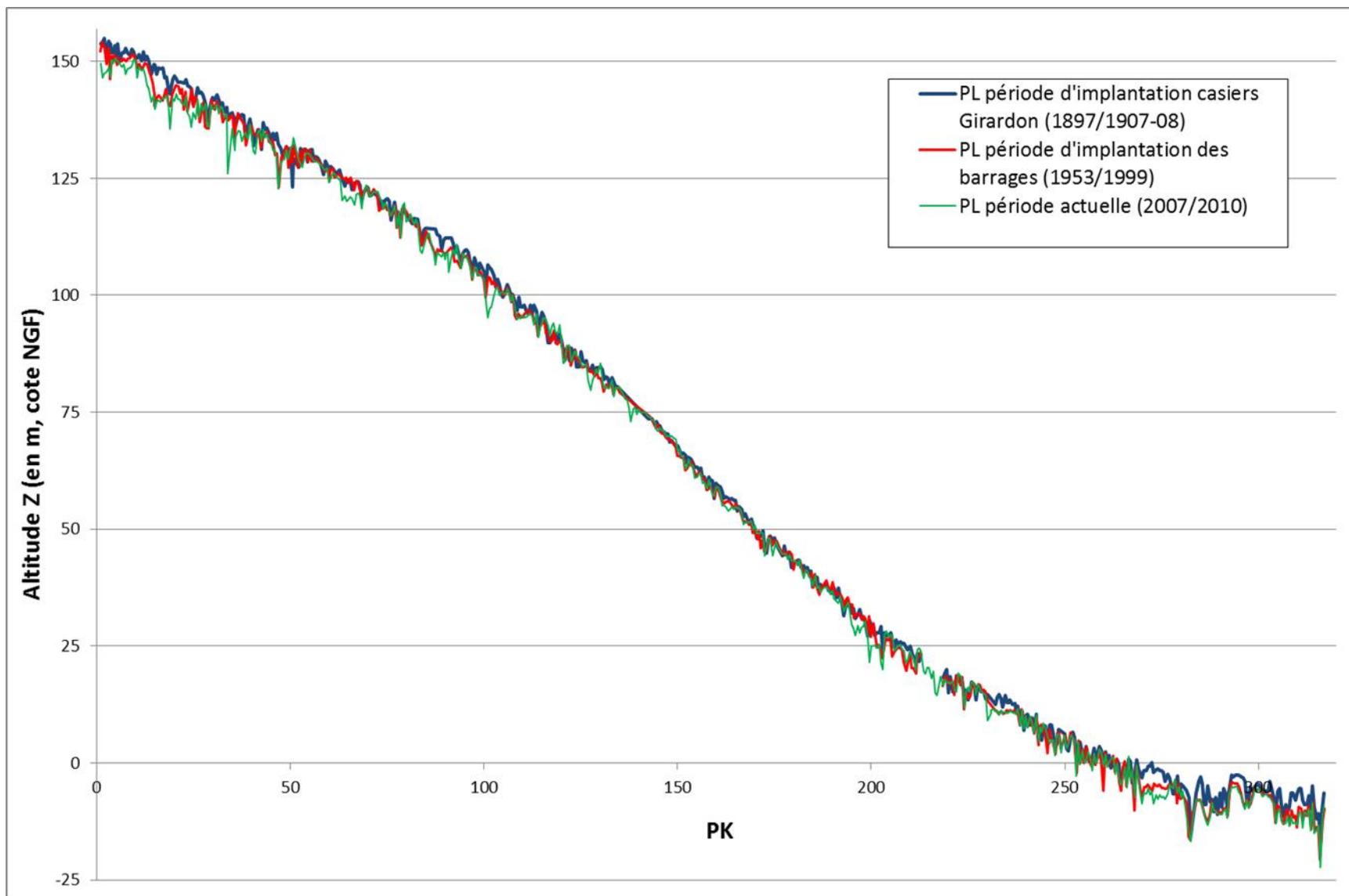


Figure 25 : Profils en long de la période de construction des casiers Girardon (bleu), de la mise en service des aménagements CNR (rouge) et de la période récente (vert)

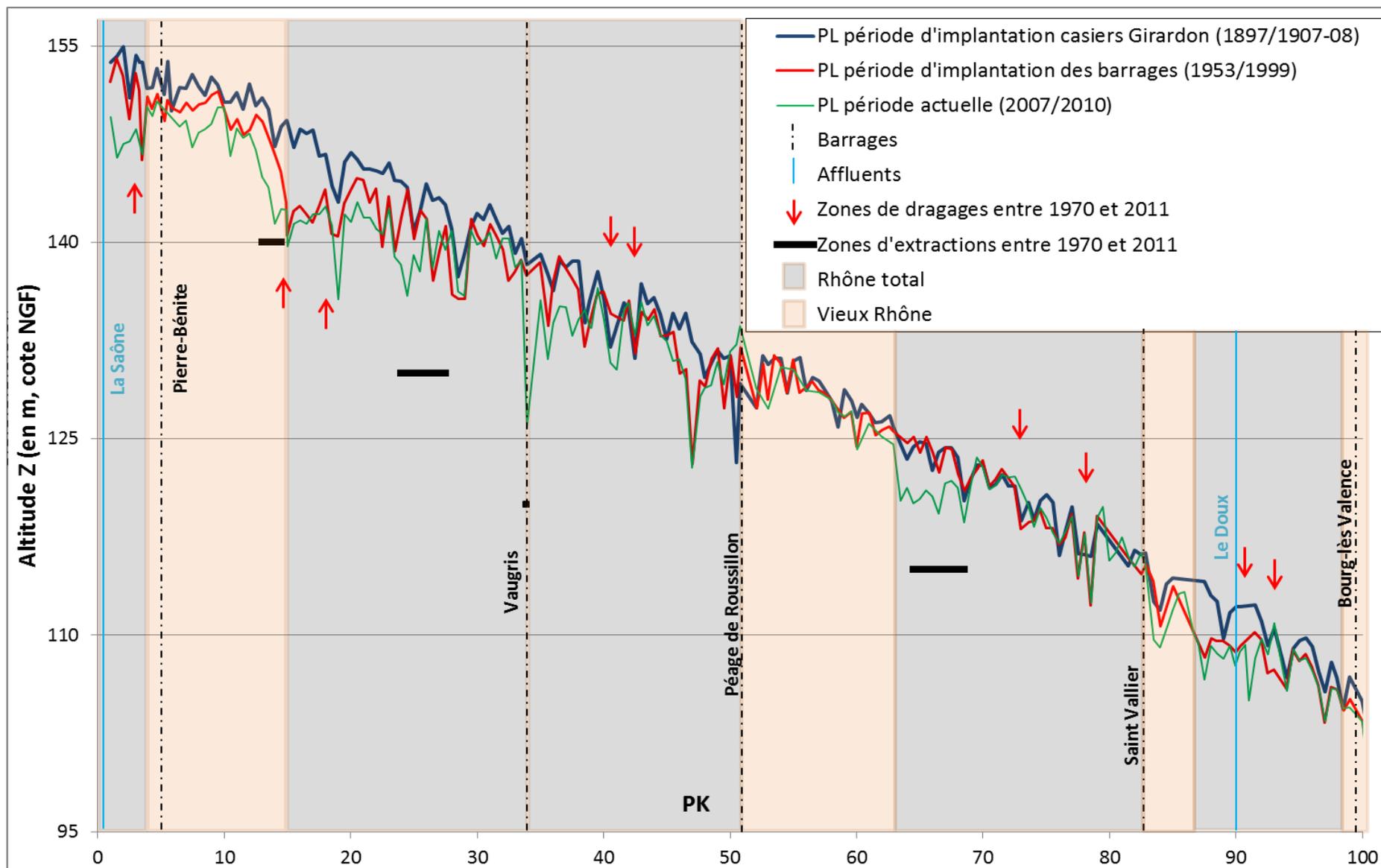


Figure 26 : Profils en long entre le PK0 et 100 de la période de construction des casiers Girardon (bleu), de la mise en service des aménagements CNR (rouge) et de la période récente (vert)

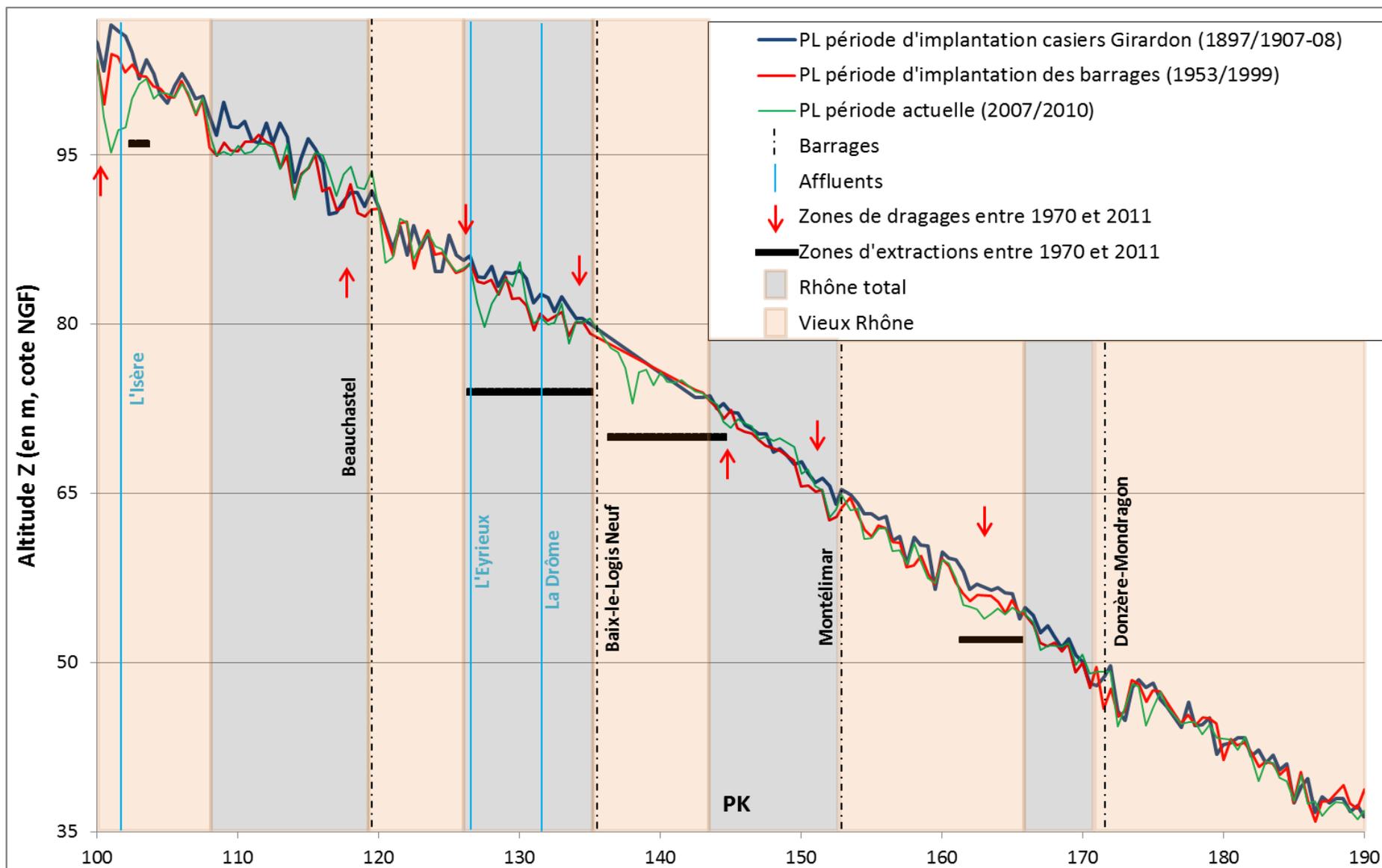


Figure 27 : Profils en long entre le PK100 et 190 de la période de construction des casiers Girardon (bleu), de la mise en service des aménagements CNR (rouge) et de la période récente (vert)

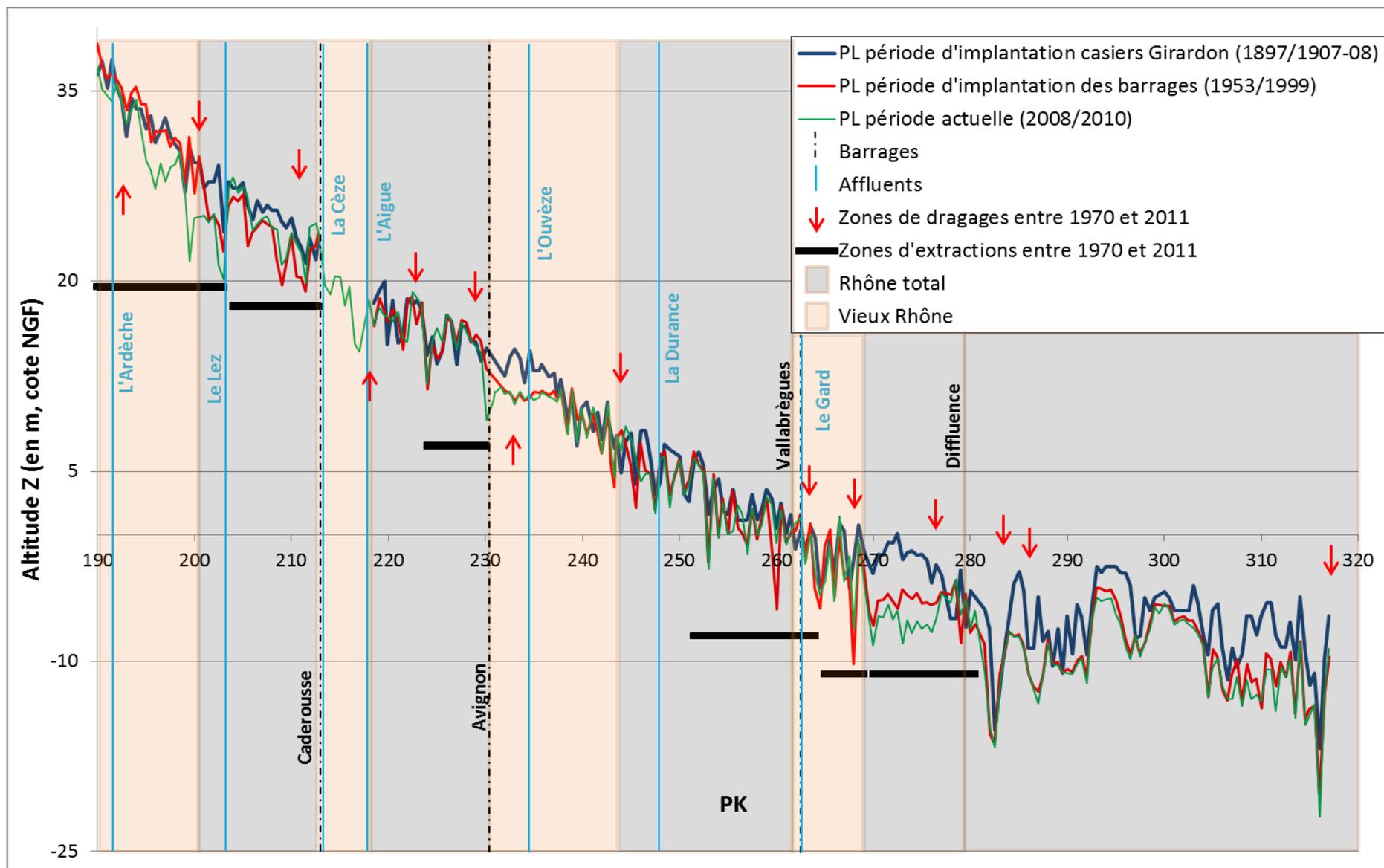


Figure 28 : Profils en long entre le PK190 et 320 de la période de construction des casiers Girardon (bleu), de la mise en service des aménagements CNR (rouge) et de la période récente (vert)

Les deux derniers profils du Tableau 5, correspondant aux périodes avant/après les grandes crues de 2001 à 2003, sont représentés dans l'Annexe 6. Cette comparaison permet d'évaluer la sensibilité et la réactivité du fleuve aujourd'hui à la suite de crues de grandes ampleurs. Sur les agrandissements des Figure 29 [PK 0 à 100], Figure 30 [PK 100 à 190] et Figure 31 [PK 190 à 320], on observe des modifications locales du profil en long :

- 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] (Figure 29)
- 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) (Figure 29)
- Péage de Roussillon : incision dans la retenue [PK 40 à 41] (-1,3 m), [PK 42,5] (-0,8 m) et [PK 45,5 à 47] (-0,56 m) et dans le vieux Rhône [PK 54] (-0,4 m), [PK 60 à 62,9] (-0,44 m) (Figure 29)
- 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) (Figure 29)
- 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) (Figure 29) et dans le vieux Rhône autour de la confluence de l'Isère [PK 101 à 102] (-0,6 m) (Figure 30)
- 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) (Figure 30)
- 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) (Figure 30)
- 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) (Figure 30 & Figure 31)
- 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) (Figure 31)
- Avignon : exhaussement dans le vieux Rhône à l'aval de la confluence de l'Ouvèze [PK 235 à 237] (+0,4 m) (Figure 31)
- Beaucaire (Vallabrègues) : incision dans la retenue [PK 260] (-1,3 m) suivi 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) (Figure 31)
- Grand Rhône : incision dans le Rhône total [PK 271 à 277,5] (-0,75 m) en aval de la difffluence [PK 280] (-1,1 m) et sur le littoral [PK 287] (-1 m) et [PK 307 à 316] (-0,86 m) (Figure 31)

Le profil semble globalement stable mais présente localement des incisions et des exhaussements dans certains Rhône totaux et vieux Rhône, et une incision plus significative sur la partie aval du Rhône. Ce phénomène montre que le lit n'est pas totalement figé et qu'une succession de crues morphogènes peut encore remobiliser la charge de fond.

Néanmoins, la lecture directe des variations à partir d'une simple superposition des profils reste compliquée et imprécise sur ces graphiques du fait de leurs évolutions très locales et de l'importance de la taille du linéaire étudié qui tend à les aplatir. Il est nécessaire d'extraire et d'analyser les variations altimétriques entre chaque profil en long afin de quantifier l'ensemble des changements suite aux différents évènements subis par le Rhône.

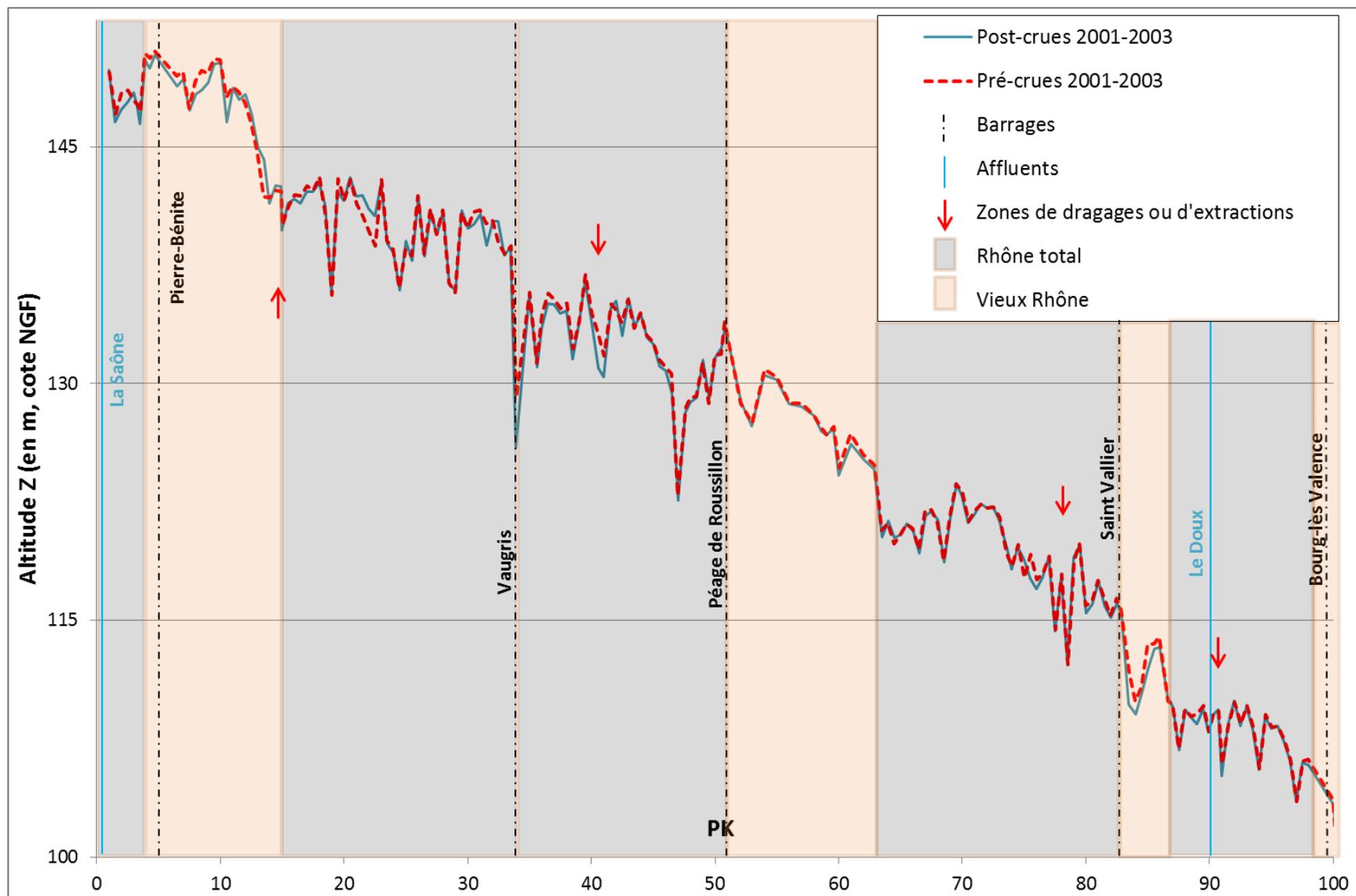


Figure 29 : Profils en long entre le PK 0 et 100 avant les crues de 2001 à 2003 (1996/2000 en pointillés rouge) et après les crues (2004/2007 en bleu)

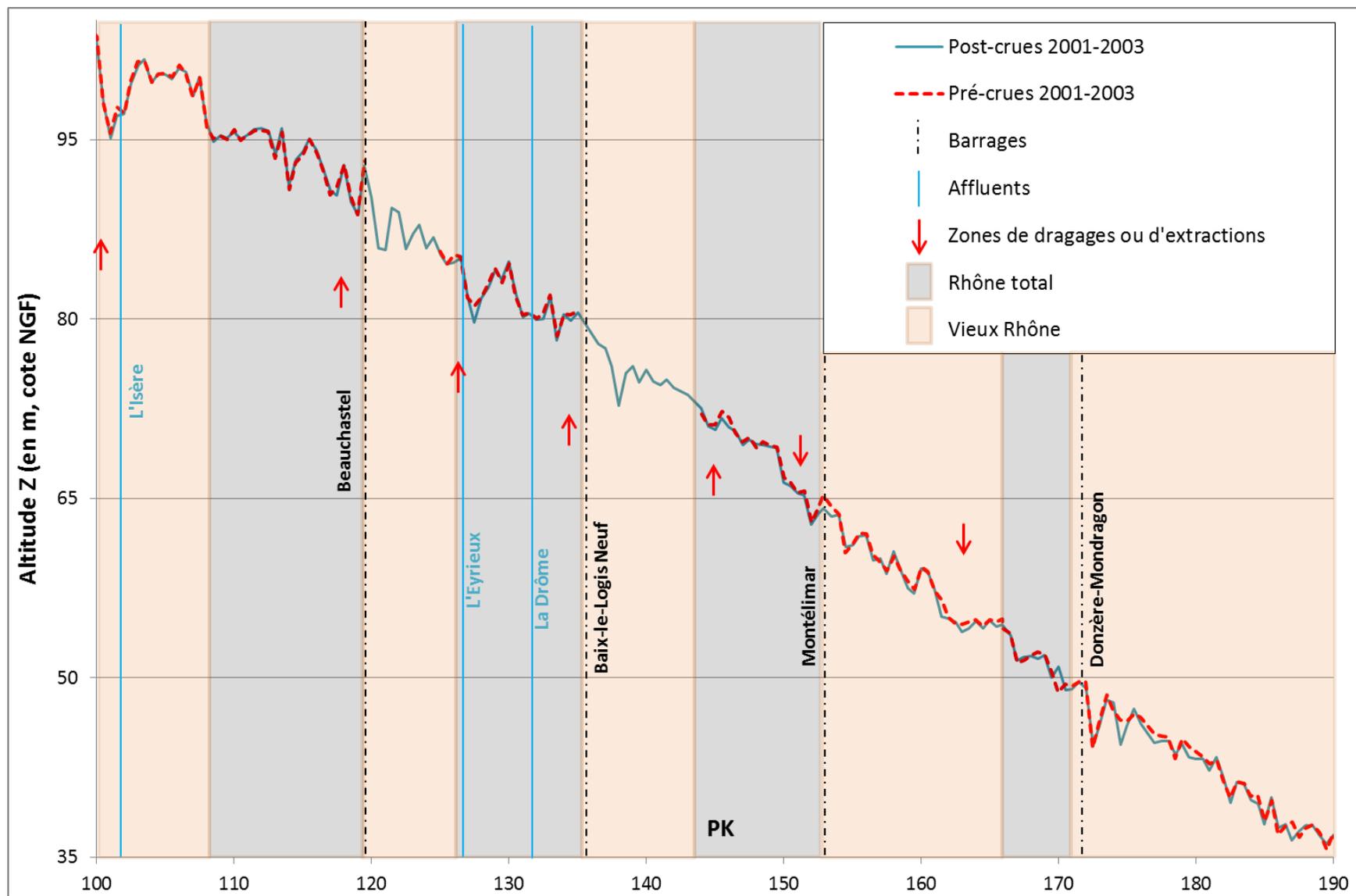


Figure 30 : Profils en long entre le PK 100 et 190 avant les crues de 2001 à 2003 (1996/2000 en pointillés rouge) et après les crues (2004/2007 en bleu)

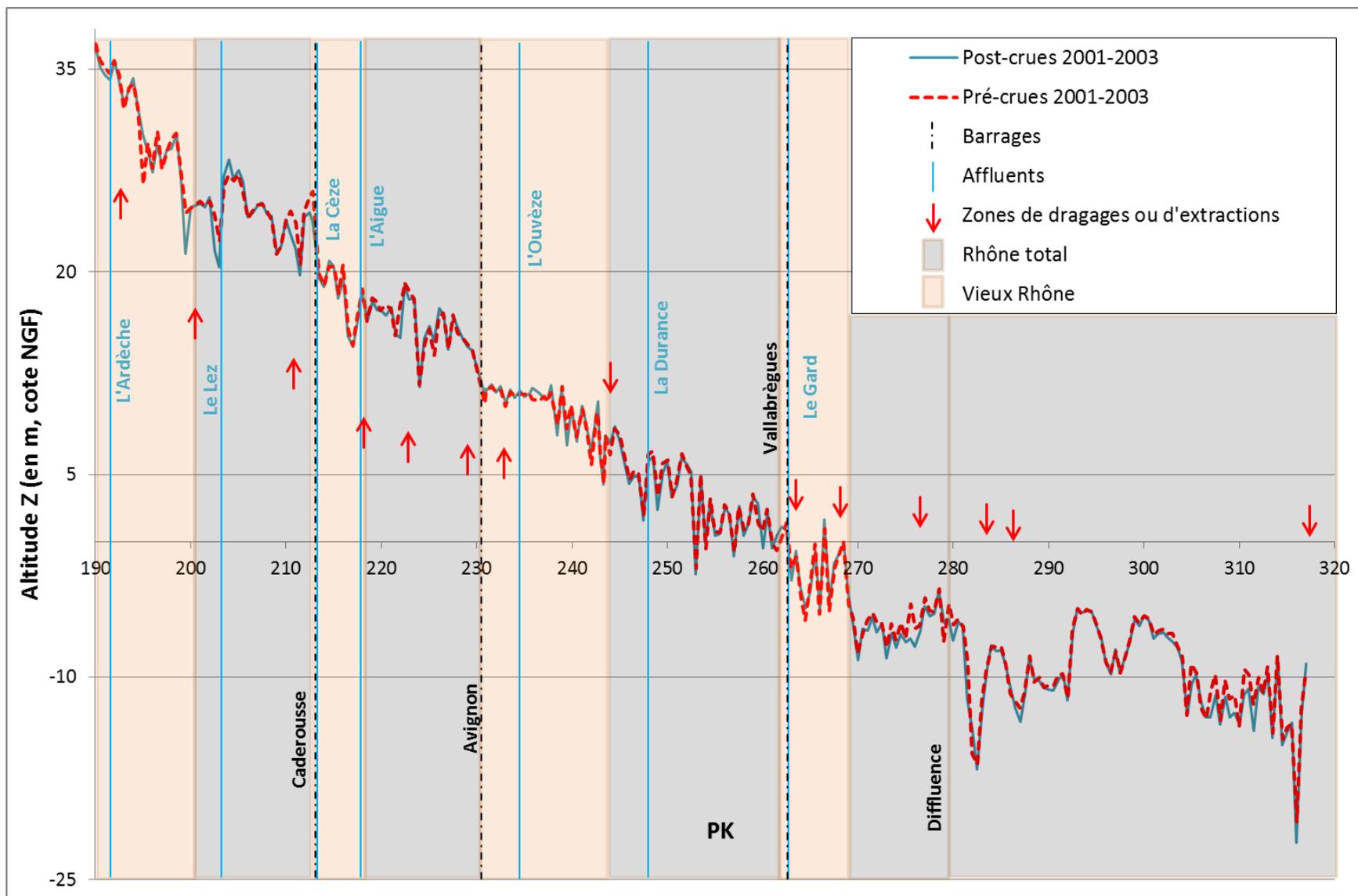


Figure 31 : Profils en long entre le PK 190 et 320 avant les crues de 2001 à 2003 (1996/2000 en pointillés rouge) et après les crues (2004/2007 en bleu)

b. Etude quantifiée des évolutions verticales du lit par période

Afin de mettre en évidence les variations verticales entre deux périodes de modifications, le différentiel altimétrique a été calculé entre chaque profil (le plus récent moins le plus ancien). Dans un premier temps, nous avons fait un état des lieux des changements globaux depuis 1897, afin d'évaluer la conséquence globale des aménagements sur l'évolution du chenal depuis cette date, correspondant à la période 0 dans le Tableau 5 (Figure 32). Nous avons procédé de la même manière afin d'étudier plus précisément les impacts de chaque phase d'aménagement en réalisant le différentiel :

- entre le profil en long levé avant l'implantation des barrages et celui contemporain de la construction des casiers Girardon (période 1 : Tableau 5 et Figure 33), qui met en évidence les impacts de la phase d'aménagement Girardon sur le fond du lit (Figure 34),
- entre le profil en long récent et celui levé avant la construction des barrages (période 2 : Tableau 5 et la Figure 33), montrant l'évolution du chenal depuis la mise en place des barrages (Figure 35).

La période 3 permet de rendre compte de la sensibilité et la réactivité actuelle du chenal suite à des épisodes morphogènes correspondant ici aux crues de 2001 à 2003 (Figure 36). Elle correspond au différentiel altimétrique mesuré entre le profil en long avant les crues et celui après les crues (Tableau 5 & Figure 33).

La Figure 37 présente la moyenne mobile d'ordre 10 des variations verticales de chaque période (ligne continue) et leur tendance présentée par une loi polynomiale d'ordre 6. Elle permet ainsi de comparer les variations altimétriques de ces trois périodes entre elles et de rendre compte des tendances globales.

Lorsque les points des Figure 32 à Figure 37 sont situés au-dessus de 0, la tendance est à l'exhaussement, en-dessous de 0, la tendance est à l'incision. Le niveau de 0 représente l'absence d'évolution verticale. En visualisant de façon globale ces courbes, on montre que la tendance générale est à l'incision (densification des points en-dessous de 0), de la construction des casiers à aujourd'hui (Figure 32) et pour chaque grande période d'aménagement et de crues. De nombreux points sont supérieurs ou égaux à 0, parfois mélangés dans la masse de points inférieurs à 0. On peut néanmoins établir une hiérarchie entre les différentes périodes en termes d'incision.

On constate que l'incision la plus forte a été observée lors de la période 1, soulignant sans doute l'impact de la construction des casiers (Figure 34 et Figure 37). On observe quelques points en exhaussement à l'aval de l'Ardèche, l'Ouvèze, la Durance et le Gard, pouvant symboliser un apport de charge solide. 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.

La période 2 montre une concentration de points en incision moins importante que la période précédente mais avec des maxima bien marqués (Figure 35 et Figure 37). Dans ce cas, il est possible que les extractions et les dragages ayant eu lieu à cette période aient pu favoriser ces phénomènes locaux. 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, l'Isère, l'Ardèche et la Durance, un phénomène à corrélérer 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.

La période 3 montre aussi une densité plus importante de points à l'incision, même si celle-ci est moins marquée que pour les autres périodes. Il y a aussi des points en exhaussement, soulignant une redynamisation du lit par les crues (Figure 36 et Figure 37).

Le grand Rhône s'incise à chaque période, sauf à la diffluence qui s'exhausse constamment.

La lecture directe de ces figures est adaptée à une analyse très locale (multitude de variations par point successivement supérieur et inférieur à 0) mais reste complexe lorsqu'on veut observer les grandes tendances par biefs. Afin de visualiser les grandes ruptures, notamment les secteurs en incision, en exhaussement et les secteurs restés stables, nous utilisons la méthode du cumul du différentiel qui permet une meilleure visualisation de ces données.

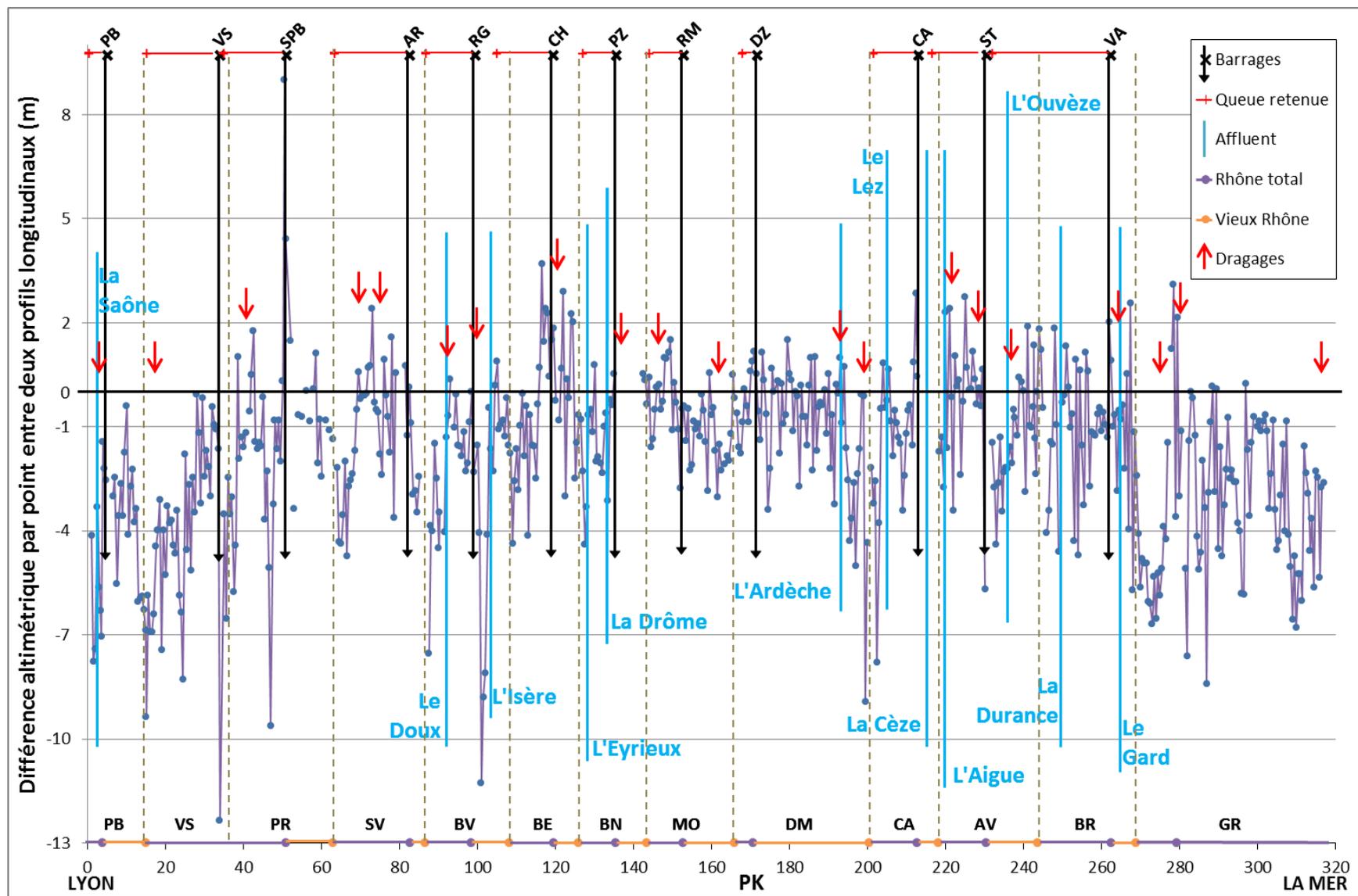


Figure 32 : Différentiel altimétrique entre tous les points de Lyon à la mer, entre le profil de 1897-1907/08 et le profil récent (période 0)

[Les secteurs du Rhône : 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]

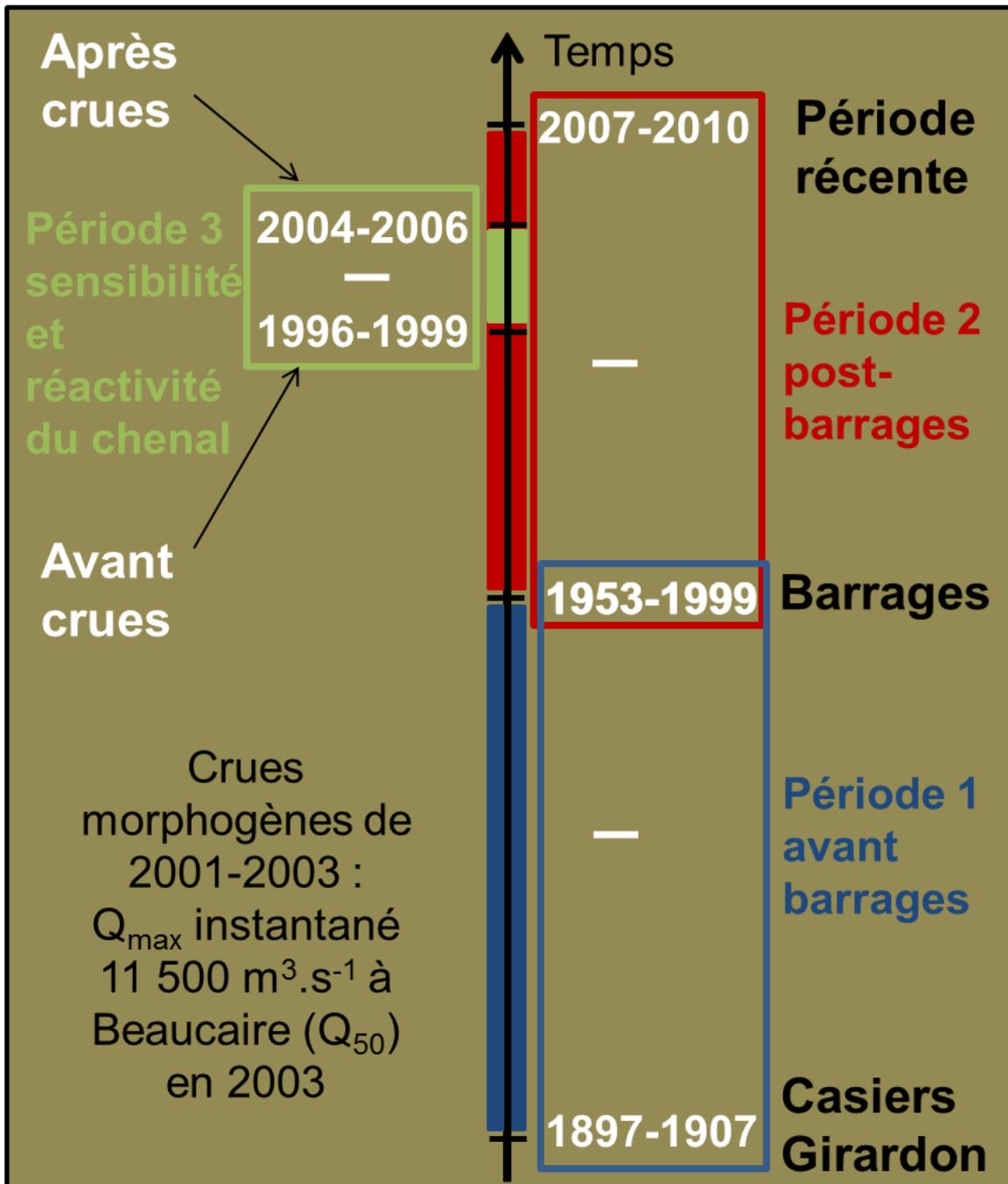


Figure 33 : Différentiel altimétrique réalisés entre les profils en long correspondant à chaque période d'étude (avant/après aménagements-crues morphogènes)

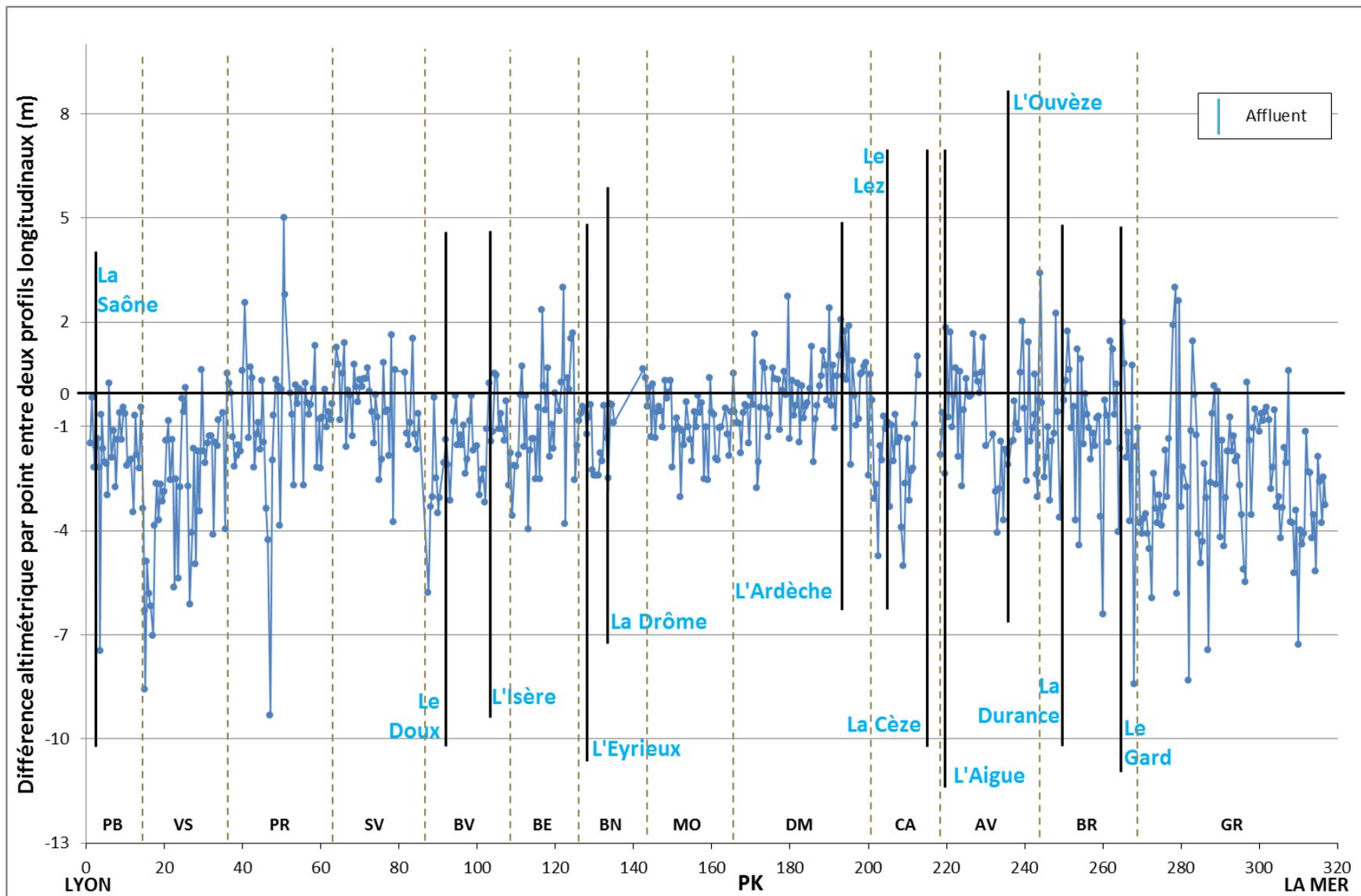


Figure 34 : Différentiel altimétrique entre tous les points de Lyon à la mer pour la période 1 (avant la construction des aménagements CNR)

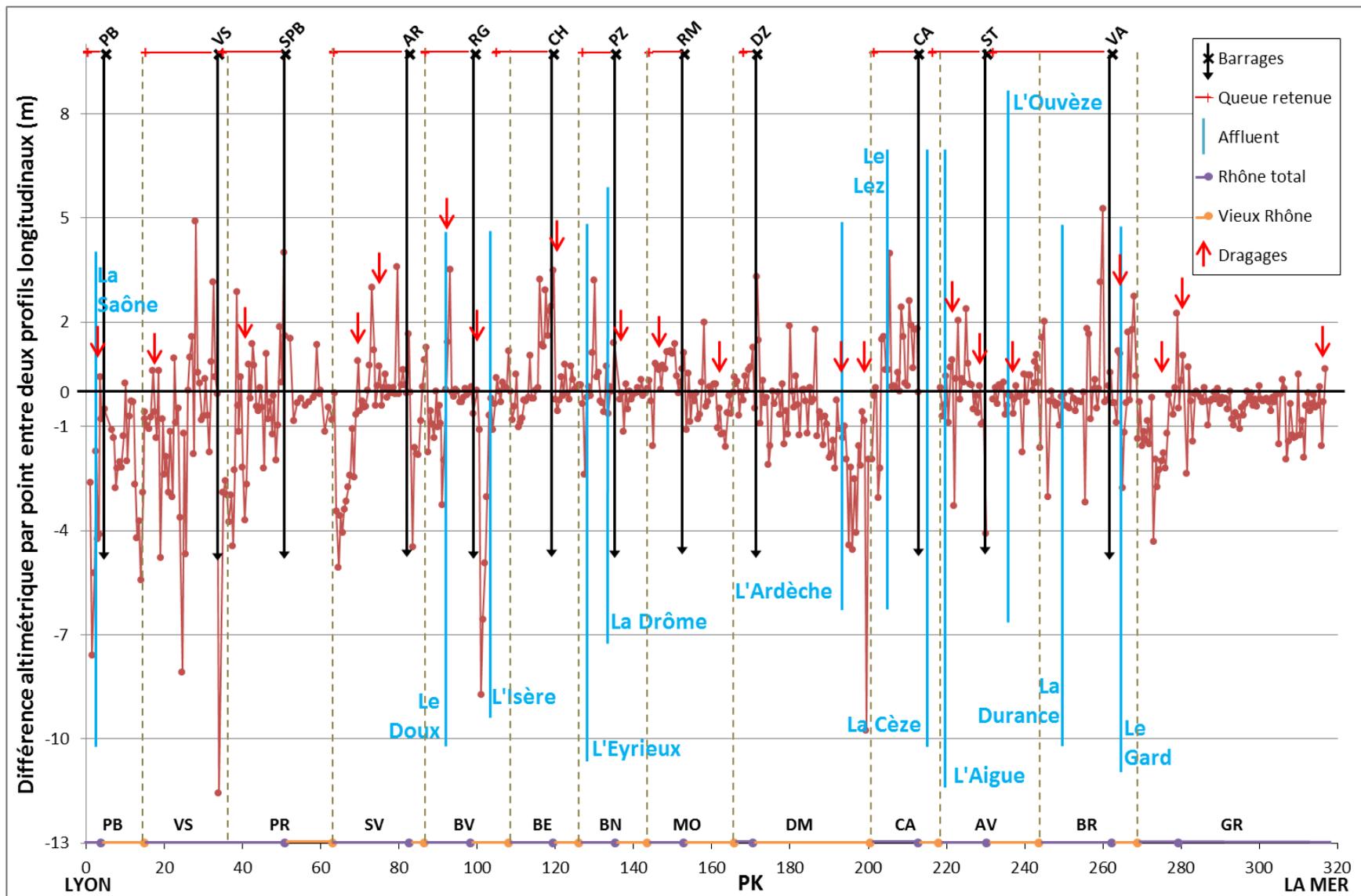


Figure 35 : Différentiel altimétrique entre tous les points de Lyon à la mer pour la période 2 (après la construction des aménagements CNR)

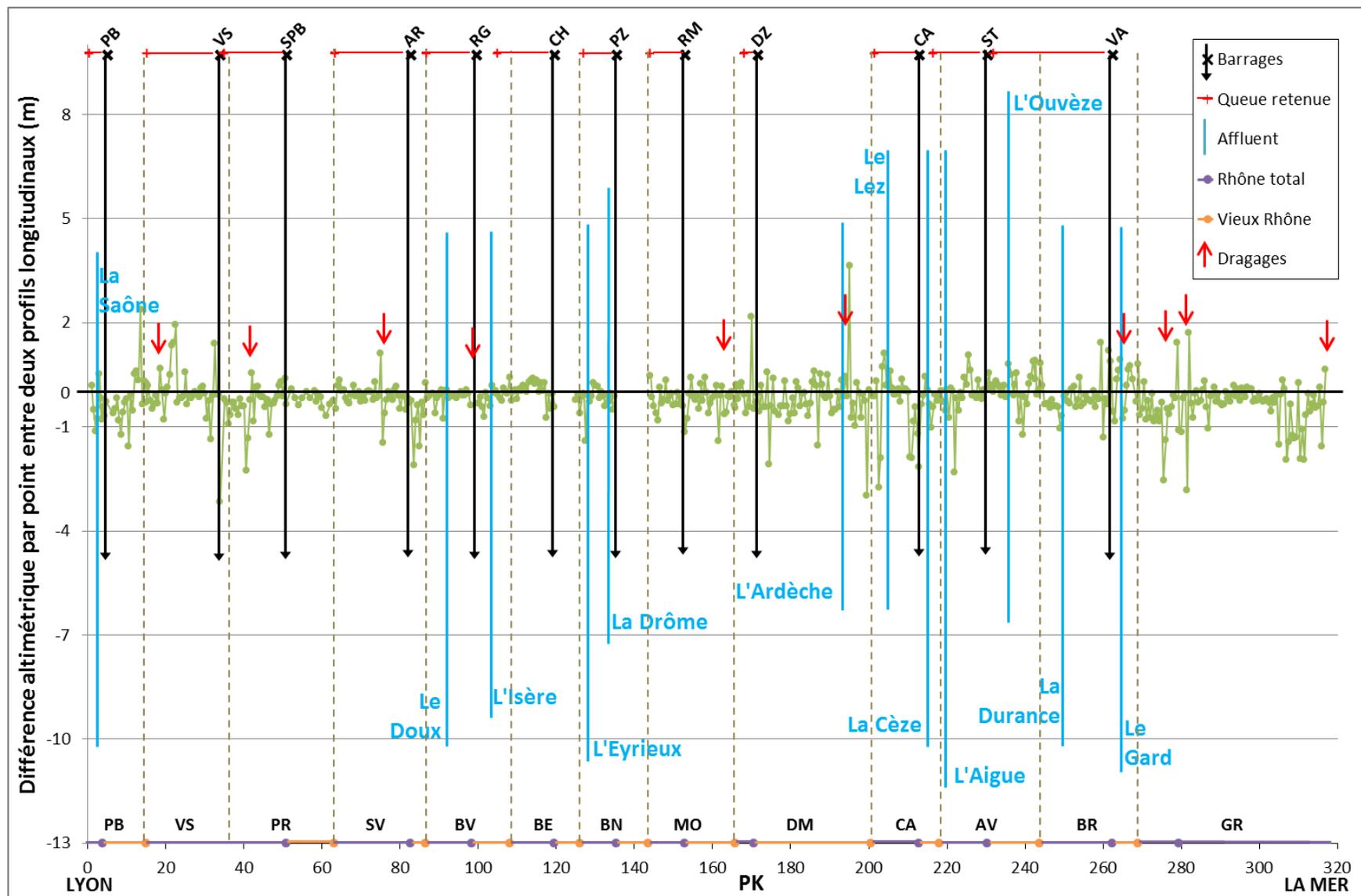


Figure 36 : Différentiel altimétrique entre tous les points de Lyon à la mer pour la période 3 (avant et après les crues de 2001 à 2003)

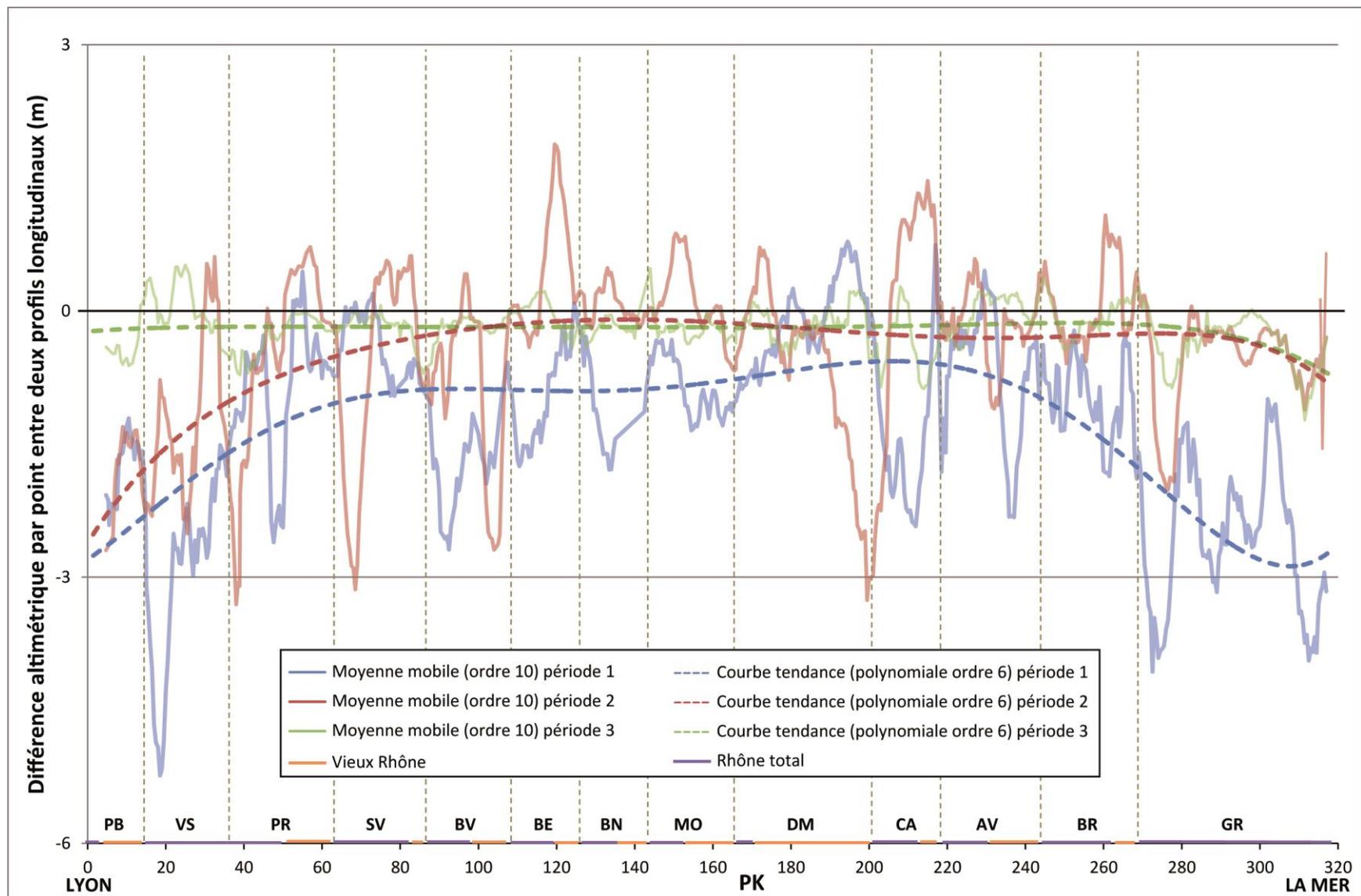


Figure 37 : Comparaison des tendances globales des différentiels altimétriques de Lyon à la mer pour la période 1 (Figure 34), la période 2 (Figure 35) et la période 3 (Figure 36)

c. Analyse des tendances longitudinales par le cumul du différentiel altimétrique par période

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). Le cumul du différentiel pour la période totale (entre l'implantation des casiers Girardon et l'actuel) nous montre que le linéaire est en incision (Figure 38), avec une moyenne de -1,81 m, soit un taux d'incision moyen de 1,72 cm/an. La Figure 39 regroupe le cumul des différentiels de la période 1 (plus ou moins après la construction des casiers Girardon : courbe bleue), la période 2 (après la construction des barrages : courbe rouge) et la période 3 (avant et après les crues de 2001-2003 : courbe verte). Un agrandissement des périodes 2 et 3 est représenté sur la Figure 40.

La courbe représentant la période 1 (Figure 39) est principalement descendante, séquencée par une succession de plateaux et quelques courtes ascensions. Elle nous montre 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. 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 de la fosse de 10 m, entre le PK 45 et 50. 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, vers le PK 110. Deux autres paliers, séparés par un tronçon en incision, sont observés à l'amont de l'Eyrieux et à l'aval de la Drôme jusque 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. Puis, on est de nouveau dans une situation d'incision dans le secteur de Caderousse, suivi d'un palier dans la partie amont d'Avignon et enfin une large incision jusqu'à l'aval, rythmée par une pente moins marquée d'Avignon à Beaucaire et plus forte de Beaucaire à la mer.

La courbe représentant la période 2 (Figure 39 et Figure 40) présente une pente globale plus faible que la courbe précédente, mais des successions de pentes très marquées localement. L'incision reste majeure jusqu'à l'amont du barrage de Péage de Roussillon, ponctuée de fortes incisions à l'aval de Pierre-Bénite (PK13), dans le secteur de Vaugris (PK 24 à 26) et à l'aval du barrage de Vaugris, correspondant à des zones d'extractions et de dragages. Un plateau est observé au niveau du barrage de Pierre-Bénite, un exhaussement suivi d'un plateau à l'amont du barrage de Vaugris et un court exhaussement à l'amont du barrage de Péage de Roussillon, laissant penser à un stockage sédimentaire pour ces deux derniers. 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. On constate un exhaussement en amont des barrages de Saint Vallier et Beauchastel, et un palier au niveau du barrage de Bourg-lès Valence. Entre le barrage de Beauchastel et celui de Donzère-Mondragon et à l'aval de la Drôme, le profil décrit un exhaussement principalement à l'amont des barrages de Baix-le Logis Neuf (très faible), Montélimar (le plus fort) et Donzère-Mondragon, comme s'il y avait un apport sédimentaire de la Drôme qui se stockerait dans les retenues. L'aval de l'Ardèche est marqué par une forte incision coïncidant avec des extractions, puis un exhaussement entre la confluence du Lez et l'amont du barrage de Caderousse. 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 relevé dans l'Etude Globale du Rhône (2000a5). Le grand Rhône est marqué par trois grandes zones d'incision séparées par le palier d'Arles et le seuil de Terrin, et plus forte à amont du palier puis à l'aval du seuil.

La période 1 enregistre les changements les plus radicaux sur tout le linéaire, avec une incision moyenne de -1,33 m, mais sur l'échelle de temps la plus longue, soit une vitesse d'incision moyenne de 1,77 cm/an. La période 2 quant à elle, enregistre une incision moins spectaculaire que la précédente, de -0,46 m en moyenne, mais avec des variations locales plus importantes et rapportée à une durée plus courte, 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 une 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 -0,14 m 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 -0,32 m (contre -0,46 m 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. Ce cumul rectifié est représenté par le profil en orange sur la Figure 39. Cette représentation reste très subjective, la correction qui a été appliquée est 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.

Les dragages ont permis de remobiliser les sédiments majoritairement fins (97,8% fines – 2,2% graviers) qui ont été restitués au Rhône. Dans ce cas de figure, il n'est pas possible de mesurer précisément l'incision de ces zones draguées et de localiser les zones de redéposition des sédiments.

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. Premièrement, 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 responsable 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.

Ces résultats attestent d'un impact plus important des casiers Girardon sur le linéaire par rapport à celui des aménagements CNR qui a été plus localisé. Cette période 1 est donc caractérisée par une incision généralisée inscrite dans le temps et résultant sans doute des modifications hydrauliques occasionnées par les ouvrages Girardon. Cependant, les extractions lors de la période 2 ont aussi laissé de nombreuses séquelles dans le fond du chenal en l'incisant localement et durablement. La construction des barrages semble donc avoir eu un effet plus modéré sur la géométrie du lit, du fait qu'ils ont été implantés après les ajustements morphologiques et le tarissement des apports des principaux affluents. De ce fait, le flux sédimentaire (potentiellement piégeable) est faible, les contraintes critiques sont rarement atteintes car le lit a été amené à se paver lors des incisions précédentes et dans les sections court-circuitées, le débit de pointe (permettant la remobilisation sédimentaire) a été réduit.

La période 3, représentée sur les Figure 39 et Figure 40, montre une pente descendante beaucoup moins forte que les deux périodes précédentes mais composée d'accidents locaux (moins importants que la période 2) visibles sur la Figure 41. Ces variations, moins marquées, se sont néanmoins produites plus rapidement, à une échelle événementielle, de l'ordre de quelques années. Cette période

enregistre une incision moyenne de -0,2 m en moyenne, bien inférieur aux autres périodes, mais sur une durée plus courte, avec un taux moyen d'incision de 3 cm/an.

La Figure 41 semble montrer un phénomène de stockage-déstockage entre l'amont et l'aval des barrages. Les incisions sont très localisées, au même titre que les exhaussements, de sorte qu'il est possible de corréler les deux en évoquant une remise en mouvement des sédiments par l'augmentation des vitesses en crue. 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. 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.

Le lit actuel ne semble donc pas être 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. Afin de mieux comprendre ces variations, il est important de les confronter au contexte hydrologique qui n'a pas été uniforme sur tout le continuum au cours de ces événements.

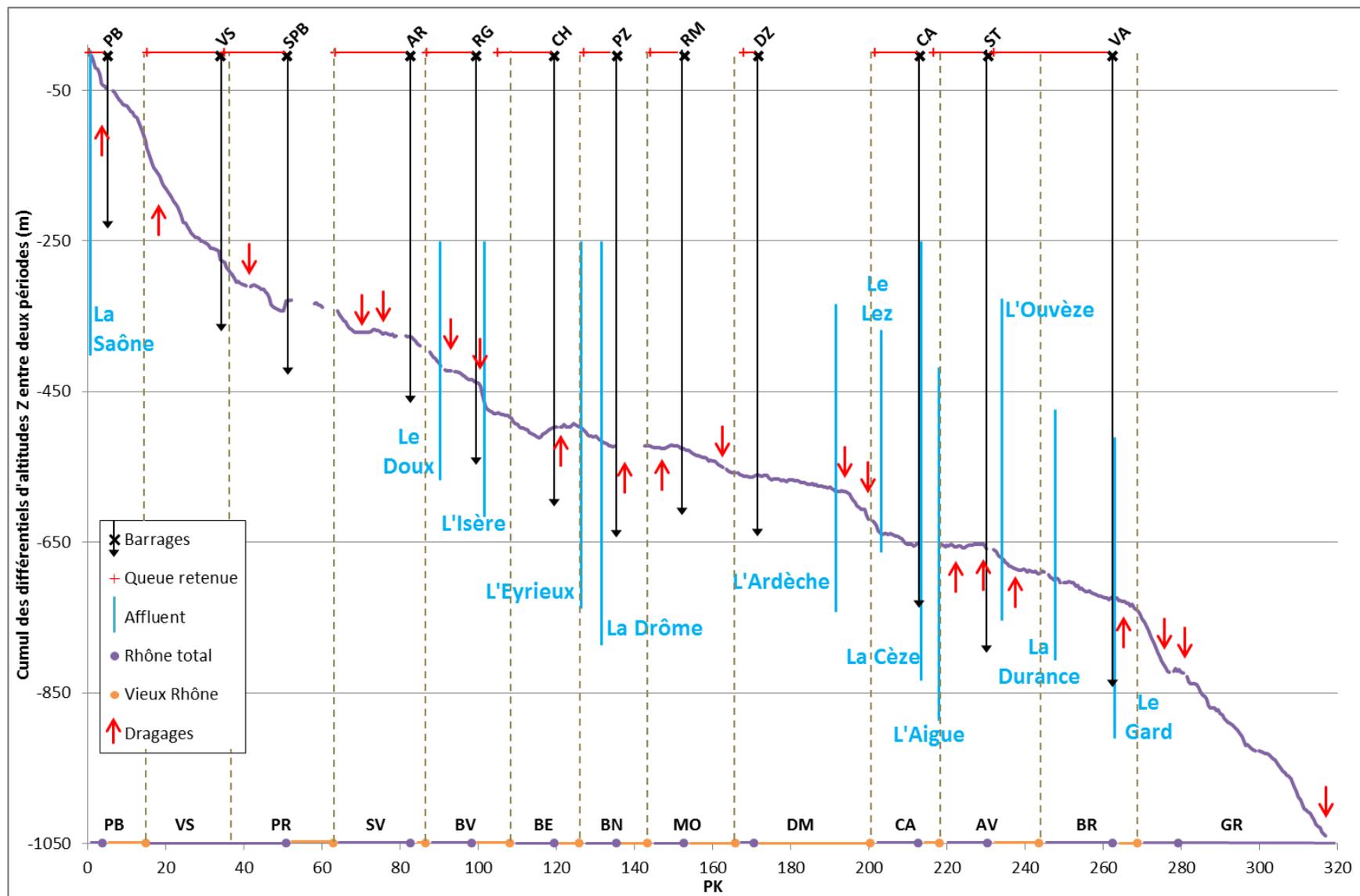


Figure 38 : Cumul des évolutions verticales totales du fond du lit observées tous les 500 m entre 1897/1907 et 2007/2010 sur le Rhône de Lyon à la mer [PB=Pierre-Bénite, VS=Vaugris, PR=Péage de Roussillon, SV=Saint Vallier, BV=Bourg-lès Valence, BE=Beauchastel, BN=Baix-le Logis Neuf, MO=Montélimar, DM=Donzère-Mondragon, CA=Caderousse, AV=Avignon, BR=Beaucaire, GR=Grand Rhône – SPB=Saint Pierre de Bœuf, AR=Arras, RG=Roche de Glun, CH=Charmes, PZ=Pouzin, RM=Rochemaure, DZ=Donzère, ST=Sauveterre, VA=Vallabrègues]

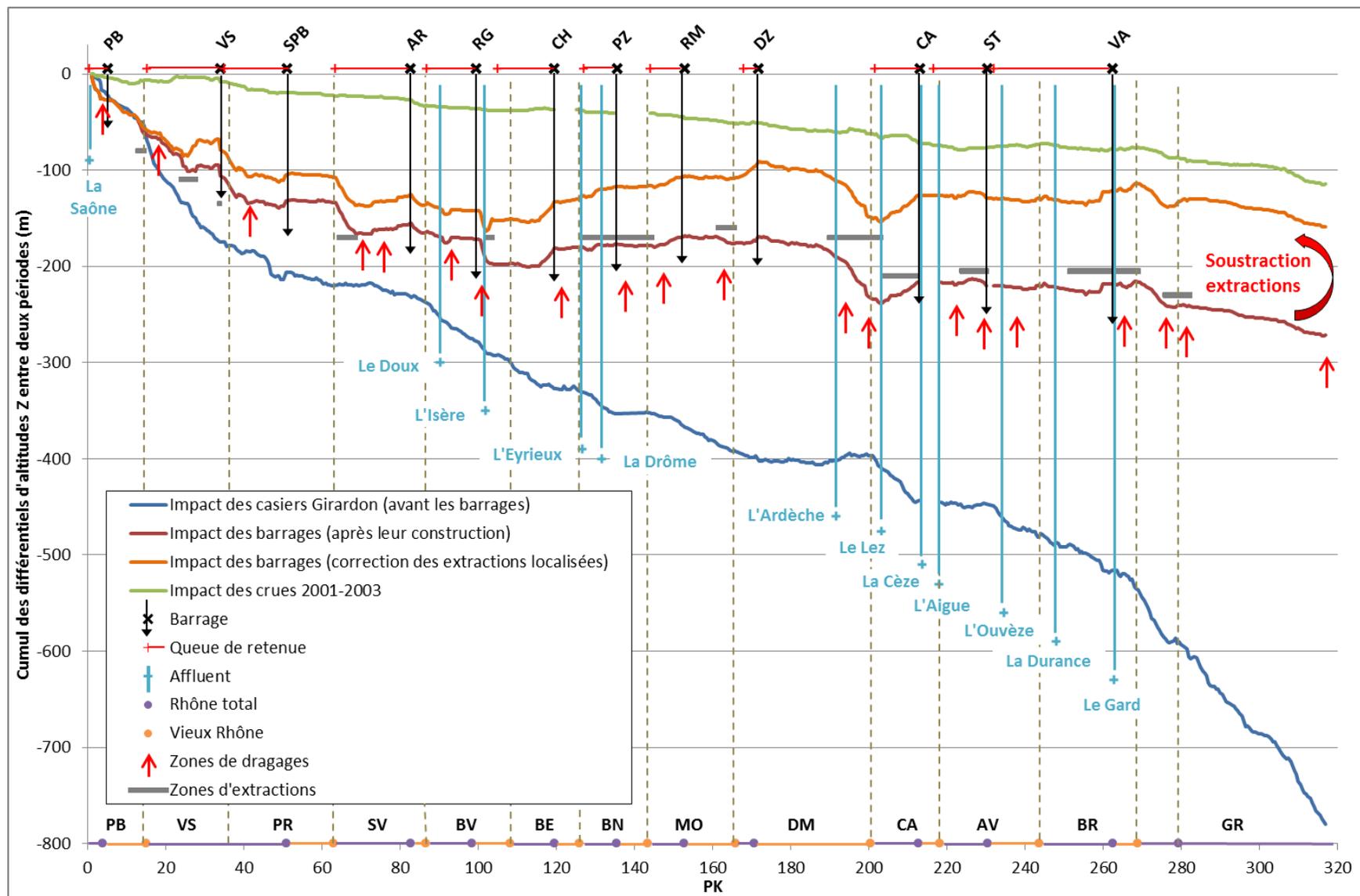


Figure 39 : Cumul des évolutions verticales du fond du lit observées tous les 500 m entre deux dates sur le Rhône de Lyon à la mer : en bleu la période correspondant aux aménagements Girardon, avant les barrages [1897/1907-08 - 1953/1981], en rouge la période après la construction des barrages [1953/1999 - 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].

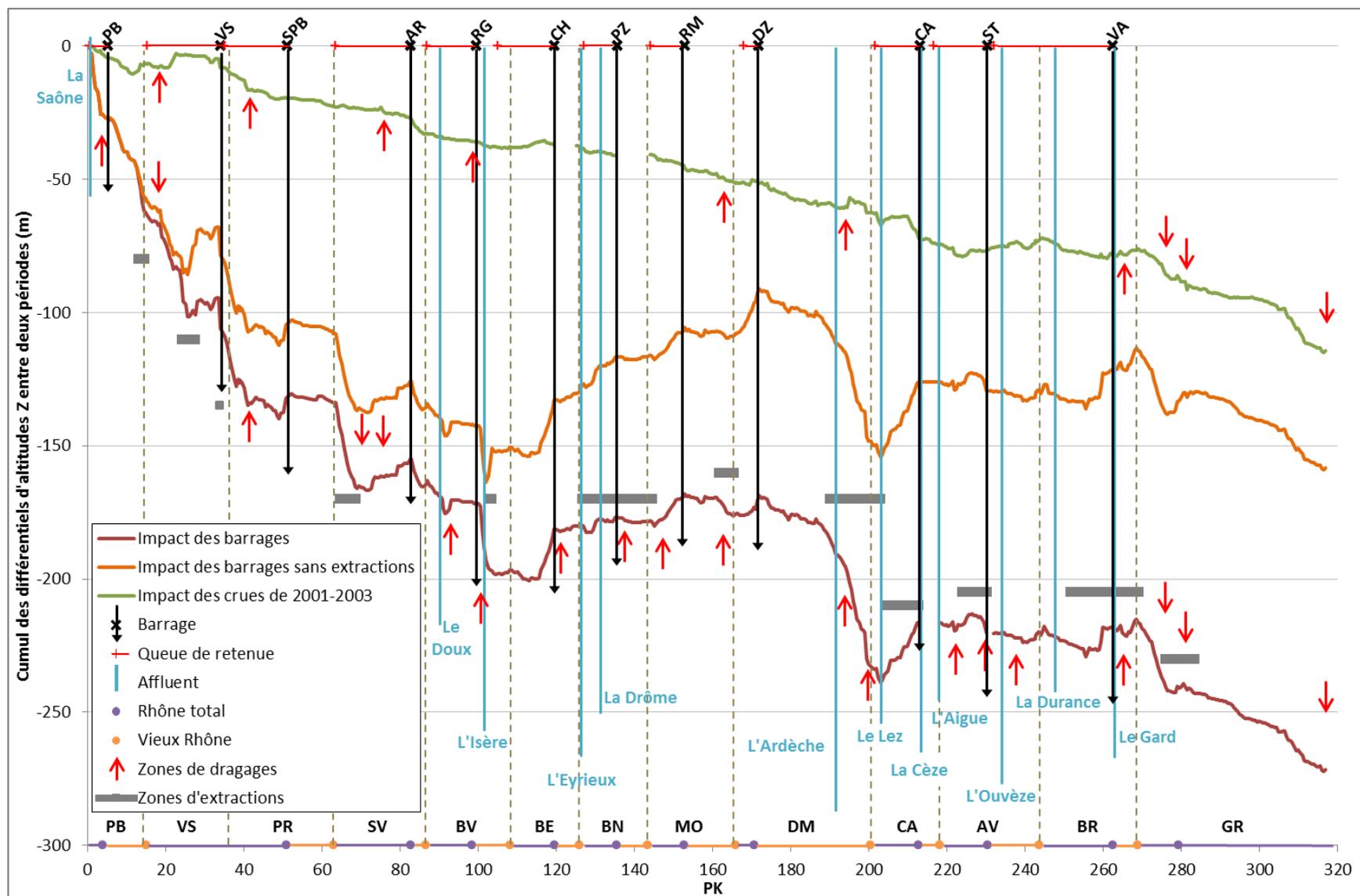


Figure 40 : Cumul des évolutions verticales du fond du lit observées tous les 500 m entre deux dates sur le Rhône de Lyon à la mer : en rouge la période après la construction des barrages [1953/1999 - 2007/2010], en orange le période après la construction des barrages rectifiée par rapport aux extractions, et en vert la période couvrant les effets des crues de 2001-2003 [1996/2000 - 2004/2007].

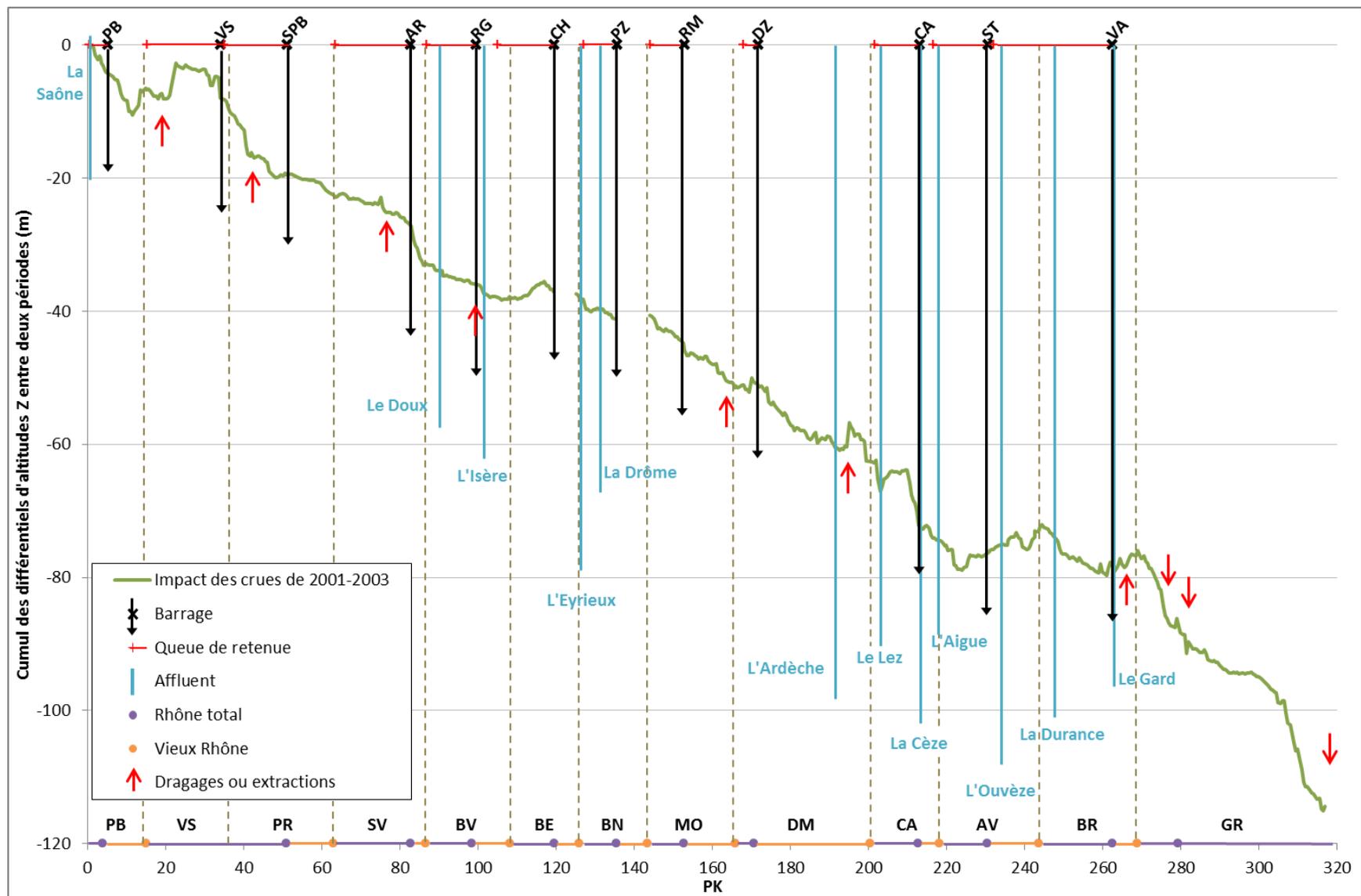


Figure 41 : Cumul des évolutions verticales du fond du lit observées tous les 500 m sur le Rhône de Lyon à la mer entre les deux périodes [1996/2000 & 2004/2007] couvrant les effets des crues de 2001-2003.

d. Réactivité et sensibilité verticale du lit actuel aux épisodes de crue

Le cumul du différentiel altimétrique des profils avant et après les crues de 2001 à 2003 a été comparé à trois variables pouvant permettre d'interpréter les modifications du chenal : les données granulométriques collectées sur tout le continuum, la largeur du chenal (lit mineur) et la fréquence de débit des crues de 2001 à 2003 (Figure 42).

La partie aval du Rhône voit une incision continue importante qui semble s'expliquer par le fait qu'elle a enregistré des débits des crues de 2002-2003 plus intenses, plus rares. Le chenal a réagi malgré un diamètre médian des particules relativement important (majoritairement entre 20 et 70 mm) et une largeur importante.

Les zones où la granulométrie est la plus fine (limons et sables, D50 proche de 0), situées soit à l'amont direct des barrages soit dans le secteur aval du grand Rhône, montrent une incision après les crues. 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 le 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 événements de crues 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).

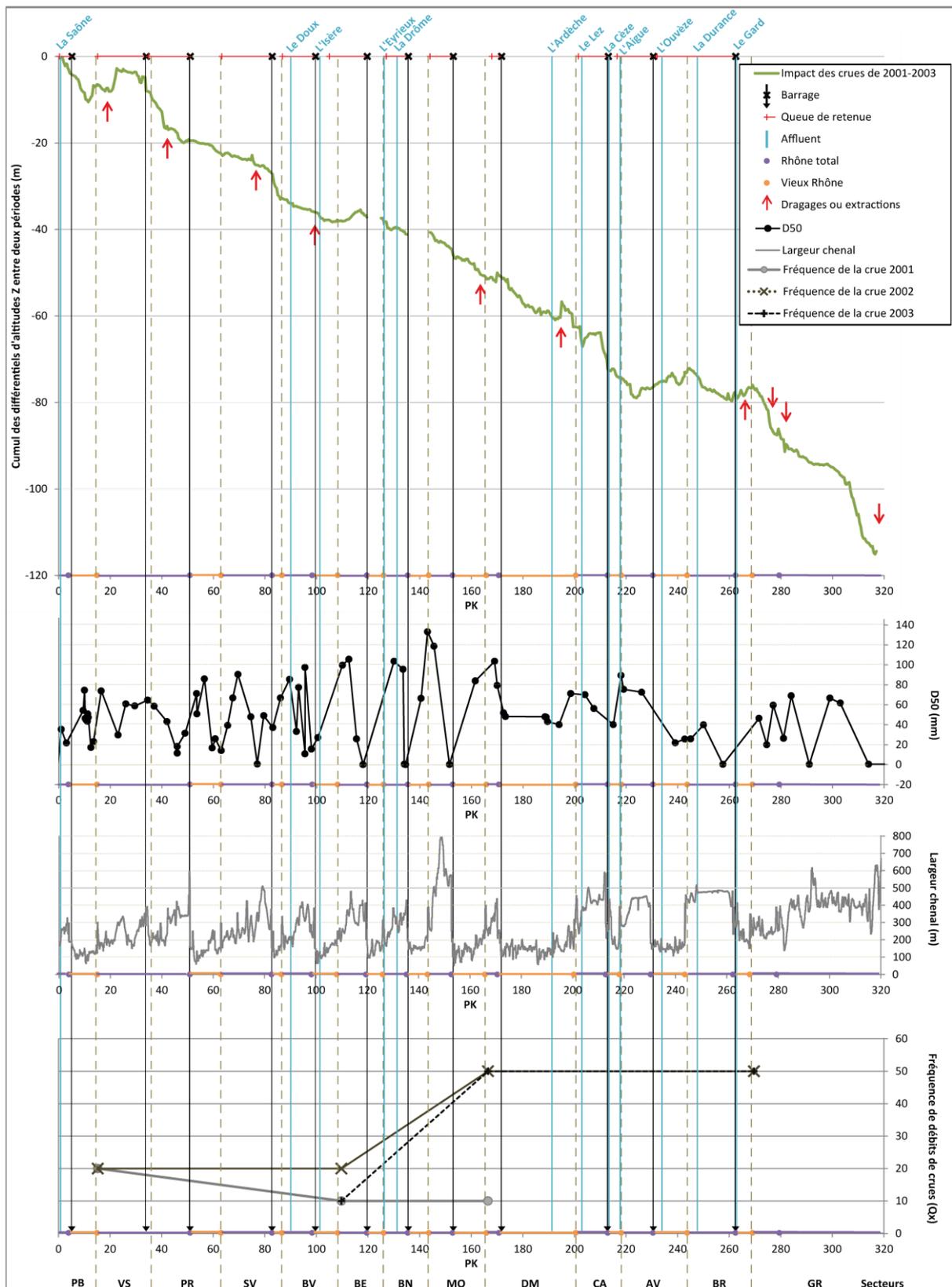


Figure 42 : Cumul du différentiel altimétrique avant/après les crues de 2001 à 2003 comparé à : la taille médiane (D50 en mm) des sédiments prélevés dans le fond du lit (sur les points hauts du thalweg) – la largeur du chenal (m) – les périodes de retour aux stations de Ternay (PK15), Valence (PK110), Viviers (PK166) et Beaucaire (PK270) pour les crues de 2001, 2002 et 2003

3) Evolution longitudinale et temporelle des formes du lit à partir de la moyenne mobile

a. 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 à partir des extrema. La demi-amplitude correspond à la taille des formes à partir de la moyenne mobile, c'est-à-dire à la hauteur des seuils (au-dessus de la moyenne mobile) et à la profondeur en valeur absolue des mouilles (en-dessous de la moyenne mobile).

Le Tableau 7 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 que celles des seuils : 2,06 m contre 1,64 m.

Amplitude minimale	Amplitude moyenne	Amplitude maximale	Période minimale	Période moyenne	Période maximale
0,110	3,698	44,677	69,009	1745,953	5938,478
Hauteur seuil minimale	Hauteur seuil moyenne	Hauteur seuil maximale	Hauteur mouille minimale	Hauteur mouille moyenne	Hauteur mouille maximale
0,014	1,639	17,693	0,008	2,058	26,984

Tableau 7 : 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 répartition des gammes de hauteur, nous avons réalisé un histogramme en fréquence pour chaque type de forme (Figure 43). La Figure 43 (A) nous montre que 72% des seuils présentent une hauteur de 2 à 4 m exclu, 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 44) ont mis en évidence qu'en moyenne, 76% des tronçons possédaient des mouilles plus hautes que les seuils.

La moyenne de chaque paramètre a été calculée par tronçon. Les résultats des premières analyses statistiques ont été regroupés dans le Tableau 8. L'ensemble des données brutes ont été répertoriées dans l'Annexe 5.

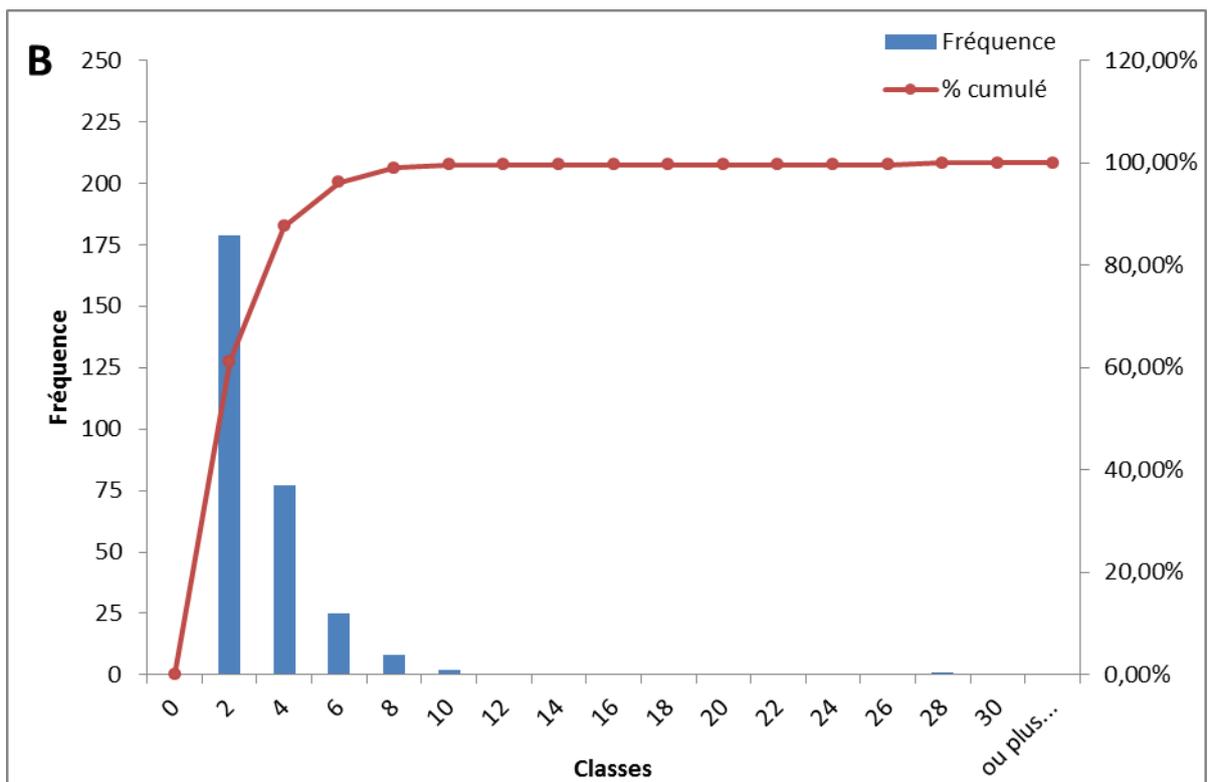
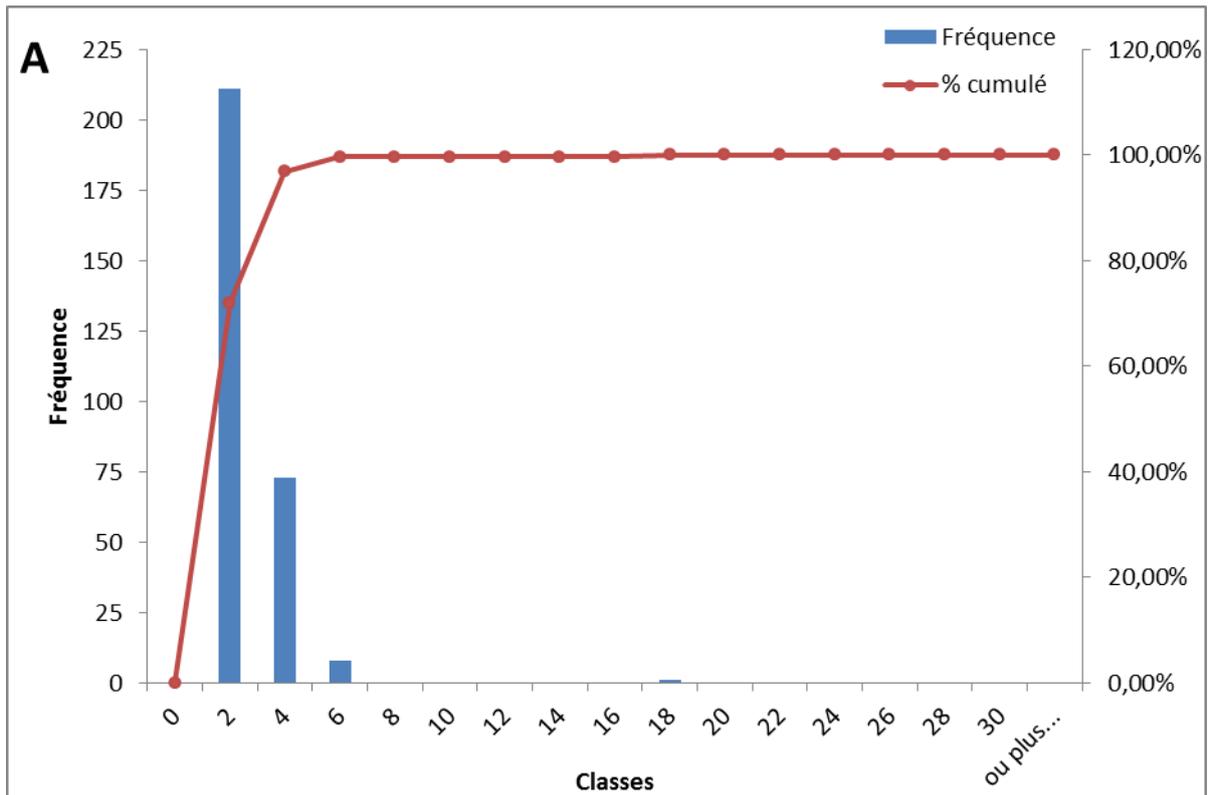


Figure 43 : Histogramme des fréquences des classes de hauteur de seuil (A) et de profondeur de mouille (B) et la fréquence cumulée associée. Les classes correspondent aux hauteurs des formes en mètre

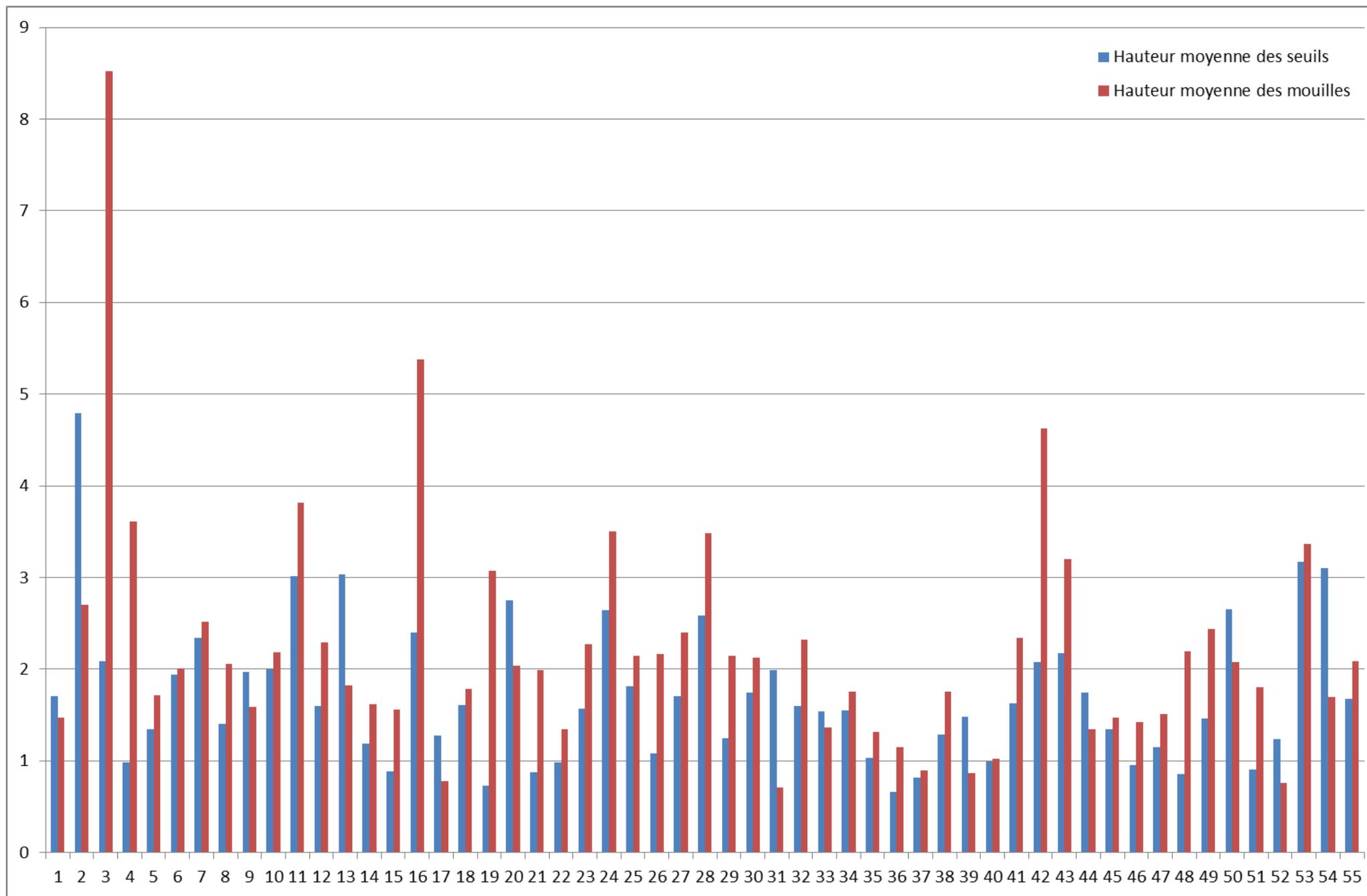


Figure 44 : Hauteurs moyennes des formes type seuil-mouille par tronçon homogène. Seuil (Hauteur moyenne totale = 1,64 – Minimum = 0,014 – Maximum = 17,7) – Mouille (Hauteur moyenne totale = 2,06 – Minimum = 0,008 – Maximum = 27). Pour 76% des tronçons : hauteur des mouilles > hauteur des seuils.

N° Tronçon	Pente moyenne	Largeur chenal moyenne	Amplitude moyenne	Amplitude minimale	Amplitude maximale	Période moyenne	Période minimale	Période maximale	Indice rugosité moyen (A/P)	Nombre seuil	Hauteur seuil moyenne	Hauteur seuil minimale	Hauteur seuil maximale	Nombre mouille	Hauteur mouille moyenne	Hauteur mouille minimale	Hauteur mouille maximale
1	1,417	126,4056822	3,285086111	1,355888889	5,109166667	2637,453815	886,041036	4276,28778	0,001245552	5	1,706027778	0,838888889	2,62875	5	1,465933333	0,517	2,876666667
2	1,7231	108,0241302	9,826308769	1,359621212	44,67694444	2391,191887	529,103182	4605,317959	0,004109377	6	4,788856482	0,258888889	17,6925	5	2,700242424	0,334166667	7,59
3	0,0697	153,0974845	8,044510101	1,456893939	29,70194444	2107,912619	1339,377563	3947,090247	0,003738307	4	2,089611111	1,104166667	3,337777778	4	8,519065656	0,352727273	26,98444444
4	0,9518	218,7088243	3,965276191	1,882888889	7,488888889	2151,420073	934,785384	4960,33958	0,001881578	3	0,981544974	0,702857143	1,224	3	3,60537037	1,27	6,471111111
5	1,0838	90,87262675	3,11547096	1,646805556	5,032111111	1934,016351	1371,66651	3050,082009	0,001610881	4	1,34459596	1,12125	1,831111111	4	1,717861111	0,525555556	3,201
6	1,2306	229,4822764	3,999277778	1,441	7,394	1454,9553	69,008514	2244,701865	0,002748729	4	1,9415	0,99	3,283	5	2,00665	0,081	5,261
7	0,8422	99,76607749	4,823666214	2,301818182	7,428	2066,880129	610,41023	3303,527431	0,002333791	6	2,339340456	1,478	3,96	6	2,516886364	1,214545455	4,4375
8	0,2732	209,7979379	3,627653359	1,172678571	8,115705128	1979,334191	125,277651	3883,338639	0,001832764	7	1,40297845	0,305714286	3,651538462	7	2,052456294	0,26625	4,464166667
9	1,1874	93,12636933	3,050277778	1,993888889	5,06	2695,8862	1996,589544	3482,666554	0,001131456	2	1,965277778	0,432222222	3,498333333	2	1,588833334	1,561666667	1,616
10	0,6531	114,6717851	4,152853536	1,403434343	6,091	1570,723561	475,3934475	3477,406481	0,002643911	5	1,999411111	0,128888889	3,101666667	5	2,183742424	1,274545455	3,02
11	0,4304	180,4137721	6,612530863	4,2975	12,02444444	3320,072625	2043,480693	4095,036603	0,001991683	5	3,008711111	1,18	4,773333333	4	3,812652778	2,123	7,251111111
12	0,3911	265,0415188	4,029902116	1,273055556	7,725833333	1942,989219	686,6644985	3629,350994	0,002074073	6	1,594976852	0,7375	2,826666667	6	2,286337302	0,104444444	4,899166667
13	1,0313	96,37163599	5,419086539	3,08775641	6,619166667	1611,650199	658,6605884	3996,084214	0,003362446	2	3,03498782	1,336923077	4,731666667	2	1,819166667	1,750833333	1,8875
14	0,2795	162,9941129	2,709169034	0,151162162	6,741912741	1021,247238	219,9850987	5086,552638	0,002652804	12	1,182579744	0,135594595	2,179333333	12	1,615309818	0,015567568	5,543027027
15	0,0671	130,06893	2,529020215	0,538961149	4,957964286	1039,292346	179,7973389	2701,801256	0,002433406	8	0,883998557	0,2303125	1,890714286	9	1,554256987	0,308648649	3,738142857
16	1,5165	136,1838564	7,483578101	5,05340176	10,33778161	981,2709003	727,1988604	1453,232951	0,007626414	2	2,394980805	1,896333333	2,893448276	2	5,375231183	3,306129032	7,444333333
17	0,6238	139,98024	1,977778783	0,639261905	3,842727273	1252,008683	199,0467028	2537,643882	0,001579685	9	1,27216771	0,1445	2,844454545	9	0,779333336	0,1	1,448571429
18	0,5949	71,0869871	3,487061482	0,109666667	10,38234762	652,044701	96,9927157	2774,964577	0,005347887	27	1,60989756	0,029	4,925914286	26	1,783706651	0,080666667	5,954371429
19	0,5594	209,68259	3,784789955	1,523604004	6,217428571	829,5946368	387,7733722	1580,742003	0,004562216	3	0,729065134	0,335862069	1,267333333	4	3,074267955	1,187741935	5,456433333
20	1,0405	173,9882054	4,647650097	0,972354839	10,91100313	938,4439941	119,8537219	1709,850227	0,004952507	7	2,750225653	0,769354839	4,182727273	7	2,034935123	0,188823529	6,728275862
21	0,5682	246,5377546	3,080496417	2,651068376	3,878391608	2018,778466	1823,518942	2147,766719	0,001525921	2	0,876750646	0,697222222	1,05627907	2	1,986679175	1,953846154	2,019512195
22	0,6544	118,8261413	2,335426263	0,234909091	4,88	1413,577289	415,7135152	3002,098231	0,001652139	8	0,977887626	0,014	1,938888889	7	1,345981241	0,097777778	2,955454545
23	0,2717	325,562907	3,867423095	0,577272727	7,007152778	1917,677124	1001,84554	3015,261522	0,002016723	5	1,570271465	0,553636364	2,648181818	6	2,272161616	0,023636364	5,409375
24	0,5058	242,1362628	6,111238442	2,581727273	10,52097902	2173,053829	1498,007488	2974,254935	0,002812281	4	2,646340909	2,039	3,176363636	4	3,506355867	0,542727273	7,344615385
25	0,2187	296,8488922	4,035511997	0,837857143	6,884272727	1813,610373	291,1073687	3057,156231	0,002225126	10	1,810581549	0,765	3,596	9	2,140277529	0,058888889	4,997272727
26	0,4333	143,6600086	3,096310835	0,656761905	5,856764706	2044,372927	557,0035946	3461,063235	0,001514553	6	1,076647152	0,425333333	1,965	6	2,166247534	0,231428571	3,891764706
27	0,3255	278,1224139	4,179800289	1,448555556	7,786666667	2022,368226	287,356848	3471,066312	0,002066785	10	1,7013893	0,208461538	2,986666667	10	2,398782418	0,375555556	4,8
28	0,6432	145,3809651	6,064833334	6,063666667	6,066	3760,379172	3520,757009	4000,001335	0,001612825	1	2,587	2,587	2,587	1	3,479	3,479	3,479
29	0,1032	241,2346913	3,189738095	1,215	4,5525	2195,174704	813,4273	3003,376831	0,001453068	3	1,247333333	0,597	2,245	4	2,141041667	0,618	3,476666667
30	1,8104	281,4676475	4,028600529	2,016607143	5,961444444	2435,604003	884,722595	3983,255944	0,001654046	3	1,740833333	1,1925	2,04625	3	2,120350529	0,032857143	3,764444444
31	0,1365	149,1595374	3,065142857	2,480714286	3,812	4284,606931	2600,657775	5830,885092	0,000715385	2	1,986	1,775	2,197	1	0,705714286	0,705714286	0,705714286
32	0,647	313,7719404	3,958429682	0,509181818	10,87777778	1627,442629	554,378255	3016,448865	0,002432301	6	1,598085859	0,388181818	2,677	7	2,318003968	0,121	8,527777778
33	0,7078	160,8465294	3,041838661	1,099285714	4,527857143	1371,093046	418,780767	1599,06976	0,00221855	6	1,541836081	0,699285714	2,482857143	5	1,361789231	0,113846154	2,882857143
34	0,0539	258,4911921	3,006946154	1,02	4,134615385	2081,352054	1193,707498	3019,951945	0,001444708	2	1,550384616	0,486153846	2,614615385	3	1,753948718	0,533846154	3,208
35	0,2515	307,8216143	2,135361111	0,373	3,580833333	1354,889713	980,758114	2277,934804	0,001576041	3	1,034166667	0,245	1,5175	3	1,313777778	0,128	2,063333333
36	0,5274	163,387976	1,861992063	0,738888889	4,09375	2196,757424	968,101643	3491,352158	0,000847609	4	0,661611111	0,242	1,0725	3	1,146064815	0,1525	3,02125
37	1,0056	512,3126118	2,125954861	1,153333333	4,920416667	2136,573299	1069,73551	4083,359247	0,00099503	4	0,816944445	0,461111111	1,842222222	4	0,890625	0,655555556	1,106666667
38	0,6982	148,4167585	2,744834596	1,424722222	5,960416667	2894,426395	1410,275117	5041,162453	0,000948317	5	1,283472222	0,632222222	1,615555556	5	1,749555555	0,7925	4,45375
39	0,9795	292,925854	2,203357143	1,795454545	3,109818182	1212,919112	497,242805	2610,631906	0,001816574	3	1,478095959	1,305454545	1,590833333	4	0,862613637	0,49	1,571818182
40	0,6932	139,505418	2,0038943	0,136785714	4,487666667	1839,820012	925,956056	3419,206447	0,00108918	11	0,987525974	0,084285714	1,85875	11	1,022088023	0,0525	3,251666667
41	1,2555	176,2238401	4,088574176	1,618142857	8,045454545	2310,283346	1989,733832	3468,837505	0,001769728	4	1,623149351	0,737142857	3,314545455	4	2,343886364	0,881	4,730909091
42	2,6628	317,1820901	7,236153846	6,693418803	7,778888889	3266,625968	3017,374737	3515,877198	0,002215177	1	2,072307692	2,072307692	2,072307692	1	4,621111111	4,621111111	4,621111111
43	0,7465	421,1015024	5,228055556	3,004444444	9,98375	2560,803966	1772,508989	3480,345254	0,002041568	4	2,175555556	1,014444444	3,27375	4	3,199444445	1,99	6,71
44	0,9708	220,7510095	2,812397824	1,44	4,483216783	1410,257493	914,477939	2000,110738	0,001994244	3	1,741346801	1,380909091	1,982222222	2	1,340699301	0,059090909	2,622307692
45	0,1951	392,0247041	2,913188705	0,895555556	6,890277778	1682,80877	989,853151	2479,739395	0,001731147	5	1,343368687	0,176666667	3,285833333	6	1,474097222	0,233333333	3,604444444
46	0,9688	270,9541164	2,181272172	0,466363636	5,193272727	1788,308811	1006,644163	2648,97927	0,00121974	4	0,953979798	0,206363636	1,836	3	1,42210373	0,0975	3,357272727
47	0,3138	157,2855772	2,703803161	0,933	4,032238095	1762,36992	971,242731	2676,78777	0,001534186	5	1,148063131	0,673	1,878666667	6	1,507378067	0,26	2,716666667
48	1,5329	438,3971322	3,328319444	1,487333333	4,75325	1590,948885	1118,424679	2011,553072	0,002092034	3	0,855222222	0,432666667	1,47	3	2,1925	1,054666667	2,885833333
49	0,4681	471,2853632	3,860202904	1,35275	8,633111111	1523,800473	989,458793	2498,437852	0,002533273	10	1,457440404	0,728888889	2,282	10	2,436775	0,359	6,351111111
50	0,0413	240,0002356	5,109796703	2,69225	9,11009												

b. Segmentation en 55 tronçons homogènes

Le premier constat qui a pu être fait suite au tracé du profil en long actuel du Rhône est qu'il ne présente pas une forme concave comme on peut l'observer sur de nombreux cours d'eau ni même vraiment convexe, mais il se caractérise par des zones irrégulières, parfois bombées ou en surcreusement (Figure 45).

Un profil en long synthétique (Figure 45) permet de replacer les différents résultats des analyses statistiques et des observations sur le chenal. Les tests de Pettitt et d'Hubert sur le signal de pente (Figure 46) ont permis de déterminer les principaux biefs en termes de pentes moyennes, en tenant compte également des affluents et des ouvrages.

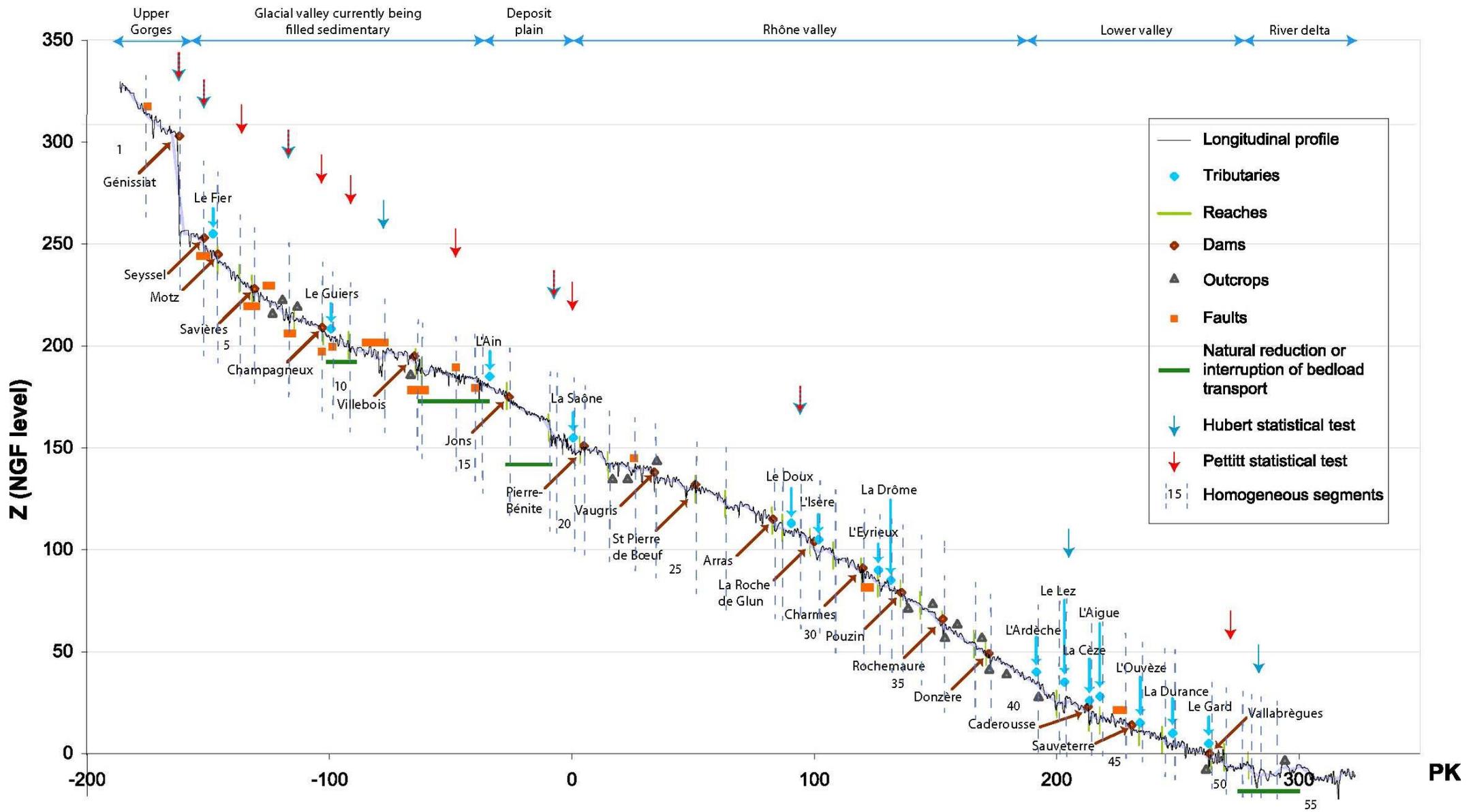


Figure 45 : Profil en long du Rhône segmenté en 55 tronçons homogène et mise en évidence de sa structure et des différentes contraintes naturelles et anthropiques

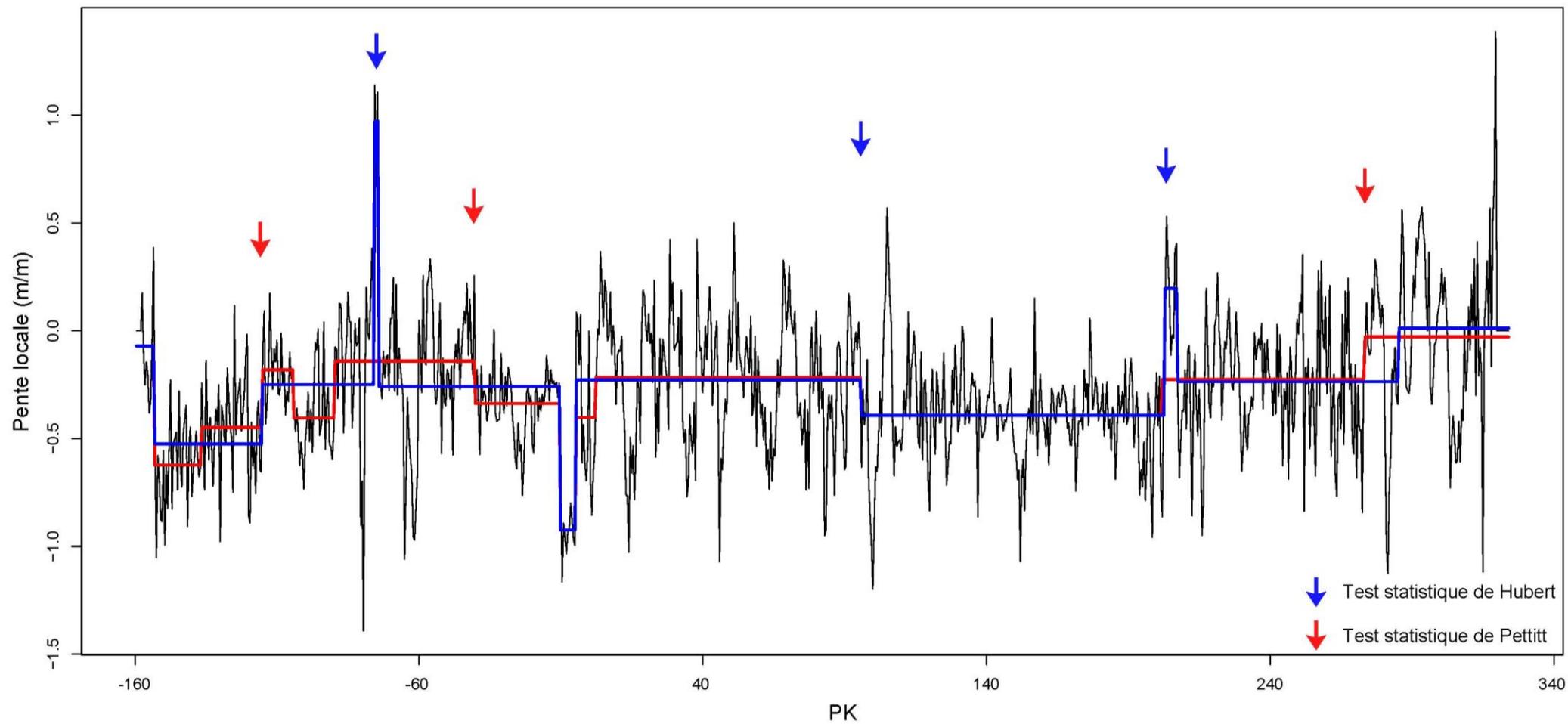


Figure 46 : Analyses statistiques de Pettitt (1979, en rouge) et Hubert (2000, en bleu) sur la pente locale du profil en long

c. Régionalisation des tronçons homogènes en fonction des caractéristiques des formes fluviales

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 47). La classification ascendante hiérarchique met ainsi en évidence trois groupes de tronçons homogènes (clusters).

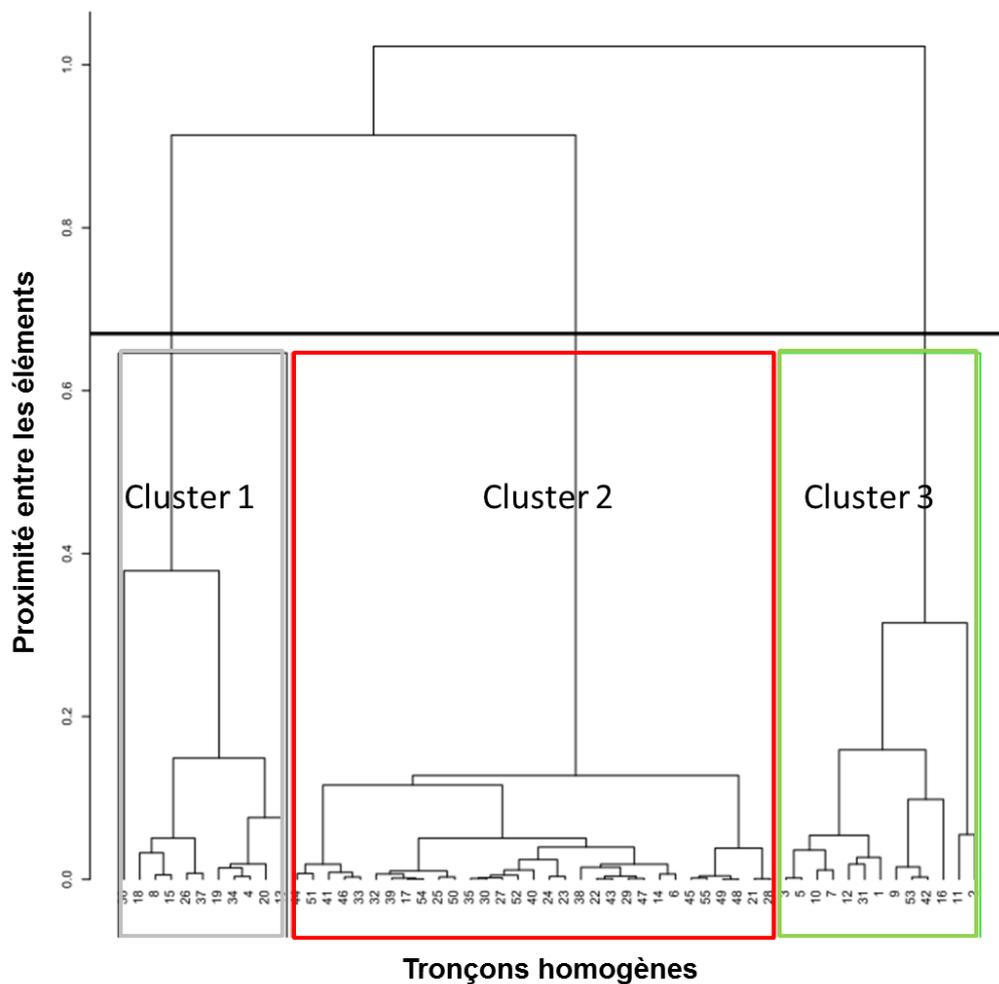


Figure 47 : Résultat d'une classification ascendante hiérarchique appliquée sur les composantes d'une ACP regroupant les tronçons homogènes en trois groupes

En projetant ces groupes sur le linéaire du Rhône, on constate une organisation amont-aval des tronçons (Figure 48, a) :

- le groupe 3 correspond aux tronçons situés dans la partie amont du Rhône, jusqu'à la confluence de l'Ain (en vert)
- le groupe 1 correspond aux tronçons situés entre la confluence de l'Ain et de la Saône (en gris)
- le groupe 2 correspond aux tronçons situés à l'aval de Lyon jusqu'à la mer (en rouge)

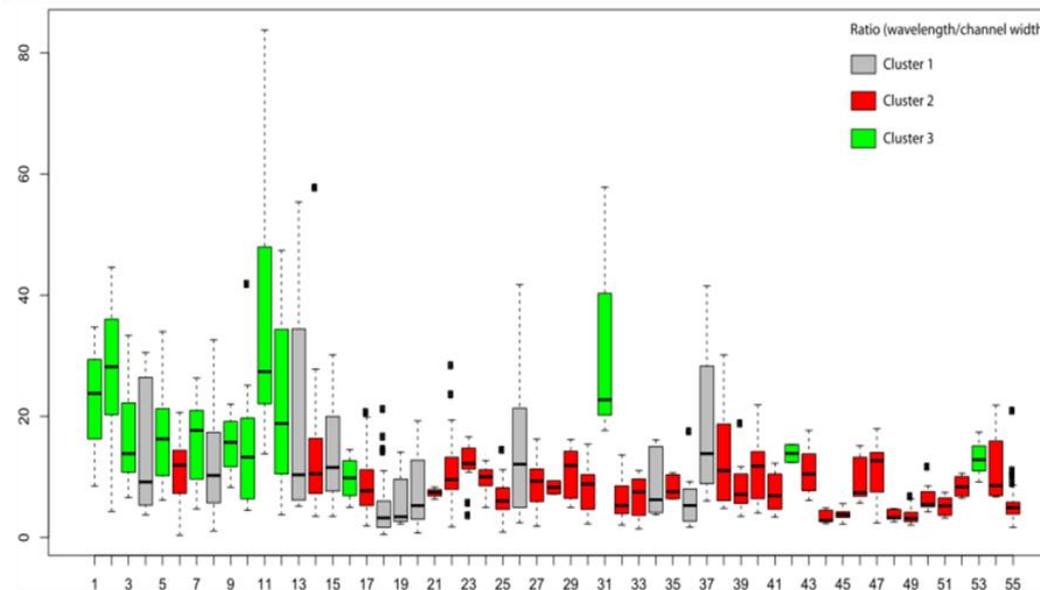
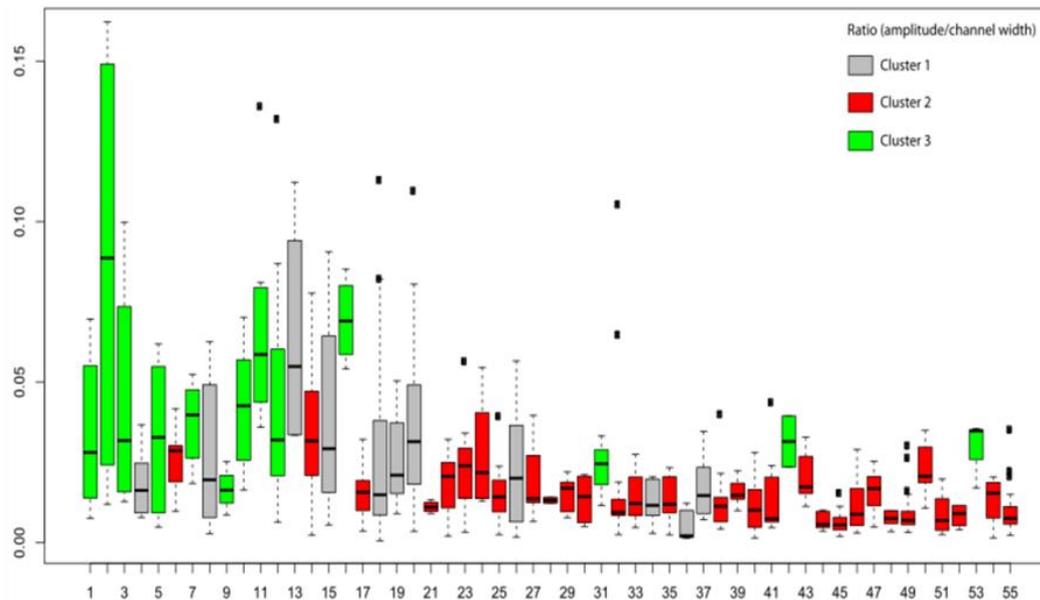
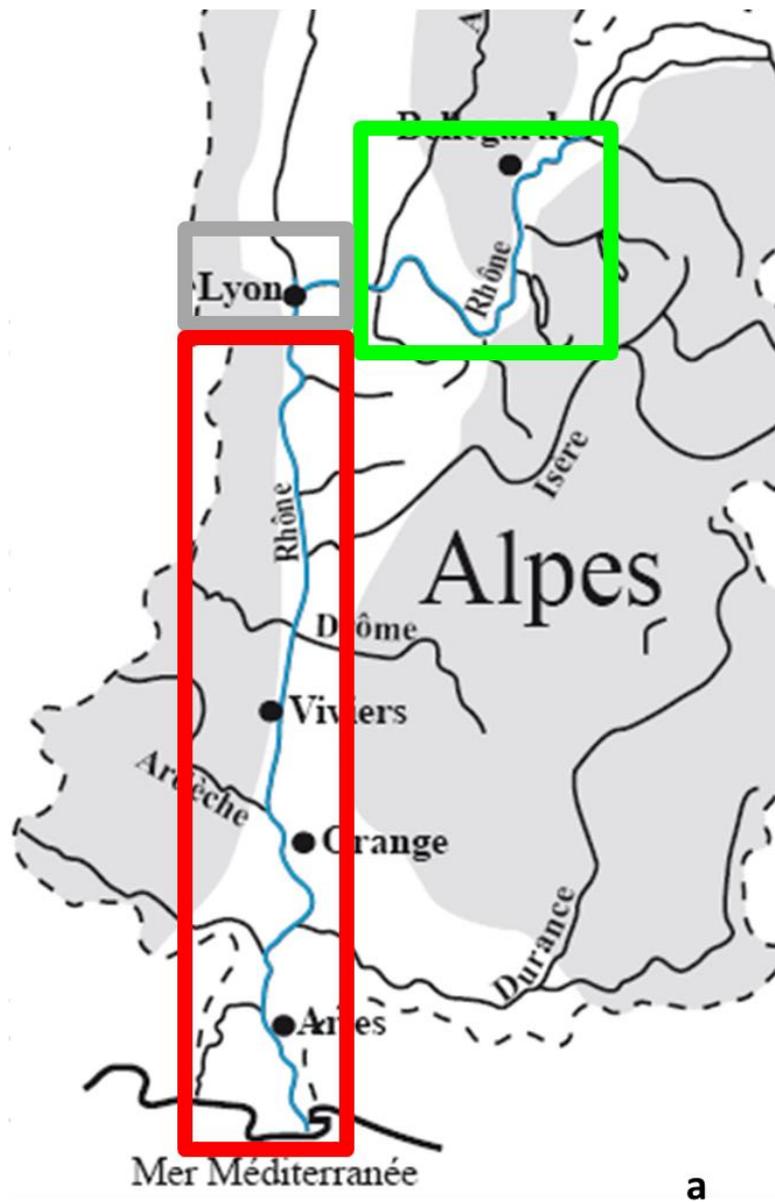
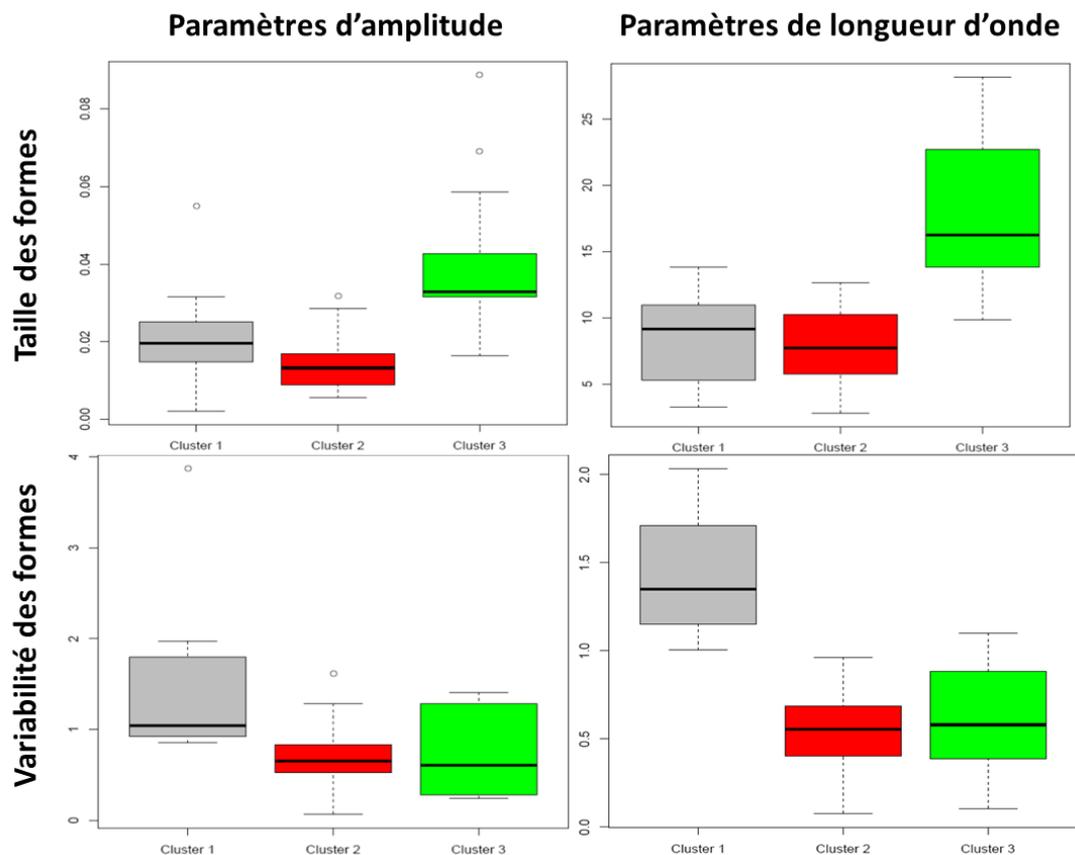


Figure 48 : Répartition longitudinale des classes par tronçon homogène : vue schématique sur le linéaire du Rhône en plan (a), par tronçon amont-aval en fonction de l'amplitude (b) et de la longueur d'onde (c) normalisées par la largeur (boîtes à moustaches)

Il s'agit ici d'une régionalisation des grandes tendances 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 grande échelle.

Nous avons reclassé les tronçons par groupe afin de mettre en évidence leurs caractéristiques et de les comparer (Figure 49) :

- le cluster 3 (vert) est caractérisé globalement (en valeur médiane) par des formes de grande taille tant en termes d'amplitude que de longueur d'onde et qui présentent une bonne homogénéité inter-forme (faible intervalle interquartile)
- le cluster 1 (gris) décrit des formes globalement petites (en valeur médiane) mais très variables
- le cluster 2 (rouge) montre également des formes globalement de petite taille (en valeur médiane) mais cette fois assez homogène (faible intervalle interquartile)



d. Evolution temporelle des formes du fond sur trois secteurs

Dans le secteur de Chautagne (PK -145 à -136, Figure 50), on constate une diminution de l'amplitude des formes entre 1978 et 2009. Dans le secteur de Pierre Bénite (PK 1 à 15, Figure 51), on n'observe pas de réelles évolutions 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 52).

Suite à ces résultats initiaux, nous pouvons émettre les constats suivants :

- Les formes fluviales du Rhône amont semblent avoir subi les changements les plus visibles suite aux récents aménagements en termes de lissage du profil. Dans le secteur de Chautagne, il n'y a pas eu d'implantation d'épis Girardon. Les ajustements morphologiques résultent sans doute principalement des aménagements CNR, ce qui ressort des données récentes.
- 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 20^{ème} siècle afin de savoir si des ajustements plus précoces (post-aménagements Girardon, et avant les aménagements CNR) ne seraient pas observés comme ceux étudiés sur le Rhin.

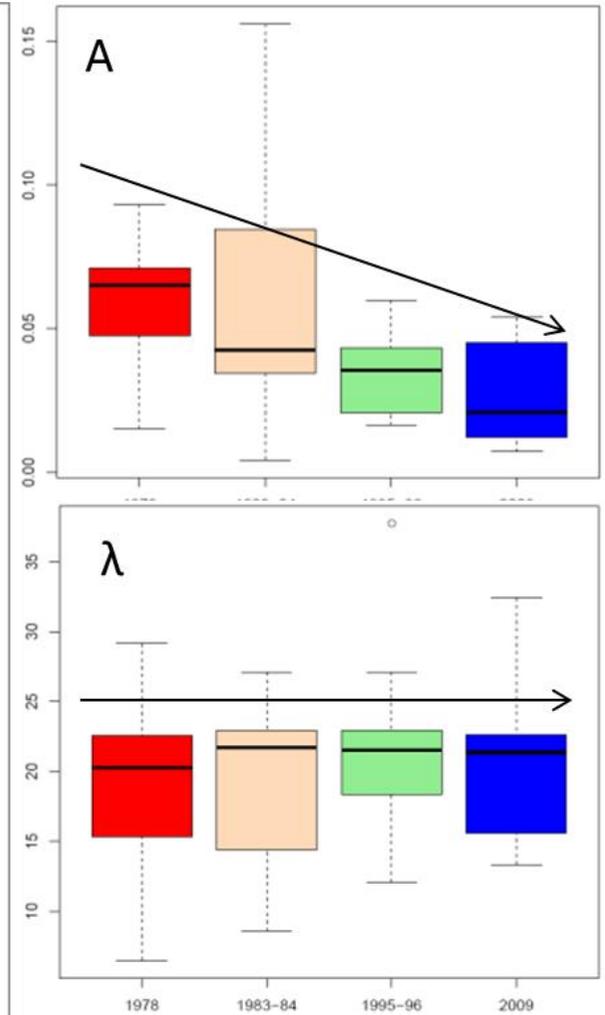
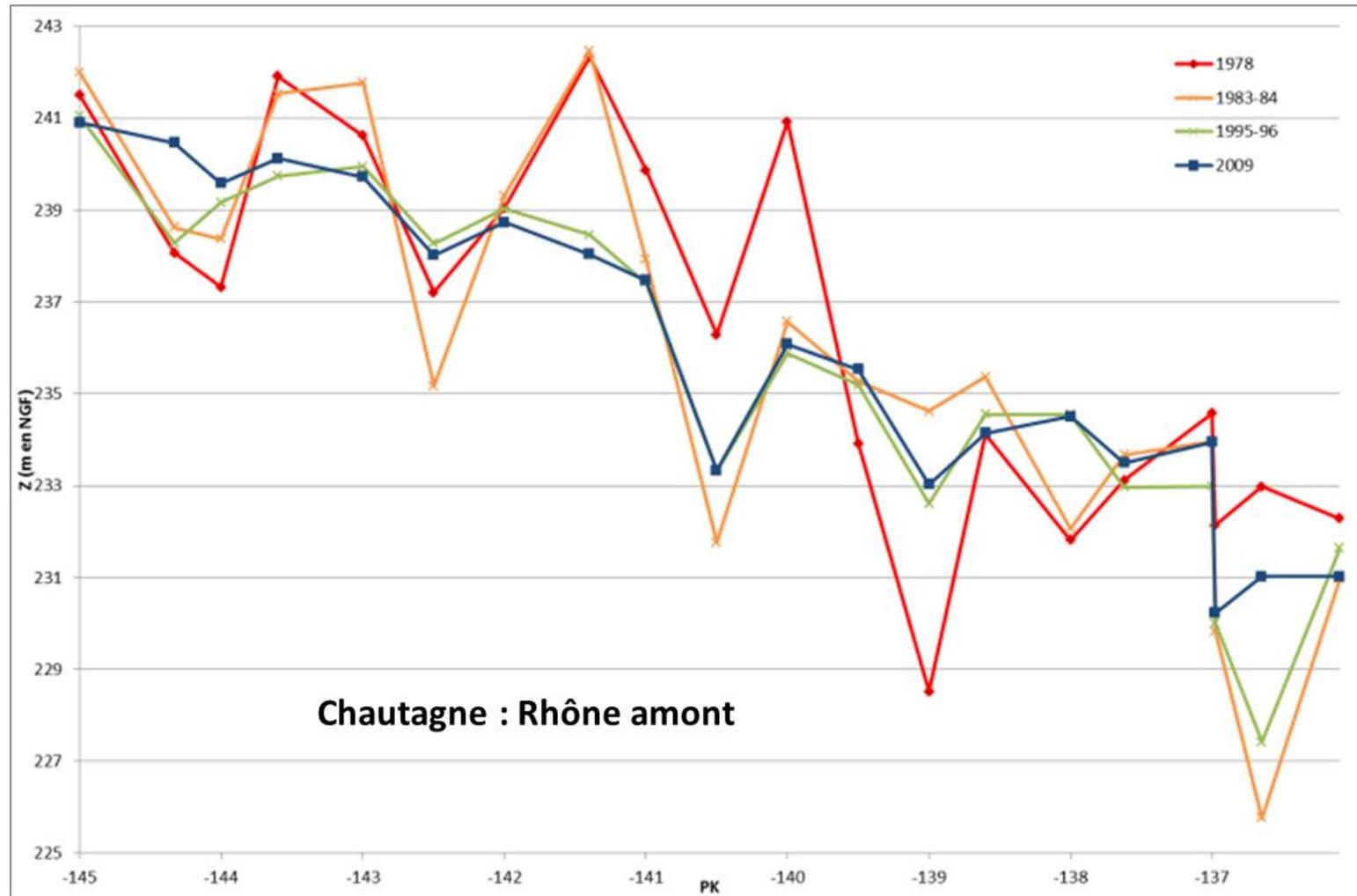


Figure 50 : Evolution diachronique des formes fluviales dans le secteur de Chautagne entre 1978 et 2009

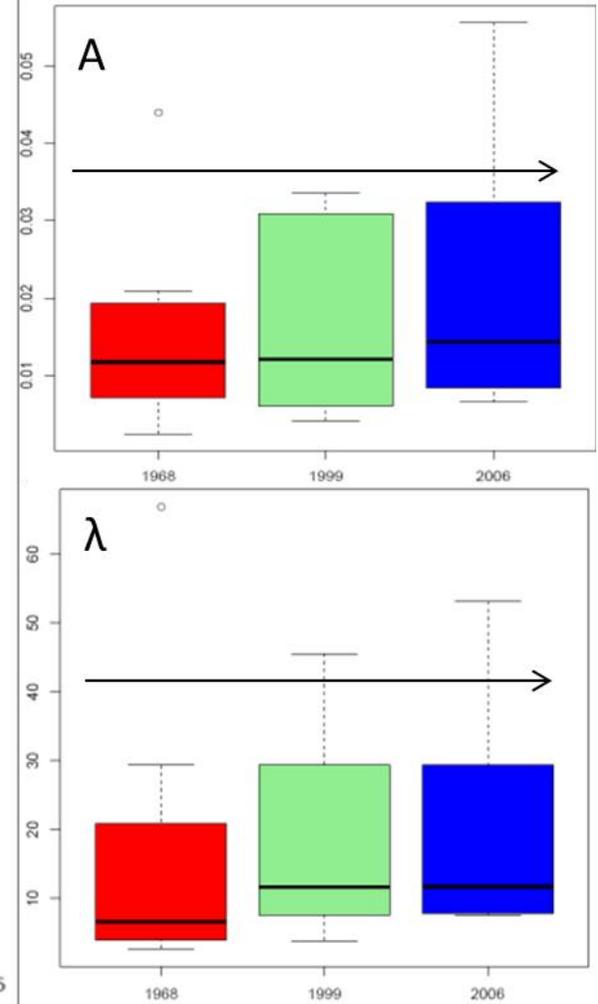
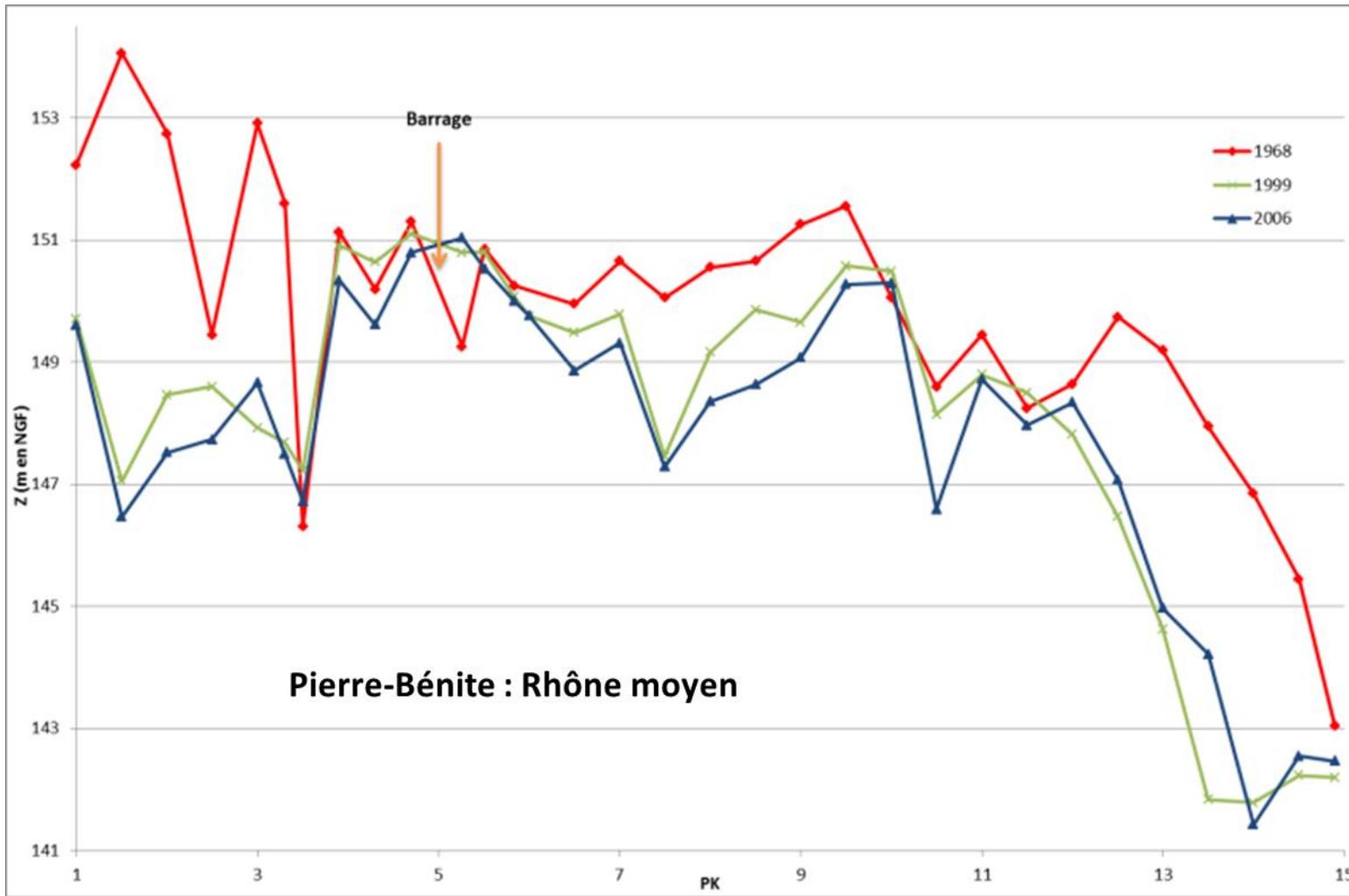


Figure 51 : Evolution diachronique des formes fluviales dans le secteur de Pierre-Bénite, entre 1968 et 2006

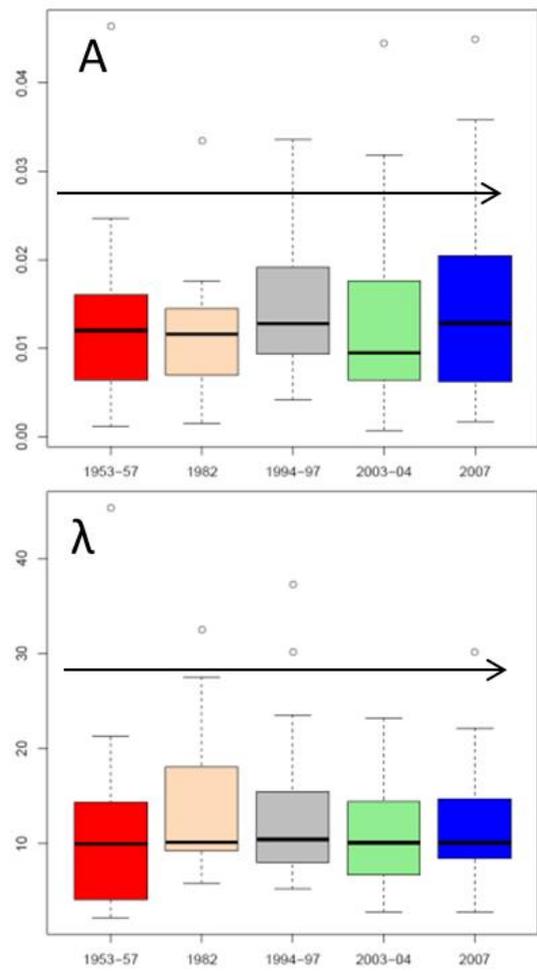
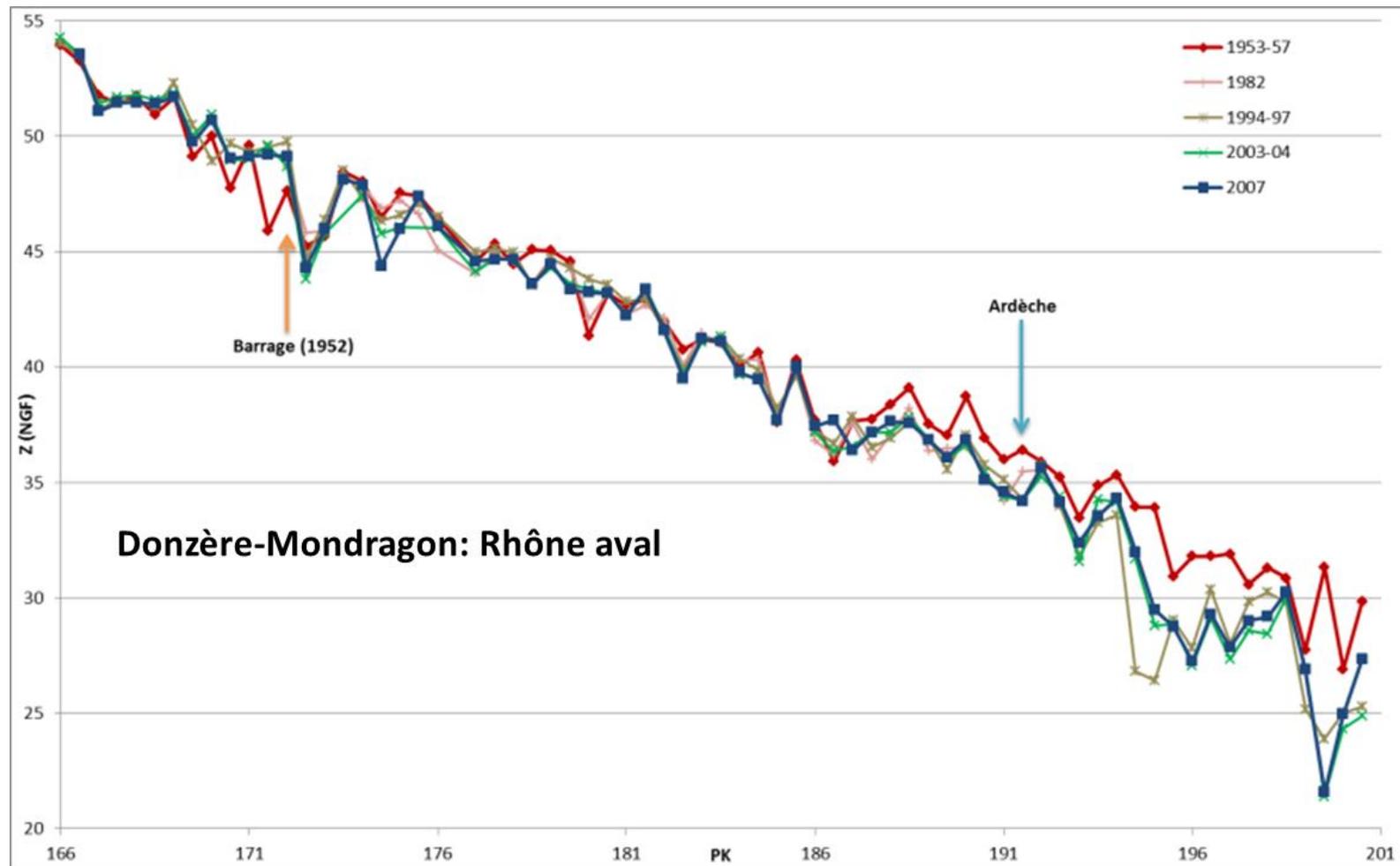


Figure 52 : Evolution diachronique des formes fluviales dans le secteur de Donzère-Mondragon, entre 1953-57 à 2007

4) Evolution générales des formes du lit entre 1897-1907 à 2011 par la méthode des ondelettes

Dans le but d'observer comment les alternances entre les différents faciès, notamment les seuils et les mouilles, s'organisent longitudinalement et temporellement, une étude de la décomposition du signal du profil en long (élévation du thalweg) a été réalisée par une autre méthode : la décomposition en ondelettes. 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. 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. Cette zonation est représentée sur la Figure 53 pour la période récente (a) et la période de construction des casiers Girardon (b). La valeur des coefficients est interprétée de manière comparative entre les tronçons par date uniquement.

Comme nous l'a montré la segmentation en tronçon homogène, 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 53b). Le linéaire se structure longitudinalement en suivant un découpage selon trois grands secteurs : un secteur amont avec des formes de taille intermédiaire (4 m), un secteur médian avec des formes de petite taille (1 à 2 m) et un secteur aval avec des formes de grande taille (6 m). Le début du second tronçon semble coïncider avec la confluence de la Drôme.

Sur le profil actuel (Figure 53a), 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 au début du 20^{ème} siècle. Six secteurs se caractérisent aujourd'hui par des formes fluviales fréquentes et de grande amplitude (secteurs 2, 4, 6, 12 et 14), trois secteurs disposent au contraire de formes moins marquées (7, 9 et 11). On ne retrouve pas exactement la régionalisation obtenue précédemment sur les 55 tronçons par clustering du fait que l'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 le clustering, 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 rendent compte d'une morphologie assez typique de grands fleuves de plaine alors que les secteurs aux formes de moindre amplitude rendent compte de secteurs à fort transport solide présentant des bancs de galets en transit ou au contraire de 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

Conclusion et perspectives

Les travaux dans le cadre de cette action ont permis de regrouper les données disponibles et d'effectuer une analyse longitudinale de la topographie du chenal. Tableau 9 ci-dessous. De nombreux facteurs tendent à expliquer les différentes évolutions altimétriques.

Les incisions ont, dans un premier temps, été engendrées suite à la construction des ouvrages Girardon qui ont augmenté la capacité de transport du lit sur un très long continuum. 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 incisions semblent s'être atténuées du fait du pavage du lit ou de l'affleurement du substratum. Par ailleurs, la mise en mouvement est sans doute rarement atteinte dans les vieux Rhône du fait des dérivations qui maintiennent un débit réservé au sein du bief. Des exhaussements localisés sont aussi relevés en amont de certains barrages, dus principalement à l'accumulation de sédiments relativement fins qui soulignent notamment la discontinuité sédimentaire sur le continuum fluvial et un transport solide grossier réduit sur l'essentiel du linéaire. D'autres exhaussements sont aussi observés ponctuellement au niveau des tronçons encore alimentés par des affluents.

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.

Ces résultats fournissent une base de diagnostic pour aider à :

- localiser les zones ayant une forte tendance au stockage et celles au déstockage depuis la construction des barrages et lors d'événements de crues morphogènes,
- mieux cibler la redynamisation des zones pavées notamment par réinjection des sédiments extraits dans un secteur à fort potentiel de stockage sédimentaire,
- la préservation de la continuité sédimentaire dans les biefs encore alimentés et dynamiques,
- la réalisation des opérations de restauration fondées sur une recharge sédimentaire ou le démantèlement des casiers en vue de la redynamisation des marges en lien avec les questions de qualité des habitats aquatiques (secteurs mobiles ou fixes).

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. La caractérisation granulométrique réalisée dans l'action 2 permettra, dans un futur proche, de calculer le seuil de mise en mouvement par bief à l'aide du modèle hydraulique unidimensionnel MAGE construit par l'IRSTEA de Lyon. Les premiers résultats de cette étude figureront dans le manuscrit de thèse d'Elsa Parrot. Une analyse couvrant l'ensemble du continuum sera alors effectuée dans le cadre de l'OSR4.

	Période 1 = PL-Girardon VS PL-B	Période 2 = PL-B VS PL-Actuel	Période 3 = PL-Av-Crues VS PL-Ap-Crues
Observations	<p>Profils entre Lyon et la mer :</p> <ul style="list-style-type: none"> -incision globale du linéaire qui est inscrite dans le temps et résulte des modifications hydrauliques occasionnées par les ouvrages Girardon - incision la plus forte observée (Figure 34 & Figure 39) qui enregistre les changements les plus drastiques, avec une incision moyenne de -1,33 m et une vitesse d'incision moyenne de 1,77 cm/an -incisions assez marquées entre Lyon et BLV (Figure 26) -stabilité relative du profil par rapport au reste du linéaire entre BEA et Donzère, avec l'incision la plus importante au niveau de la confluence de l'Isère (Figure 27) -variations localisées du profil entre CAD et la mer avec une majorité d'incisions (Figure 28) 	<p>Profils amont de Lyon :</p> <ul style="list-style-type: none"> -pas de changement radical du profil -exhaussement majoritaire à l'amont des B et quelques zones en incision à leur aval -transport sédimentaire encore actif mais perturbé par les B <p>Profils aval de Lyon :</p> <ul style="list-style-type: none"> -incisions moins importantes que la première période mais plus localisées avec des maxima bien marqués, accentués par les extractions-dragages (Figure 35, Figure 39 & Figure 40) -incision moyenne de -0,32 m, soit 1,2 cm/an, en tenant compte des 12.10^6 m^3 de sédiments extraits, soit -0,14 m en moyenne sur tout le linéaire (Figure 39) -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 incisions précédentes et le débit de pointe a été réduit dans les VR -pas d'exhaussement systématique à l'amont des B et d'incision à leur aval (Figure 35) -incision moins importante entre PBN et le RT de VAU (PK 0 et 25), et la plupart des zones incisées correspondent approximativement à des zones d'extraction-dragage de Lyon à BLV (Figure 26) -quelques variations altimétriques localisées entre BEA et DZM avec une majorité de R en exhaussement (Figure 27) -incisions moins marquées de l'aval de DZM à la mer (Figure 28) 	<p>Profils entre Lyon et la mer :</p> <ul style="list-style-type: none"> -incisions-exhaussements locaux dans certains RT et VR (incision majoritaire) et incision plus importante dans le Rhône aval montrant une instabilité du lit et une remobilisation de la charge de fond grâce aux crues morphogènes (Figure 36) -incision beaucoup moins forte que les deux périodes précédentes mais sur un temps plus court (Figure 39, Figure 40 & Figure 41), avec une incision moyenne de -0,2 m soit 3 cm/an. -stockage-déstockage entre l'amont et l'aval des B (Figure 41) -le lit actuel n'est pas figé par les précédents ouvrages. Les évolutions morphologiques sont liées au transfert d'une charge principalement 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 (Figure 42) -incision après les crues dans les zones où la granulométrie est la plus fine (amont direct des B ou aval du grand Rhône) et exhaussements dans R où la granulométrie est plus grossière -le VR de PDR, l'amont de la R de VAL, la R de BLV et l'amont du RT de BEA sont des secteurs ± stables sur l'ensemble de la section avec des granulométries grossières -forte incision à l'aval du B de PBN, de VAU, et entre le B de VAL et le Doux alors que la granulométrie est grossière et le débit de moindre intensité qu'à l'aval : réduction de la largeur du chenal +crues pourrait être à l'origine de cette forte incision. -exhaussement à l'amont des B de VAU, DZM et CAD peut être lié aux apports des affluents à l'amont (respectivement la Saône et la Drôme) (Figure 42) -incision continue importante dans le Rhône aval qui enregistre des débits des crues de 2002-2003 si intenses que le chenal a réagi malgré un diamètre médian des particules important (entre 20 et 70 mm)
Secteurs	<p><i>Depuis le début des aménagements, le linéaire est en incision de -1,81 m en moyenne, soit -1,72 cm/an (Figure 38). Impact plus important des casiers Girardon sur le linéaire par rapport à celui des aménagements CNR qui a été plus localisé. Un transport sédimentaire actuel encore dynamique notamment lors des évènements de crues. Les fosses d'extraction ont déstabilisées le transit sédimentaire par piégeage la charge de fond.</i></p>		

	Période 1 = PL-Girardon VS PL-B	Période 2 = PL-B VS PL-Actuel	Période 3 = PL-Av-Cruets VS PL-Ap-Cruets
Génissiat		-incision amont R (PK -186) (<i>déficit Arve ?</i>), fosse extraction en queue de R (PK -183.5) comblé dans les années 80 (<i>effet R ?</i>), exhaussement en amont du B, aval direct du barrage s'incise après construction puis s'exhausse en 2003 (Figure 19)	
Seyssel		- incision amont R (PK -157.5) (<i>déficit dû au barrage ?</i>), faibles variations au niveau de la R (Figure 19)	
Chautagne		-variations altimétriques (incisions + exhaussements) les plus fortes (Figure 17) -exhaussement à l'aval du Fier depuis 1988 (<i>Fier apporte des fines ?</i>), les formes du VR dans les années 80, plus marquées, se sont lissées depuis (Figure 20)	
Belley		-incisions/exhaussements les + fortes (Figure 17) -fosses d'extraction dans R se sont comblées, exhaussement continu à l'amont du B (Figure 20) (<i>Fier apporte des fines ?</i>) -le VR entre 1970 et 89 est incisé (PK -130.5 à -127), exhausé (PK -127 à -117) et incisé (PK -117 à -114.5) suivie d'une alternance incision-exhaussement depuis 1989, les fosses creusées en 70-89 n'ont pas été comblées (Figure 21)	
Brégnier-Cordon		-le profil n'a que très peu varié (Figure 17) -amont R et amont B se sont exhausés depuis 1987 (Figure 21) -les formes du fond du lit du VR se sont lissées (<i>dynamique fluviale par apport sédimentaire du Guiers ?</i>) (Figure 22)	
Sault-Brénaz		-faibles variations (Figure 17) -les formes du fond du lit du RT à l'amont de la R se sont lissées, évolution du reste de la R quasi nulle (Figure 22)	

	Période 1 = PL-Girardon VS PL-B	Période 2 = PL-B VS PL-Actuel	Période 3 = PL-Av-Crues VS PL-Ap-Crues
Lyon	-incision à l'aval de la confluence de la Saône (Figure 34 & Figure 39)	-incision à l'aval de la Saône à corrélérer avec des extractions-dragages (Figure 35)	-forte incision à l'aval de la Saône (Figure 41)
Pierre Bénite	-fortes incisions sur le secteur notamment à l'aval (Figure 26 & Figure 39)	-incision plus faible (Figure 26) devenant plus importante à l'aval du secteur (PK13) correspondant à des zones d'extractions-dragages et peu de variations à l'amont du B de PBN (Figure 39 & Figure 40)	-incision sur l'ensemble du secteur (PK 0-11.5) notamment dans la R, avec un exhaussement à l'aval du VR (PK 12-14.9) (Figure 29 et Figure 41)
Vaugris	-incisions marquées jusqu'au B (Figure 26) mais diminue à l'aval du secteur (Figure 39)	-forte incision à l'amont du secteur qui diminue dans la R et s'exhausse légèrement à l'amont du B, laissant penser à un stockage sédimentaire (Figure 26, Figure 39 & Figure 40) -formation d'une fosse de 11 m au niveau du B (PK 34-37.5) et d'une zone d'extraction (Figure 26, Figure 39 & Figure 40)	-exhaussement dans certaines parties de la R (<i>stockage des apports amont ?</i>) (PK 20.5-22.5, PK 32.5), et incision dans d'autres (PK 30-32) (Figure 29 & Figure 41) -incision au niveau du B (PK 33.9) et dans le VR (PK 36-38.5) (Figure 29)
Péage de Roussillon	-incisions 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 (<i>migration vers l'amont ?</i>) (Figure 26 & Figure 39)	-léger exhaussement à l'amont du B (PK 49.5-52), laissant penser à un stockage sédimentaire, et peu de variations dans le VR (Figure 26, Figure 39 & Figure 40)	-incision dans la R (PK 40-41, PK 42.5, PK 45.5-47) et dans le VR (PK 54, PK 60-62.9) (Figure 29) -léger exhaussement à l'amont direct du B (Figure 41)
Saint Vallier	-peu de variations à l'amont mais incisions marquées à partir du PK 80 dans le VR (Figure 26 & Figure 39)	-amont du RT (PK 63.5-68.5) très incisé, formation d'une fosse correspondant à une extraction massive, léger exhaussement en amont direct du B et incision dans le VR (Figure 26, Figure 39 & Figure 40)	-incision dans la R (PK 75.5, PK 80) et dans le VR (PK 83.5-86) (Figure 29 & Figure 41)
Bourg-lès Valence	-incisions marquées dans le secteur et dans VR à la confluence de l'Isère (Figure 26, Figure 27 & Figure 39) -incision à l'aval du Doux et autant d'incision que d'exhaussement à l'aval de l'Isère (Figure 34)	-incision dans la R et stabilisation du lit à l'amont du B (Figure 26, Figure 39 & Figure 40) -exhaussement à l'aval du Doux et incision à l'aval de l'Isère forcée par des extractions (Figure 35, Figure 39 & Figure 40) -faibles variations dans VR (Figure 39 & Figure 40)	-incision dans la R à l'amont (PK 89) et à l'aval de la confluence du Doux (PK 91) (Figure 29) -incision continue mais plus faible jusqu'au B (Figure 41) et incision plus importante dans le VR autour de la confluence de l'Isère (PK 101-102) (Figure 30)
Beauchastel	-incision amont du RT (PK 108-112), puis incision moindre mais continue dans VR (Figure 27 & Figure 39)	-R en exhaussement (PK 115-120) (Figure 27, Figure 39 et Figure 40)	-exhaussement dans la R et légère incision à l'amont direct du B (Figure 41)

	Période 1 = PL-Girardon VS PL-B	Période 2 = PL-B VS PL-Actuel	Période 3 = PL-Av-Cruets VS PL-Ap-Cruets
Baix-le Logis Neuf	-incision faible dans R (Figure 27 & Figure 39) mais plus forte à l'aval de l'Eyrieux et de la Drôme (Figure 34 & Figure 39)	-incisions dans le RT à l'aval proche de l'Eyrieux (PK 127-128) et le VR (PK 136,5 à 139,5) proches lieux d'extractions (Figure 27) -exhaussement plus à l'aval de l'Eyrieux et de la Drôme (Figure 35) -exhaussement de la R (PK 129.5-131) (<i>apport de la Drôme ?</i>) (Figure 27, Figure 39 & Figure 40)	-incision dans le RT à l'aval de la confluence de l'Eyrieux (PK 127.5) et à l'amont du B (PK 134.5) (Figure 30)
Montélimar	-incision très peu marquée mais continue dans R (Figure 27 & Figure 39)	-Incision à l'aval du VR (PK 161.5-163.5) coïncidant avec extractions et exhaussement important dans la R (PK 145.5-153) (<i>apport de la Drôme ?</i>) (Figure 27, Figure 39 & Figure 40)	-incision dans la R (PK 144.5-146) continue mais plus faible jusqu'au B (Figure 30 & Figure 41) -incision dans le VR à l'aval du B (PK 152.5-154) et plus en aval (PK 159-159.5, PK 161-165.5) (Figure 30)
Donzère-Mondragon	-incision moindre mais continue à l'amont du RT (Figure 27) -peu de variations à l'amont de l'Ardèche et exhaussement sur quelques points à l'aval (<i>apport sédimentaire ?</i>) (Figure 34 & Figure 39)	-exhaussement à l'amont du B (Figure 39 & Figure 40) (<i>apport de la Drôme ?</i>) -incisions dans le VR où des dragages-extractions ont eu lieu (PK 172.5-190) (Figure 27) et à partir de la confluence de l'Ardèche (PK190) à corréliser aussi avec des extractions-dragages (Figure 28, Figure 35, Figure 39 & Figure 40)	-incision dans le RT (PK 168.5-169.5) et exhaussement à l'amont direct du B (PK 170) (Figure 30, Figure 31 & Figure 41) -incisions ponctuelles dans le VR jusqu'à la confluence de l'Ardèche (PK 174-191.5) et à l'aval (PK 199.5) et exhaussement ponctuel quatre kilomètres à l'aval de la confluence de l'Ardèche (PK 195-195.5) (<i>apports sédimentaires grossiers des affluents ?</i>) (Figure 30, Figure 31 & Figure 41)
Caderousse	-incision dans le RT vers l'aval de la confluence du Lez (PK200-210) (Figure 28, Figure 34 & Figure 39)	-incision dans RT, proche des zones de dragages-extractions, jusqu'à l'amont de la confluence du Lez (PK 203) (Figure 28) -exhaussement entre la confluence du Lez et l'amont du B (Figure 35, Figure 39 & Figure 40)	-incision dans le RT à l'amont de la confluence du Lez (PK 202.5-203) et à l'amont direct du B (PK 210-213), avec un exhaussement à l'aval du Lez (PK 204-205) (Figure 31 & Figure 41)
Avignon	- peu de variations en amont du secteur avec autant de points en incision qu'en exhaussement à l'aval de l'Aigue (Figure 34 & Figure 39) -incision à l'amont du VR et au niveau de la confluence de l'Ouvèze (PK 230-236.5) (Figure 28) -exhaussement plus à l'aval de l'Ouvèze (<i>apport de charge solide ?</i>) (Figure 34 & Figure 39)	-exhaussement quelques kilomètres à l'amont du B suivi de très faibles variations (Figure 39 & Figure 40) -Incision au niveau du B (PK 230), proche des zones de dragages-extractions (Figure 28) -exhaussement à l'aval de l'Aigue et de l'Ouvèze (Figure 35)	-exhaussement dans le VR à l'aval de la confluence de l'Ouvèze (PK 235-237) (Figure 31) et à l'amont de la restitution (Figure 41)

	Période 1 = PL-Girardon VS PL-B	Période 2 = PL-B VS PL-Actuel	Période 3 = PL-Av-Crués VS PL-Ap-Crués
Beaucaire	<p>-exhaussement sur quelques points à l'aval de la Durance et du Gard pouvant (<i>apport de charge solide ?</i>) (Figure 34)</p> <p>-incision à partir de la restitution (Figure 28 & Figure 39)</p>	<p>-exhaussement quelques kilomètres à l'amont du B puis peu de variations (Figure 39 et Figure 40)</p> <p>-incision à l'aval de la Durance à corrélérer avec des extractions-dragages (Figure 35)</p> <p>-Incision entre la restitution et la diffluence (PK 270 à 317), proche des zones de dragages-extractions (Figure 28)</p> <p>-exhaussement à l'aval du Gard (<i>apports de graviers ?</i>) (Figure 35, Figure 39 & Figure 40)</p>	<p>-incision dans la R (PK 260) suivi d'un exhaussement à l'amont direct du B (PK 261 à 262)</p> <p>-incision à l'aval direct du B et de la confluence du Gard (PK 263) avec néanmoins des exhaussements locaux (<i>apports sédimentaires du Gard?</i>) (Figure 31 & Figure 41)</p>
Grand Rhône	<p>-incision dans tout le secteur exceptée à la diffluence qui montre un exhaussement (PK 277-280) (Figure 28, Figure 34 & Figure 39)</p>	<p>-incision, sauf au niveau de la diffluence qui est en exhaussement (Figure 34), découpée en trois zones séparées par le palier d'Arles et le seuil de Terrin, et plus forte à amont du palier puis à l'aval du seuil (Figure 39 & Figure 40)</p>	<p>-incision dans le RT (PK 271-277.5) à l'aval de la diffluence (PK 280) et sur le littoral (PK 287, PK 307-316) (Figure 31) sauf à la diffluence qui s'exhausse (Figure 34)</p>

Tableau 9 : Synthèse des observations de l'évolution du profil en long sur la période 1 (Girardon-Barrage), la période 2 (Barrage-Récent) et la période 3 (avant et après les crues) - RT=Rhône total, R=Retenue, B=barrage, VR=vieux 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)

Références bibliographiques

- ALBER A., PIEGAY H., 2010. Spatial aggregation procedure for characterizing physical structure of fluvial networks: application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*.
- ALLEE P., GIERT G., MUSSOT R., 1981. Aménagement des rivières à fond mobile : évolution de sections fluviales aménagées. Rapport du Min. Agri. : 86p.
- ALLEN K.R., 1951. The Horokiwi stream. Fisheries Bulletin, Rep. No. 10, New Zealand Marine Department, Wellington, 231 p.
- AMOROS C., PETTS G.E., 1993. Hydrosystèmes fluviaux, Masson, Collection d'Ecologie n° 24.
- AUBRY P., PIEGAY H., 2001. Pratique de l'analyse de l'autocorrélation spatiale en géomorphologie fluviale : définitions opératoires et tests. *Géographie Physique et Quaternaire* 55 (2), p. 115-133.
- 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) : préférences physiques et variations annuelles (1976-1980). *Acta OEcologica*, 3, 241-256.
- 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
- BRAVARD J.P., 1986. Le Rhône du Léman à Lyon. Lyon, Ed. La Manufacture, Mémoire de doctorat.
- BROOKES A., GREGORY K.J., DAWSON F.H., 1983. An assessment of river channelization in England and Wales. *The Science of the Total Environment*, 27: 97-112.
- BROOKES A., 1985. River channelization: traditional engineering methods, physical consequences and alternative practices. *Prog. in Phys. geog.*, 9 : 44-73.
- BROOKES A., 1986. Response of aquatic vegetation to sedimentation downstream from channelization works in England and Wales. *Biological conservation*, 38: 351-367.
- BROOKES A., 1988. Channelization rivers. Perspectives for environmental management, Wiley interscience (ed.): 326p.
- 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.
- 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.
- ELSER A.A., 1968. Fish populations of a trout stream in relation to major habitat zones and channel alterations. *Transactions of the American Fisheries Society*, 98: 253-262.
- EMERSON J.W., 1971. Channelization, a case study. *Science*, 173: 325-326.

- 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.
- 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.
- 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.
- GRISWOLD B.L., EDWARDS C.J., WOODS L.C. & WEBER E., 1978. Some effects of stream channelization on fish populations, macroinvertebrates and fishing in Ohio and Indiana. Office of Biological Services, Fish and Wildlife Service, US Department of the Interior, Washington DC.
- 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.
- HEY R.D., 1986. River mechanics. *Jiwes*, 40: 139-158.
- HUBERT P., 2000. The segmentation procedure as a tool for discrete modelling of hydrometeorological regimes. *Stochast. Environ. Res. Risk Assess.* 13, 297-304.
- HUGGINS D.G., MOSS R.E., 1975. Fish population structure in altered and unaltered areas of a small Kansas stream. *Transactions of the Kansas Academy of science*, 77: 18-30.
- 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.
- LASER K.D., RAUSCH C.G., OLSON C.L., CARLEWDER K.D., 1969. Fish distribution in the skunk river below Ames, Iowa. *Proc. of the Iowa Acad. Sci* , 76 : 196-204.
- 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.
- LUND J.A., 1976. Evaluation of stream channelization and mitigation on the fishery resources of the St. Regis River, Montana. Office of Biological Services Fish and Wildlife Service, U.S. Dep. of the Interior, Washington DC.
- MADEJ M.A., OZAKI V., 1994. Pool development and sediment loads, Redwood Creek, California. Abstract. *Transactions of the American Geophysical Union*. Vol. 75. No. 44. p. 302-303.
- 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., 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.
- MOIR H.J., PASTERNAK 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
- MONTGOMERY D.R., BUFFINGTON J.M., 1997. Channel reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* 109. 596-611.
- 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.
- NEWBURY R.W., GABOURY M.N., 1993. Stream analysis and fish habitat design. Newbury Hydraulics Ltd., Manitoba Natural Resources, 256 p.
- O'NEIL M.P., ABRAHAMS A.D., 1984. Objective identification of pools and riffles. *Water Resources Research*, 20, 921-926.
- LEOPOLD L.B., MARCHAND M.O., 1968. On the quantitative inventory of the riverscape. *Water Resources Research* 4 (4), 709-717.
- 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.
- PORTER M., 1978. Effects of stream channelization on the macrobenthic and fish communities of the Little Auglaise River, Ohio. Ph. D. Thesis (SFA, 32-3), Ohio State University: 190p.
- RICHARDS K.S., 1976a. Channel width and the pool-riffle sequence. *Bulletin of the Geological Society of America* 87, 877-896.
- RICHARDS K.S., 1976b. The morphology of pool-riffle sequences. *Earth Surface Processes and Landforms* 1, 87-95.
- RITTER D.F., 1979. The effects of channelization on a high energy river. *Environmental Geology*, 3: 29-38.
- SCHMAL R.N., SANDERS D.F., 1978. Effects of stream channelization on aquatic macroinvertebrates, Buena Vista Marsh, Portage County Wisconsin. Office of Biological Services, Fish and Wildlife Service U.S. Dep. of the Interior Washington DC.
- SCHUMM S.A., 1977. The fluvial system. Water Resources Publications, New-York: 338p.
- SIMPSON P.W., NEWMAN J.R., KEIRN M.A., MATTER R.M., GUTHRIE P.A., 1982. Manual of stream alteration impacts on fish and wildlife. Office of Biological Services, Fish and Wildlife Service, US Department of the Interior, Washington DC.
- EGR-SOGREAH, 2000a5. 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, 57p.
- EGR-SOGREAH, 2000a6. 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, 57p.
- TARPLEE W.H., LOUDER D.E., WEBER A.J., 1971. Evaluation of effects of channelization on the fish population in

- North-Carolina's coastal plain streams. North Carolina Wildlife Resources Commission.
- 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.
- WASSON J.G., PIALOT J.P., SOUCHON Y., ZYBERBLATT M., DA COSTA G., 1984. Approche quantitative de l'impact écologique des aménagements des cours d'eau. In : Symp. CECPI-FAO, Aarhus Dks, Cemagref, Div. Qual. Eaux Pêche et Piscicult. Lyon : 41p.
- WASSON J.G., MALAVOI J.R., MARIDET L., SOUCHON Y., PAULIN L., 1995. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Cemagref éditions, coll. Etudes, série Gestion des Milieux Aquatiques n°14, 158 p.
- WHELAN J.B., MAUGHAM O.E., SHAMAN L.A., 1980. Biological and economic impact of stream alteration on the Virginia piedmont. In: (eds), Summaries of riparian and stream alteration studies. Eastern Energy and Land Use Team.
- 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.
- WOLMAN M.G., 1955. The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania. USGS Professional Paper, 271.
- YANG C.T., 1971. Formation of riffles and pools. Water Resources Research, 7, 1567

Table des illustrations

FIGURE 1 : CONFIGURATION TYPE DES AMENAGEMENTS PRESENTS SUR LE RHONE (A GAUCHE : ORTHOPHOTOGRAPHIE, IGN, 2006) .	5
FIGURE 2 : LA GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU RHONE, (ARNAUD-FASSETTA, 1998).....	6
FIGURE 3 : LE BASSIN DU RHONE, SON RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET SON OROGRAPHIE. LOCALISATION DES SECTEURS DU FLEUVE RHONE : GENISSIAT (GEN), SEYSSSEL (SEY), CHAUTAGNE (CHA), BELLEY (BEL), BREGNIER-CORDON (BRC), SAULT-BRENAZ (SBR), L'AIN (AIN), 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), MONTELMAR (MON), DONZERE-MONDRAGON (DZM), CADEROUSSE (CAD), AVIGNON (AVI), BEAUCAIRE (BEC), GRAND RHONE (GRO), PETIT RHONE (PRO) ET LITTORAL (LIT). (REALISEE PAR G. FANTINO).....	7
FIGURE 4 : EMBOITEMENT SCHEMATISE DE L'HYDROSYSTEME FLUVIAL DANS LE SYSTEME FLUVIAL (D'APRES AMOROS ET PETTS, 1993)	8
FIGURE 5 : HABITAT ET MORPHOLOGIE : DES ECHELLES EMBOITEES (WASSON ET AL. 1995)	11
FIGURE 6 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE EN PLAN DES ALTERNANCES DE FACIES TYPIQUE DE SUBSTRAT ALLUVIONNAIRE A FAIBLE DEBIT : (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.....	14
FIGURE 7 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROFIL LONGITUDINAL DES CINQ ALTERNANCES DE FACIES TYPE : (A) CASCADES ; (B) PLATS-MOUILLES ; (C) PLAT ; (D) SEUILS-MOUILLES ; (E) DUNES-RIDES	14
FIGURE 8 : DIAGRAMMES DE RELATIONS-SEQUENCE REALISES SUR DEUX COURS D'EAU, LA FRENCH PETE CREEK (A) ET LA LOOKOUT CREEK (B). LES CHIFFRES INDIQUES SONT LES DIFFERENCES ENTRE LES PROBABILITES DE TRANSITION OBSERVEES ET ALEATOIRES. LES FLECHES EN GRAS INDIQUENT LES PROBABILITES DE TRANSITION > 0,05 (GRANT ET AL., 1990).....	16
FIGURE 9 : EFFETS PRIMAIRES ET SECONDAIRES DES AMENAGEMENTS EN RIVIERE, D'APRES BROOKES (1988) CITE PAR WASSON ET AL. (1995)	18
FIGURE 10 : COMPARAISON ENTRE LA MORPHOLOGIE ET LES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES SUR UN SEGMENT NATUREL ET CHENALISE. D'APRES CORNING (1975), DANS WASSON ET AL. (1995).	20
FIGURE 11 : EVOLUTION DES PROFILS EN LONG D'UN TRONÇON ENDIGUE ET COURT-CIRCUITE DU RHIN A L'AVAL DU BARRAGE DE KEMBS DE 1880 A 2009, SUITE AUX DIFFERENTES PHASES D'AMENAGEMENTS (ARNAUD, 2012).....	21
FIGURE 12 : EXEMPLES DE CARTES BATHYMETRIQUES DU CHENAL, ENTRE LES BK 76 ET 93, ET DATANT DE 1897	24
FIGURE 13 : UN EXEMPLE DE PROFIL EN TRAVERS DU CHENAL DU RHONE A PARTIR DUQUEL LE THALWEG A ETE EXTRAIT	25
FIGURE 14 : 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).	28
FIGURE 15 : PRETRAITEMENT DES PARAMETRES PHYSIQUES POUR L'ANALYSE STATISTIQUE.	29
FIGURE 16 : 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 AMONT DE LYON, REPRESENTATION DES SECTEURS DE GENISSIAT (GEN), SEYSSSEL (SEY), CHAUTAGNE (CHA), BELLEY (BEL), BREGNIER-CORDON (BRC), SAULT-BRENAZ (SBR) ET L'AIN (AIN).	33
FIGURE 17 : PROFILS EN LONG ENTRE LE PK-190 ET -90 DE LA PERIODE DE LA MISE EN SERVICE DES AMENAGEMENTS CNR (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT)	34
FIGURE 18 : PROFILS EN LONG ENTRE LE PK-95 ET 0 DE LA PERIODE DE LA MISE EN SERVICE DES AMENAGEMENTS CNR (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT)	35
FIGURE 19 : PROFILS EN LONG DEPUIS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES DANS LES SECTEURS DE GENISSIAT ET SEYSSSEL (EXTRAITS BD BATHY CNR)	36
FIGURE 20 : PROFILS EN LONG DEPUIS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES DANS LES SECTEURS DE SEYSSSEL, CHAUTAGNE ET BELLEY (EXTRAITS BD BATHY CNR).....	37
FIGURE 21 : PROFILS EN LONG DEPUIS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES DANS LES SECTEURS DE BELLEY ET BREGNIER-CORDON (EXTRAITS BD BATHY CNR)	38
FIGURE 22 : PROFILS EN LONG DEPUIS LA CONSTRUCTION DES BARRAGES DANS LES SECTEURS DE BREGNIER-CORDON ET SAULT- BRENAZ (EXTRAITS BD BATHY CNR)	39

FIGURE 23 : 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), MONTELMAR (MON), DONZERE-MONDRAGON (DZM), CADEROUSSE (CAD), AVIGNON (AVI), BEAUCAIRE (BEC) ET GRAND RHONE (GRO).....	41
FIGURE 24 : EVOLUTION NETTE DES PROFILS EN LONG DE 1957 A 2010 (AVAL DE LYON ENTRE LES PK 126 ET 204), LOCALISATION DES AFFLUENTS (DROME, ARDECHE), DES BARRAGES (POUZIN, ROCHEMAURE, DONZERE) ET DES AFFLEUREMENTS ROCHEUX (TRIANGLES). D'APRES TROUSSIER (2012).	42
FIGURE 25 : PROFILS EN LONG DE LA PERIODE DE CONSTRUCTION DES CASIERS GIRARDON (BLEU), DE LA MISE EN SERVICE DES AMENAGEMENTS CNR (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT).....	47
FIGURE 26 : PROFILS EN LONG ENTRE LE PK0 ET 100 DE LA PERIODE DE CONSTRUCTION DES CASIERS GIRARDON (BLEU), DE LA MISE EN SERVICE DES AMENAGEMENTS CNR (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT).....	48
FIGURE 27 : PROFILS EN LONG ENTRE LE PK100 ET 190 DE LA PERIODE DE CONSTRUCTION DES CASIERS GIRARDON (BLEU), DE LA MISE EN SERVICE DES AMENAGEMENTS CNR (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT)	49
FIGURE 28 : PROFILS EN LONG ENTRE LE PK190 ET 320 DE LA PERIODE DE CONSTRUCTION DES CASIERS GIRARDON (BLEU), DE LA MISE EN SERVICE DES AMENAGEMENTS CNR (ROUGE) ET DE LA PERIODE RECENTE (VERT)	50
FIGURE 29 : PROFILS EN LONG ENTRE LE PK 0 ET 100 AVANT LES CRUES DE 2001 A 2003 (1996/2000 EN POINTILLES ROUGE) ET APRES LES CRUES (2004/2007 EN BLEU).....	53
FIGURE 30 : PROFILS EN LONG ENTRE LE PK 100 ET 190 AVANT LES CRUES DE 2001 A 2003 (1996/2000 EN POINTILLES ROUGE) ET APRES LES CRUES (2004/2007 EN BLEU).....	54
FIGURE 31 : PROFILS EN LONG ENTRE LE PK 190 ET 320 AVANT LES CRUES DE 2001 A 2003 (1996/2000 EN POINTILLES ROUGE) ET APRES LES CRUES (2004/2007 EN BLEU).....	55
FIGURE 32 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE ENTRE TOUS LES POINTS DE LYON A LA MER, ENTRE LE PROFIL DE 1897-1907/08 ET LE PROFIL RECENT (PERIODE 0).....	58
FIGURE 33 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE REALISES ENTRE LES PROFILS EN LONG CORRESPONDANT A CHAQUE PERIODE D'ETUDE (AVANT/APRES AMENAGEMENTS-CRUES MORPHOGENES).....	59
FIGURE 34 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE ENTRE TOUS LES POINTS DE LYON A LA MER POUR LA PERIODE 1 (AVANT LA CONSTRUCTION DES AMENAGEMENTS CNR)	60
FIGURE 35 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE ENTRE TOUS LES POINTS DE LYON A LA MER POUR LA PERIODE 2 (APRES LA CONSTRUCTION DES AMENAGEMENTS CNR)	61
FIGURE 36 : DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE ENTRE TOUS LES POINTS DE LYON A LA MER POUR LA PERIODE 3 (AVANT ET APRES LES CRUES DE 2001 A 2003).....	62
FIGURE 37 : COMPARAISON DES TENDANCES GLOBALES DES DIFFERENTIELS ALTIMETRIQUES DE LYON A LA MER POUR LA PERIODE 1 (FIGURE 34), LA PERIODE 2 (FIGURE 35) ET LA PERIODE 3 (FIGURE 36).....	63
FIGURE 38 : 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 [PB=PIERRE-BENITE, VS=VAUGRIS, PR=PEAGE DE ROUSSILLON, SV=SAINT VALLIER, BV=BOURG-LES VALENCE, BE=BEAUCHASTEL, BN=BAIX-LE LOGIS NEUF, MO=MONTELMAR, DM=DONZERE-MONDRAGON, CA=CADEROUSSE, AV=AVIGNON, BR=BEAUCAIRE, GR=GRAND RHONE – SPB=SAINT PIERRE DE BŒUF, AR=ARRAS, RG=ROCHE DE GLUN , CH=CHARMES, PZ=POUZIN, RM=ROCHEMAURE, DZ=DONZERE, ST=SAUVETERRE, VA=VALLABREGUES]	67
FIGURE 39 : 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].	68
FIGURE 40 : 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].	69

FIGURE 41 : CUMUL DES EVOLUTIONS VERTICALES DU FOND DU LIT OBSERVEES TOUS LES 500 M SUR LE RHONE DE LYON A LA MER ENTRE LES DEUX PERIODES [1996/2000 & 2004/2007] COUVRANT LES EFFETS DES CRUES DE 2001-2003.....	70
FIGURE 42 : CUMUL DU DIFFERENTIEL ALTIMETRIQUE AVANT/APRES LES CRUES DE 2001 A 2003 COMPARE A : LA TAILLE MEDIANE (D50 EN MM) DES SEDIMENTS PRELEVES DANS LE FOND DU LIT (SUR LES POINTS HAUTS DU THALWEG) – LA LARGEUR DU CHENAL (M) – LES PERIODES DE RETOUR AUX STATIONS DE TERNAY (PK15), VALENCE (PK110), VIVIERS (PK166) ET BEAUCAIRE (PK270) POUR LES CRUES DE 2001, 2002 ET 2003	72
FIGURE 43 : HISTOGRAMME DES FREQUENCES DES CLASSES DE HAUTEUR DE SEUIL (A) ET DE PROFONDEUR DE MOUILLE (B) ET LA FREQUENCE CUMULEE ASSOCIEE. LES CLASSES CORRESPONDENT AUX HAUTEURS DES FORMES EN METRE.....	74
FIGURE 44 : HAUTEURS MOYENNES DES FORMES TYPE SEUIL-MOUILLE PAR TRONÇON HOMOGENE. SEUIL (HAUTEUR MOYENNE TOTALE = 1,64 – MINIMUM = 0,014 – MAXIMUM = 17,7) – MOUILLE (HAUTEUR MOYENNE TOTALE = 2,06 – MINIMUM = 0,008 – MAXIMUM = 27). POUR 76% DES TRONÇONS : HAUTEUR DES MOUILLES > HAUTEUR DES SEUILS.	75
FIGURE 45 : PROFIL EN LONG DU RHONE SEGMENTE EN 55 TRONÇONS HOMOGENE ET MISE EN EVIDENCE DE SA STRUCTURE ET DES DIFFERENTES CONTRAINTES NATURELLES ET ANTHROPIQUES.....	78
FIGURE 46 : ANALYSES STATISTIQUES DE PETTITT (1979, EN ROUGE) ET HUBERT (2000, EN BLEU) SUR LA PENTE LOCALE DU PROFIL EN LONG	79
FIGURE 47 : RESULTAT D'UNE CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE APPLIQUEE SUR LES COMPOSANTES D'UNE ACP REGROUPANT LES TRONÇONS HOMOGENES EN TROIS GROUPES.....	80
FIGURE 48 : 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).....	81
FIGURE 49 : CARACTERISTIQUES DES CLUSTERS EN FONCTION DE LA TAILLE DES FORMES FLUVIALES ET DE LEUR VARIABILITE. CLUSTER 1 (HAUTEUR MEDIANE = 0.02, LARGEUR MEDIANE = 9) – CLUSTER 2 (HAUTEUR MEDIANE = 0.01, LARGEUR MEDIANE = 7.5) – CLUSTER 3 (HAUTEUR MEDIANE = 0.035, LARGEUR MEDIANE = 17).....	82
FIGURE 50 : EVOLUTION DIACHRONIQUE DES FORMES FLUVIALES DANS LE SECTEUR DE CHAUTAGNE ENTRE 1978 ET 2009	84
FIGURE 51 : EVOLUTION DIACHRONIQUE DES FORMES FLUVIALES DANS LE SECTEUR DE PIERRE-BENITE, ENTRE 1968 ET 2006.....	85
FIGURE 52 : EVOLUTION DIACHRONIQUE DES FORMES FLUVIALES DANS LE SECTEUR DE DONZERE-MONDRAGON, ENTRE 1953-57 A 2007.....	86
FIGURE 53 : 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 ABCISSES LA DISTANCE AMONT – AVAL (LE 0 ETANT A LYON). LES VALEURS INDIQUEES CORRESPONDENT AUX ECARTS-TYPES MOYENS DES COEFFICIENTS D'ONDETTES SOMMES POUR LES ECHELLES 600M ET 1200M. A) ETAT ACTUEL, B) ETAT EN 1897-1907 (DISPONIBLE UNIQUEMENT A L'AVANT DE LYON)	88

Table des tableaux

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DE CHAQUE TYPE DE CHENAL (ENSEMBLE DE FACIES MORPHOLOGIQUES). MONTGOMERY ET BUFFINGTON (1997).....	13
TABLEAU 2 : PENTES MOYENNES DU LIT DE CHAQUE FACIES MORPHOLOGIQUES, DETERMINEES PAR GRANT ET AL. (1990) SUR DEUX COURS D'EAU EN OREGON	15
TABLEAU 3 : BILAN DES DONNEES BATHYMETRIQUES DISPONIBLES A LA CNR DEPUIS LES DERNIERS AMENAGEMENTS (UN PROFIL EN TRAVERS TOUS LES 500 M).....	23
TABLEAU 4 : BILAN DES JEUX DE DONNEES BATHYMETRIQUES DISPONIBLES SUR LE RHONE.....	26
TABLEAU 5 : RECENSEMENT DES CINQ PROFILS EN LONG REGROUPES PAR DATE-CLE AFIN D'ETUDIER LES EVOLUTIONS VERTICALES EN EFFECTUANT UN DIFFERENTIEL ENTRE CES PROFILS PAR GRANDES PERIODES : EVOLUTION GLOBALE DU CHENAL ENTRE 1897 ET AUJOURD'HUI [2007-2010]-[1897-1907], CONSEQUENCE DE L'IMPLANTATION DES CASIERS GIRARDON [1953-1999]-[1987-1907], DES BARRAGES [2007-2010]-[1953-1999], ET MESURE DE LA CAPACITE DE REPOSE DU CHENAL D'AUJOURD'HUI FACE A DES CRUES DECENNALES A CENTENNALES [2004-2007]-[1996-2000].	43

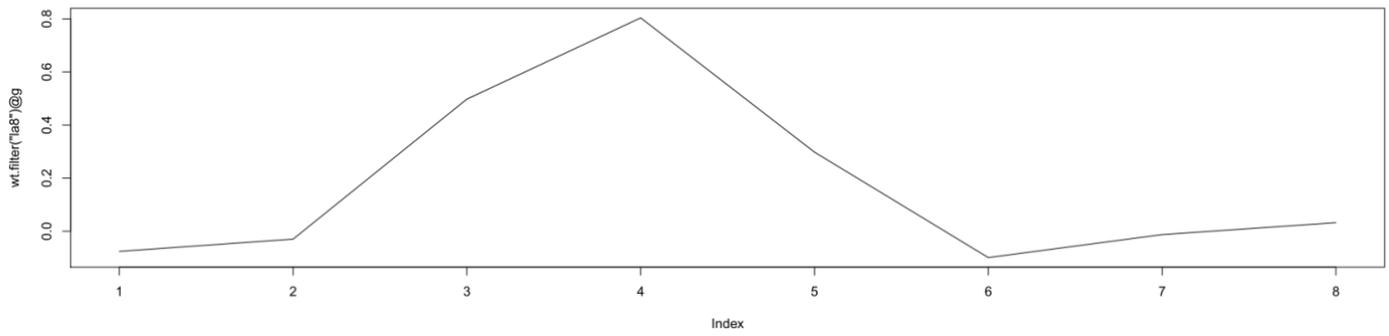
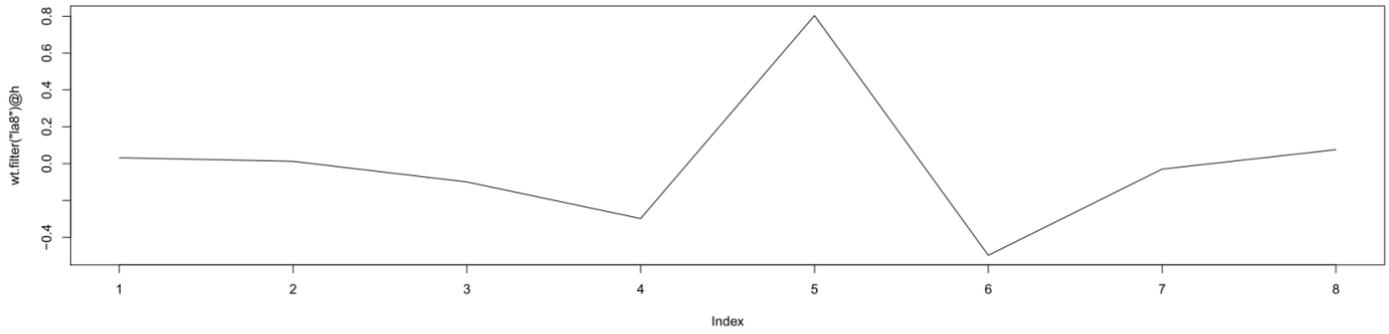
TABLEAU 6 : DEBIT MAXIMAL INSTANTANE ET PERIODE DE RETOUR POUR LES CRUES DE 2001 A 2003 AUX DIFFERENTES STATIONS HYDROLOGIQUE ENTRE LYON ET LA MER (TERNAY AU PK15,2, VALENCE AU PK109,7, VIVIERS AU PK166,5, BEUCAIRE AU PK269,6)	44
TABLEAU 7 : VALEURS MINIMALES, MAXIMALES ET MOYENNES DES PARAMETRES DE FORMES (AMPLITUDE, LONGUEUR D'ONDE ET HAUTEUR DES SEUILS ET PROFONDEUR DES MOUILLES) SUR L'ENSEMBLE DU LINEAIRE. DONNEES EN METRE.	73
TABLEAU 8 : SYNTHESE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES FORMES PAR TRONÇON HOMOGENE	76
TABLEAU 9 : SYNTHESE DES OBSERVATIONS DE L'EVOLUTION DU PROFIL EN LONG SUR LA PERIODE 1 (GIRARDON-BARRAGE), LA PERIODE 2 (BARRAGE-RECENT) ET LA PERIODE 3 (AVANT ET APRES LES CRUES) - RT=RHONE TOTAL, R=RETENUE, B=BARRAGE, VR=VIEUX RHONE - GENISSIAT (GEN), SEYSEL (SEY), CHAUTAGNE (CHA), BELLEY (BEL), BREGNIER-CORDON (BRC), SAULT-BRENAZ (SBR), L'AIN (AIN), 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), MONTELMAR (MON), DONZERE-MONDRAGON (DZM), CADEROUSSE (CAD), AVIGNON (AVI), BEUCAIRE (BEC), GRAND RHONE (GRO)	94

Table des annexes

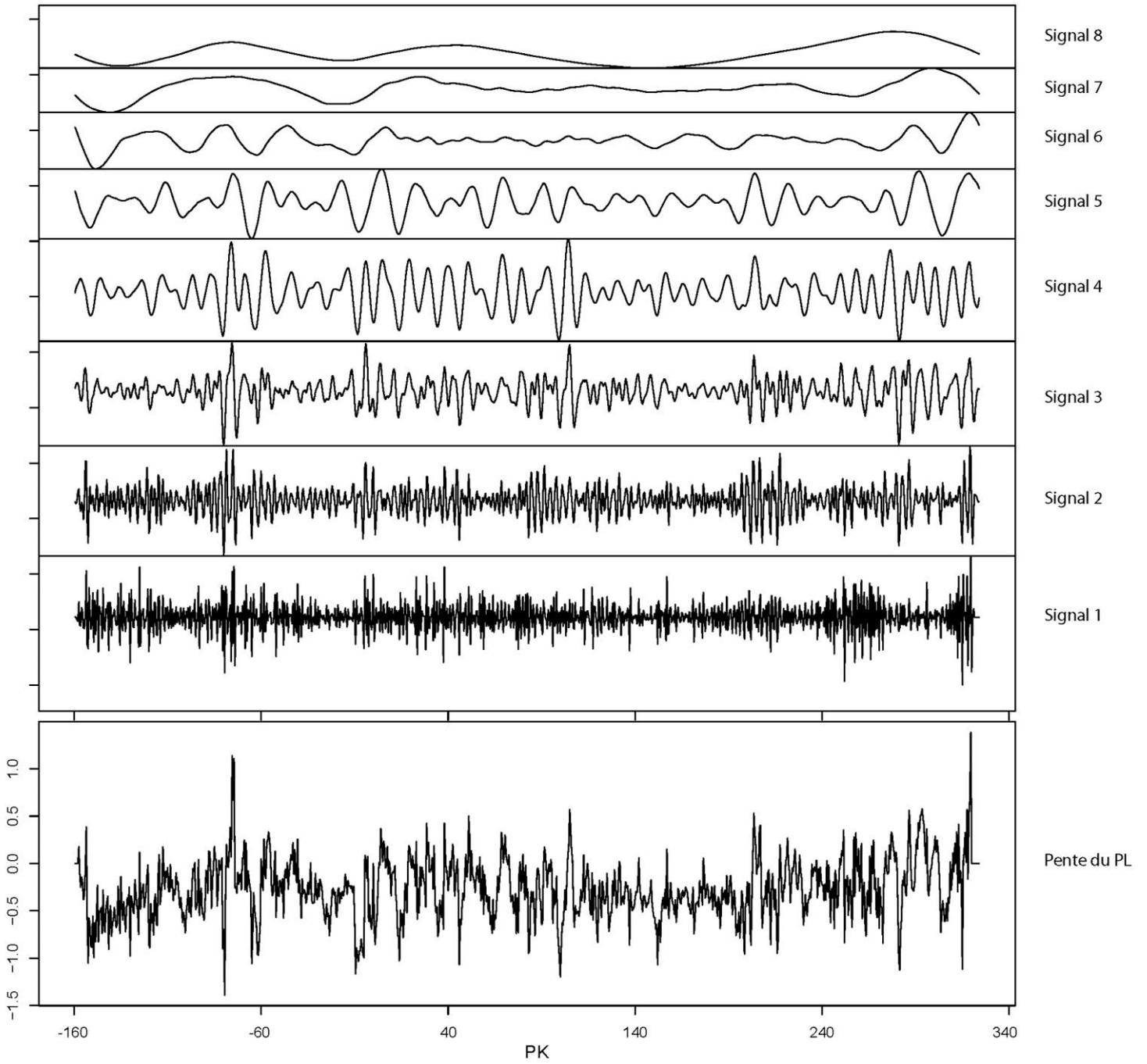
ANNEXE 1 : FENETRE GLISSANTE REPRESENTANT DEUX FILTRES: LA FONCTION D'ONDELETTE (PREMIERE FENETRE) ET LA FONCTION D'ECHELLE (DEUXIEME FENETRE).....	103
ANNEXE 2 : DECOMPOSITION DU SIGNAL DE PENTE LOCALE (GENISSIAT EXCLU)	104
ANNEXE 3 : RECOMPOSITION DU SIGNAL DE PENTE A PARTIR DES SIGNAUX OBTENUS PAR LA METHODE DES ONDELETTES	105
ANNEXE 4 : PREMIERE CARACTERISATION DES STRUCTURES PERIODIQUES LONGITUDINALES PAR LA METHODE DES ONDELETTES, PAR RAPPORT AU SIGNAL LE PLUS BAS DANS LA DECOMPOSITION (SIGNAL 1 DANS L'ANNEXE 2)	106
ANNEXE 5 : DONNEES BRUTES DES PARAMETRES PHYSIQUES CARACTERISANT LES MESO-FORMES FLUVIALES EN CHAQUE POINT DU THALWEG.....	107
ANNEXE 6 : PROFILS EN LONG DE LA PERIODE AVANT LES CRUES (1996/2000 EN POINTILLES ROUGE) ET APRES LES CRUES (2004/2007 EN BLEU) DE 2001 A 2003.....	110

Annexes

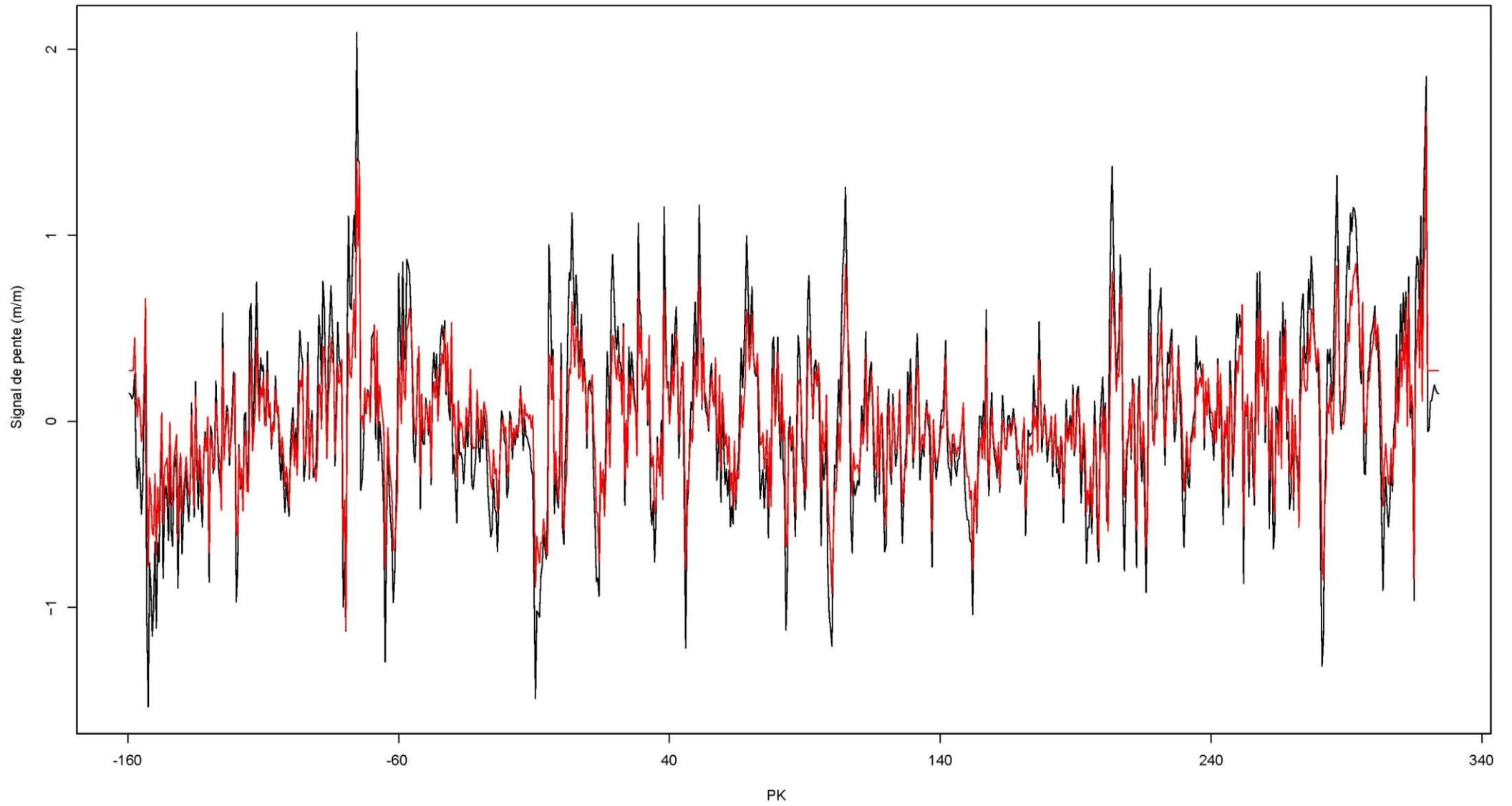
Annexe 1 : Fenêtre glissante représentant deux filtres: la fonction d'ondelette (première fenêtre) et la fonction d'échelle (deuxième fenêtre)



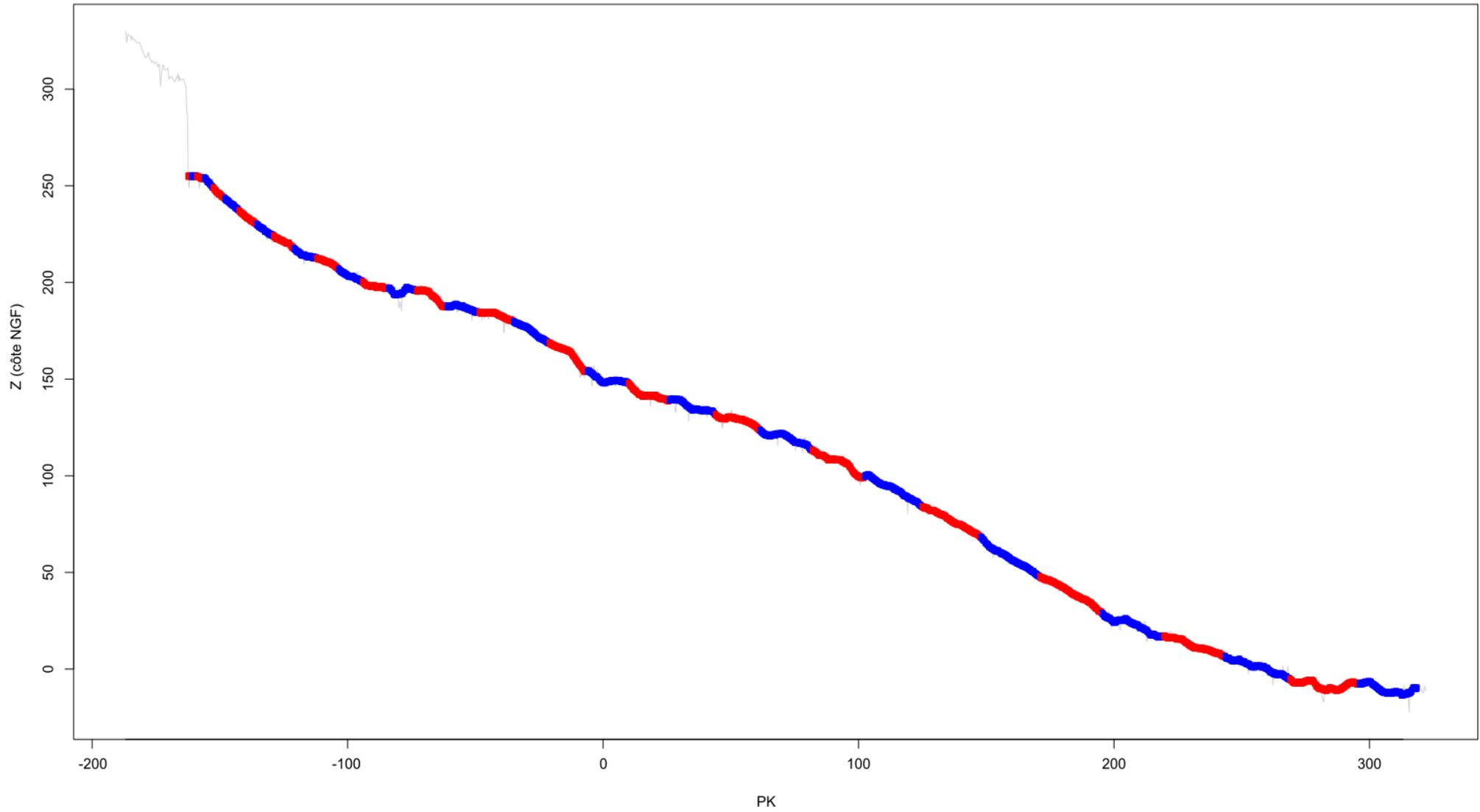
Annexe 2 : Décomposition du signal de pente locale (Génissiat exclu)



Annexe 3 : Reconstitution du signal de pente à partir des signaux obtenus par la méthode des ondelettes



Annexe 4 : Première caractérisation des structures périodiques longitudinales par la méthode des ondelettes, par rapport au signal le plus bas dans la décomposition (Signal 1 dans l'Annexe 2)



Annexe 5 : Données brutes des paramètres physiques caractérisant les méso-formes fluviales en chaque point du thalweg

PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	Tronçon homogène correspondant	PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	Tronçon homogène correspondant
-186,4272487	5,109166667	886,041036	2,2325	1	-80,00719656	11,77333333	2043,480693	4,522222222	11
-186,0254174	4,417916667	1861,034957	-2,876666667	1	-78,5049634	12,02444444	3492,348654	-7,251111111	11
-185,5412077	2,39725	1601,182008	1,54125	1	-77,96371586	4,877777778	3365,457064	4,773333333	11
-184,1643824	1,694888889	1907,899805	-0,856	1	-75,01261474	1,274444444	1007,198145	-0,104444444	12
-183,9400257	1,355888889	3083,64204	0,838888889	1	-74,5982588	1,705555556	996,6956457	1,17	12
-182,2564826	1,80575	3450,793287	-0,517	1	-74,0054166	1,273055556	2000,460066	-0,535555556	12
-180,8563836	3,06375	3301,811538	1,28875	1	-73,60156315	3,350357143	2598,185564	0,7375	12
-178,8056894	4,40375	2507,236521	-1,775	1	-72,00495653	3,991607143	2387,59572	-2,612857143	12
-177,5545721	3,93375	4276,28778	2,62875	1	-71,00337759	2,24975	2407,013539	1,37875	12
-176,2984528	4,66875	3498,609175	-1,305	1	-69,61736081	2,592111111	1994,98219	-0,871	12
-173,2728243	10,95375	1527,383082	3,36375	2	-68,59636405	6,416111111	2605,580595	1,721111111	12
-172,7998437	11,338	3293,785829	-7,59	2	-67,62237862	7,521666667	3629,350994	-4,695	12
-171,7509012	6,298	3151,18295	3,748	2	-65,99078346	7,725833333	2305,54249	2,826666667	12
-169,5060578	2,808888889	2409,201708	-2,55	2	-63,99302763	6,635	696,6011835	-4,899166667	12
-168,5997183	2,071388889	2670,501288	0,258888889	2	-63,68524097	3,623333333	686,6644985	1,735833333	12
-167,0968561	4,457045455	1474,28232	-1,8125	2	-63,29642645	6,619166667	794,9500173	-1,8875	13
-165,929217	3,859090909	529,103182	2,644545455	2	-62,99857647	6,4825	996,9059751	4,731666667	13
-165,6225738	2,24	814,390477	-1,214545455	2	-62,50147643	3,08775641	658,6605884	-1,750833333	13
-165,4001138	1,359621212	2580,511982	1,025454545	2	-62,00167049	5,486923077	3996,084214	1,336923077	13
-164,8081833	18,02666667	3247,449882	-0,334166667	2	-61,84281584	6,329333333	5086,552638	-4,15	14
-162,8196018	44,67694444	4605,317959	17,6925	2	-58,00558628	5,949416667	1693,775391	2,179333333	14
-161,5607333	29,70194444	3947,090247	-26,98444444	3	-56,7562632	4,754229675	887,8310501	-3,770083333	14
-158,2142839	8,1075	2213,172521	2,7175	3	-56,31181089	2,481821341	1268,588174	0,984146341	14
-157,6136431	6,589	2218,980662	-5,39	3	-55,86843215	3,444521154	1164,801818	-1,497675	14
-156,0011114	1,551727273	1339,377563	1,199	3	-55,04322271	2,737503064	723,0377376	1,946846154	14
-155,3946624	1,456893939	1474,380068	-0,352727273	3	-54,70363033	2,66091498	867,8548354	-0,790684211	14
-154,6617338	2,453257576	2312,959138	1,104166667	3	-54,32018498	2,388678138	632,8662523	1,870230769	14
-153,9028224	4,686868687	2341,284812	-1,349090909	3	-53,8357755	1,129122368	513,3492757	-0,518447368	14
-152,3487747	9,808888889	1368,059538	3,337777778	3	-53,68731872	2,116891216	643,2360816	0,610675	14
-151,5789975	7,488888889	2078,818306	-6,471111111	4	-53,32242622	1,641810811	386,199323	-1,506216216	14
-150,9807187	2,287777778	1985,843156	1,017777778	4	-53,04408264	0,151162162	219,9850987	0,135594595	14
-149,5001792	1,972857143	934,785384	-1,127	4	-52,9362269	0,501945946	513,9158034	-0,015657568	14
-148,9948756	3,777857143	956,3633	0,702857143	4	-52,82409754	0,790978378	787,4954309	0,486378378	14
-148,5653939	4,299	4581,290219	-3,075	4	-52,42231111	2,042211111	605,0523788	-0,3046	14
-148,0385123	1,882888889	4960,33958	1,224	4	-52,03660211	2,141138889	417,0762159	1,737611111	14
-143,9841036	1,780138889	1489,780092	-0,658888889	5	-51,81725672	1,602413492	969,6194095	-0,403527778	14
-143,0781727	1,646805556	2077,613543	1,12125	5	-51,6195259	6,741912741	1380,7909	1,198885714	14
-142,4943235	1,814305556	1962,306349	-0,525555556	5	-50,84763931	6,502762321	1356,538684	-5,543027027	14
-141,0005591	4,48975	1626,272069	1,28875	5	-50,238735	1,254005564	992,0952712	0,959735294	14
-140,5320172	5,032111111	1529,434562	-3,201	5	-49,49110062	1,78169527	1027,025143	-0,29427027	14
-139,3742871	4,317111111	1371,66651	1,831111111	5	-49,24663973	2,077044048	883,0390652	1,487425	14
-139,0025826	3,623272727	2364,975675	-2,486	5	-48,46407548	1,183714286	574,3646607	-0,589619048	14
-138,0026206	2,220272727	3050,082009	1,137272727	5	-48,36360066	2,614802555	914,8430681	0,594095238	14
-136,637607	2,073	2244,701865	-1,083	6	-47,88971082	2,344390244	543,4887408	-2,020707317	15
-134,9525385	2,22125	1048,67147	0,99	6	-47,44875759	0,690457927	214,3145793	0,323682927	15
-134,3929051	2,59125	995,668933	-1,23125	6	-47,34622208	1,01382378	358,3336084	-0,366775	15
-133,9038671	1,441	2222,756216	1,36	6	-47,23444301	4,385191638	318,8356576	0,64704878	15
-133,3972362	3,364	1768,302249	-0,081	6	-46,98788847	4,724801394	179,7973389	-3,738142857	15
-131,6811109	5,66	69,008514	3,283	6	-46,91560736	1,743100397	542,8969376	0,986658537	15
-131,6289339	4,51	478,162368	-2,377	6	-46,80809113	2,376679956	690,1259853	-0,75644186	15
-131,6121023	7,394	2114,798783	2,133	6	-46,37272042	4,203726467	1290,517814	1,620230905	15
-131,1507715	6,739	2152,527306	-5,261	6	-46,11796515	4,474202658	1770,59681	-2,583488372	15
-129,4973036	5,9155	1000,102365	1,478	7	-45,0822026	4,957964286	984,2030588	1,890714286	15
-128,9982442	6,2075	2029,512345	-4,4375	7	-44,34736834	3,807762821	568,1733243	-3,06725	15
-128,4972012	3,084	2697,201199	1,177	7	-44,09799555	1,402220138	1747,919251	0,740512821	15
-126,9687319	3,212888889	2481,888017	-1,314	7	-43,77919501	1,29452783	1790,355915	-0,661707317	15
-125,8	5,070707071	3303,527431	1,898888889	7	-42,35008029	0,941469161	1086,782395	0,632820513	15
-124,4868349	4,927972028	2997,221662	-3,171818182	7	-41,9888391	0,538961149	949,4011383	-0,308648649	15
-122,4964726	3,251608392	2502,437487	1,756153846	7	-41,2632979	0,715464015	1930,436075	0,2303125	15
-121,4896222	4,668454545	2487,290394	-1,495454545	7	-41,03943796	3,378599791	2701,801256	-0,485151515	15
-119,9940351	6,641	2079,839117	3,173	7	-39,3286182	10,33778161	1453,232951	2,893448276	16
-119,0023318	7,428	1697,325278	-3,468	7	-38,3376367	9,340666667	858,3636281	-7,444333333	16
-117,914196	5,174545455	915,806028	3,96	7	-37,87962887	5,204262366	886,2881615	1,896333333	16
-117,3050065	2,301818182	610,41023	-1,214545455	7	-37,47927307	5,05340176	727,1989604	-3,306129032	16
-116,9983899	5,551439394	1846,455592	1,087272727	8	-36,99334071	1,847272727	811,7845433	1,747272727	17
-116,6945963	8,115705128	2141,689821	-4,464166667	8	-36,75207421	1,353214286	824,3064176	-0,1	17
-115,1519343	7,633946154	1551,934345	3,651538462	8	-36,18155617	1,919214286	788,02451	1,253214286	17
-114,5529065	4,785384615	2925,099694	-3,982307692	8	-35,9277678	1,144636364	593,2877189	-0,666	17
-113,6	2,86724359	2595,538599	0,803076923	8	-35,39353166	0,973398268	199,0467028	0,478636364	17
-111,6278068	3,885984848	2022,541395	-2,064166667	8	-35,33448008	0,639261905	239,1567871	-0,494761905	17
-111,0044614	3,760707071	2002,544093	1,821818182	8	-35,19448496	1,165026316	476,3415296	0,1445	17
-109,6052654	2,244603175	1608,58597	-1,938888889	8	-35,09532329	2,246240602	1241,357868	-1,020526316	17
-109,0019173	1,183492063	1401,485669	0,305714286	8	-34,71814343	1,535714286	2349,069614	1,225714286	17
-107,9966794	2,122777778	1005,395139	-0,877777778	8	-33,85396542	0,767142857	2383,400312	-0,31	17
-107,6004316	1,51125	3599,103725	1,245	8	-32,36907381	1,905714286	2473,029171	0,457142857	17
-106,9912843	1,172678571	3883,338639	-0,26625	8	-31,47056511	3,467142857	2537,643882	-1,448571429	17
-104,0013279	1,680064935	1001,688344	0,906428571	8	-29,89604464	3,297321429	1057,629547	2,018571429	17
-103,1079457	4,271969697	125,277651	-1,773636364	8	-28,93292123	2,604194444	1020,899491	-1,27875	17
-102,9996396	5,06	2507,029274	3,498333333	9	-28,33841509	2,323717172	899,7466855	1,325444444	17
-102,982668	1,993888889	3482,666554	-1,561666667	9	-27,91202174	3,842727273	1907,59007	-0,998272727	17
-100,4926103	2,048222222	2797,259427	0,432222222	9	-27,43866841	3,541572193	1631,610726	2,844545454	17
-99,50000145	3,099	1996,589544	-1,616	9	-26,00443167	1,026506536	602,2307246	-0,697117647	17
-97,69535087	2,757545455	696,5586749	1,483	10	-25,80705768	1,459967836	668,4441472	0,329388889	18
-97,50341191	1,403434343	1005,862258	-1,274545455	10	-25,40220094	1,933260766	601,425874	-1,130578947	18
-96,99879219	3,148888889	1318,137156	0,128888889	10	-25,13861354	1,475640152	537,9558924	0,802681818	18
-96,49754965	6,091	2492,954537	-3,02	10	-24,80077507	0,854208333	399,8252823	-0,672958333	18
-95,68065504	5,571	3477,406481	3,071	10	-24,60065764	1,49	399,5129536	0,18125	18
-94,00459511	5,601666667	2003,209811	-2,5	10	-24,40094979	2,634134615			

PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	Tronçon homogène correspondant	PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	Tronçon homogène correspondant
-20,99966059	0,615961538	1001,954304	0,4425	18	36,94099377	3,858909091	2559,633406	1,260909091	25
-20,7982097	0,892082228	1792,908159	-0,173461538	18	38,50160154	6,194	2692,027658	-2,598	25
-19,99770629	2,252906404	1202,812526	0,71862069	18	39,50062718	6,817111111	2500,896617	3,596	25
-19,00530154	1,7	417,9998908	-1,534285714	18	41,1936292	5,216111111	1312,908994	-3,221111111	25
-18,79489376	1,908571429	1184,499748	0,165714286	18	42,00152379	2,053888889	941,3468051	1,995	25
-18,58730165	2,53827381	1370,906411	-1,742857143	18	42,5065382	2,14	943,9809289	-0,058888889	25
-17,61039402	1,686845238	1006,815859	0,795416667	18	42,9428706	2,459861111	1026,644402	2,081111111	25
-17,21639524	1,345221675	826,0193268	-0,891428571	18	43,45051913	1,14375	1068,448045	-0,37875	25
-16,60357816	0,602721675	410,6031083	0,453793103	18	43,969515	0,837857143	2056,037035	0,765	25
-16,39037592	0,256706349	390,1594727	-0,148928571	18	44,51896717	1,665857143	2492,542836	-0,072857143	25
-16,19297505	0,319316239	2146,650089	0,107777778	18	46,02555203	6,590272727	1209,014855	1,593	25
-16,00021644	1,09602122	2774,964577	-0,211538462	18	47,01151001	6,884272727	291,1073687	-4,997272727	25
-14,04632496	1,673448276	1439,055568	0,884482759	18	47,23456689	5,55	1709,710383	1,887	25
-13,22525187	3,208965517	797,1914008	-0,788965517	18	47,30261738	4,572375	2156,848647	-3,663	25
-12,60726939	6,571515152	208,1913012	2,42	18	48,94427727	3,28132622	1822,995293	0,909375	25
-12,42806047	6,38	96,9927157	-4,151515152	18	49,45946602	4,683038176	1551,272149	-2,37195122	25
-12,39907809	7,898190731	190,4266946	2,228484848	18	50,76727256	5,956521739	2326,727435	2,311086957	25
-12,33106775	8,27	275,3785441	-5,669705882	18	51,01073817	4,811034783	3461,063235	-3,645434783	26
-12,2086514	5,477321895	195,8260659	2,600294118	18	53,5	2,9666	1666,323497	1,1656	26
-12,05568921	4,353513492	183,6956304	-2,877027778	18	54,47180141	2,556714286	1534,55317	-1,801	26
-12,01282533	2,908513492	191,5313077	1,476485714	18	55,1663235	0,987142857	1358,187088	0,755714286	26
-11,87199358	3,09	242,2554381	-1,432027778	18	56,00635458	0,656761905	2464,643289	-0,231428571	26
-11,82129402	2,12724292	216,3068688	1,657972222	18	56,52451058	1,453190476	3066,569891	0,425333333	26
-11,62973814	3,468401849	634,1362598	-0,46927027	18	58,47099786	2,257857143	1525,722204	-1,027857143	26
-11,60498534	3,37104067	802,0240931	2,999131579	18	59,59108048	3,63	883,1814856	1,23	26
-10,99560188	2,78	220,9133866	-0,371909091	18	59,99672007	4,365	2978,154654	-2,4	26
-10,80296124	8,33	219,8086122	2,408090909	18	60,47426196	5,856764706	2500,828253	1,965	26
-10,77468849	9,204467914	202,6665593	-5,921909091	18	62,97487472	4,81	557,0035946	-3,891764706	26
-10,58315263	6,75	188,5573873	3,282558824	18	62,97509022	2,804663866	2536,244758	0,918235294	26
-10,57202193	7,373069748	207,6089691	-3,467441176	18	63,53187832	2,354206349	3006,906551	-1,886428571	27
-10,39459524	9,86	201,2511752	3,905628571	18	65,51133497	1,918888889	2025,733822	0,467777778	27
-10,36441296	9,926571429	223,4196366	-5,954371429	18	66,53878487	3,226111111	1978,266107	-1,451111111	27
-10,19334407	6,12	381,5975702	3,9722	18	67,53706879	3,544285714	1177,96901	1,775	27
-10,14099333	5,760947059	378,7090044	-2,1478	18	68,51705097	1,977477253	287,356848	-1,769285714	27
-9,811746497	5,992661345	200,8275918	3,613147059	18	68,7150378	4,98	799,253178	0,208461538	27
-9,762284322	7,305428571	1118,955954	-2,379514286	18	68,80440782	7,751538462	2167,994742	-4,771538462	27
-9,610918905	10,38234762	1603,357801	4,925914286	18	69,51429098	3,355555556	2944,253761	2,98	27
-8,643328368	5,792295402	829,8182913	-5,456433333	19	70,97240256	1,448555556	2524,129009	-0,375555556	27
-8,007561105	1,523604004	387,7733722	0,335862069	19	72,45854474	1,754	2273,346411	1,073	27
-7,813510077	2,455075269	602,6791623	-1,187741935	19	73,49653157	3,247153846	2255,048931	-0,681	27
-7,619787732	3,684229885	762,6132068	1,267333333	19	74,73189115	7,244725275	2143,30878	2,566153846	27
-7,210830915	3,000896552	410,613175	-2,416896552	19	75,7515805	7,084285714	1800,625767	-4,678571429	27
-6,857174526	3,82	1232,932247	0,584	19	76,87519993	4,915047619	1137,893933	2,405714286	27
-6,80021774	6,217428571	1580,742003	-3,236	19	77,55220627	2,993179487	925,8264887	-2,509333333	27
-5,624251279	3,184428571	955,4295016	2,981428571	20	78,01309387	5,283846154	1511,532459	0,483846154	27
-5,219475737	0,972354839	1334,5024	-0,203	20	78,47803276	7,786666667	1547,303475	-4,8	27
-4,668821777	7,497630701	1317,210174	0,769354839	20	79,52462633	4,051666667	3048,923904	2,986666667	27
-3,884973337	10,91100313	1709,850227	-6,728275862	20	80,02533623	3,132272727	3471,066312	-1,065	27
-3,351611604	6,333282828	1386,060536	4,182727273	20	82,57355563	5,546272727	3420,619632	2,067272727	27
-2,17512311	6,241498952	297,0257593	-2,150555556	20	83,49640255	6,066	4000,001335	-3,479	28
-1,965551067	4,279766926	128,9873009	4,090943396	20	85,99417526	6,063666667	3520,757009	2,587	28
-1,878097351	2,89	397,148466	-0,188823529	20	87,49640388	4,376666667	2372,448596	-3,476666667	29
-1,836563766	4,39254902	1539,653089	2,701176471	20	89,51493227	1,518	813,4273	0,9	29
-1,480948885	3,903921569	1365,577993	-1,691372549	20	89,86885248	1,215	1162,04697	-0,618	29
-0,296910677	3,598467387	292,0611901	2,21254902	20	90,32835957	2,759	2628,060782	0,597	29
-0,115370892	3,699318367	119,8537219	-1,385918367	20	91,03089945	4,407	2940,573827	-2,162	29
-0,004849487	4,21	1005,19409	2,3134	20	92,95642035	4,5525	2446,288622	2,245	29
0,00448283	2,95287907	1289,661469	-1,8966	20	93,97147327	3,5	3003,376831	-2,3075	29
1,000344603	3,075791285	1958,202222	1,05627907	21	95,40270897	3,75625	2726,276667	1,1925	30
1,294144299	2,716734417	2147,766719	-0,2019512195	21	96,97485011	4,5475	1484,637953	-2,56375	30
2,958546825	2,651068376	2145,625981	0,697222222	21	98,12898564	2,016607143	884,722595	1,98375	30
3,441911018	3,878391608	1823,518942	-1,953846154	21	98,45948806	2,079107143	2547,233347	-0,032857143	30
5,104172807	4,88	415,7135152	1,924545455	22	99,01370824	5,810694444	3983,255944	2,04625	30
5,265429961	4,128454545	1235,777221	-2,955454545	22	101,0067214	5,961444444	2987,497511	-3,764444444	30
5,519886322	1,3505	1480,19027	1,173	22	102,9969642	2,902714286	4422,277925	2,197	31
6,501207181	0,6595	988,5629572	-0,1775	22	103,9942189	2,480714286	5830,885092	-0,705714286	31
7,000076592	2,0895	2994,054187	0,482	22	107,4192421	3,812	2600,657775	1,775	31
7,489770139	3,121944444	3002,098231	-1,6075	22	109,825104	2,425181818	675,787454	-2,037	32
9,994130779	3,496262626	1033,463969	1,514444444	22	110,0198999	0,509181818	2601,443882	0,388181818	32
10,49186837	2,644040404	1007,696222	-1,981818182	22	110,5008915	1,143222222	2497,27005	-0,121	32
11,02759475	0,76	980,1538902	0,662222222	22	112,6213438	1,946222222	917,145376	1,022222222	32
11,49956459	2,036666667	1503,436677	-0,097777778	22	112,9981615	2,405111111	993,49985	-0,924	32
12,00774864	2,05979798	1509,41472	1,938888889	22	113,5384891	4,613611111	1938,079634	1,481111111	32
13,00300127	0,234909091	994,8985622	-0,120909091	22	113,9916614	4,8025	3016,444865	-3,1325	32
13,51716336	2,594909091	1335,740864	0,114	22	115,4765688	2,74875	2523,071761	1,67	32
13,99789983	2,494909091	985,6959825	-2,480909091	22	117,0081062	3,75575	1988,119708	-1,07875	32
14,85290422	2,48	1736,76206	0,014	22	117,9996405	3,082	1452,710304	2,677	32
14,98359581	3,734125	2193,458559	-2,466	23	118,9962259	2,755	654,497193	-0,405	32
16,58966628	3,07375	1381,671067	1,268125	23	119,4523508	10,87777778	554,378255	2,35	32
17,17705437	3,403402778	1787,07848	-1,805625	23	119,6507231	10,39527778	1344,305846	-8,52777778	32
17,97133735	7,007152778	1481,023514	1,597777778	23	120,0067291	3,9125	1493,396105	1,8675	33
18,96413285	5,963011364	1001,84554	-5,409375	23	120,995029	4,527857143	1506,833514	-2,045	33
19,45236086	0,577272727	1012,608428	0,553636364	23	121,5001252	3,85	2003,35327	2,482857143	33
19,96597839	1,807272727	2008,166374	-0,023636364	23	122,5018625	2,902142857	1501,818403	-1,367142857	33
20,46496929	2,126136364	2540,295786	1,783636364	23	123,5034785	1,648846154	1002,814076	1,535	33
21,97414477	2,990681818	2500,673701	-0,3425	23	124,0038809	1,543076923	1488,519193	-0,113846154	33
23,00526508	6,234015152	3015,261522	2,648181818	23	124,5062925	1,829230769	1493,707456	1,429230769	33
24,47481847	5,624833333	2172,365394	-3,585833333	23	125,4922001	1,099285714	555,896523	-0,4	33
26,0205266	2,581727273								

PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	Tronçon homogène correspondant	PK	Amplitude	Longueur d'onde	Demi-amplitude	Tronçon homogène correspondant
133,9955121	0,373	1025,182707	0,245	35	233,5388491	0,466363636	1020,044871	0,206363636	46
134,5060875	1,468	1257,640667	-0,128	35	234,0239085	0,933	2019,665491	-0,26	47
135,0206948	3,09	1557,522378	1,34	35	234,558894	2,199363636	2000,356019	0,673	47
135,7637282	1,992	2277,934804	-1,75	35	236,043574	2,321818182	2468,376323	-1,526363636	47
136,5782172	3,26325	2438,607213	0,242	36	236,55925	3,512121212	2476,460479	0,795454545	47
138,0416663	4,09375	1526,29899	-3,02125	36	238,5119503	3,711111111	975,220311	-2,716666667	47
139,0168244	1,225	968,101643	1,0725	36	239,0357105	1,549444444	971,242731	0,994444444	47
139,5679619	1,01	1437,562573	-0,1525	36	239,4871707	1,95375	1495,234352	-0,555	47
139,984926	1,121944444	3012,338304	0,8575	36	240,0069532	3,552321429	2676,78777	1,39875	47
141,0055245	0,738888889	3491,352158	-0,264444444	36	240,982405	4,032238095	2015,283826	-2,153571429	47
142,9972648	1,581111111	2503,041087	0,474444444	36	242,683741	3,711333333	1194,847774	1,878666667	47
144,4968767	1,604444444	2539,966506	-1,106666667	37	242,9976888	2,265333333	1092,594046	-1,832666667	47
145,5003054	1,153333333	4083,359247	0,497777778	37	243,8785888	1,487333333	2015,283826	0,432666667	48
147,0368432	2,497777778	2962,199576	-0,655555556	37	244,0902829	2,524666667	1413,497626	-1,054666667	48
149,5836647	2,67	1914,686929	1,842222222	37	244,9970134	4,355833333	2011,553072	1,47	48
149,9990428	1,288888889	2002,510892	-0,827777778	37	245,5037805	3,548833333	1986,570187	-2,888833333	48
151,4983516	1,433611111	1094,68811	0,461111111	37	247,0085665	3,3	1504,744515	0,663	48
152,0015536	1,439166667	1069,73551	-0,9725	37	247,4903507	4,75325	1510,903232	-2,637	48
152,5930397	4,920416667	1425,439618	0,466666667	37	248,513311	3,972916667	1488,686473	2,11625	49
153,0712892	5,960416667	1410,275117	-4,45375	38	249,0012539	2,965555556	1496,286402	-1,856666667	49
154,0184793	2,4	1977,280921	1,506666667	38	250,0019975	2,688055556	1497,442333	1,108888889	49
154,4815643	1,525555556	3023,079007	-0,893333333	38	250,4975223	3,3875	2498,437852	-1,579166667	49
155,9957602	1,424722222	2024,148953	0,632222222	38	251,4994398	7,773333333	1999,945589	1,808333333	49
157,5046433	2,13625	1496,977817	-0,7925	38	252,9959602	7,203181818	1004,47339	-5,965	49
158,0199092	2,6975	2463,934633	1,34375	38	253,4993854	3,708181818	989,458793	1,238181818	49
159,0016211	2,969305556	2955,405212	-1,35375	38	254,0004336	3,198888889	995,446812	-2,47	49
160,4838438	2,87	4525,301552	1,615555556	38	254,4888442	1,631388889	1509,717816	0,728888889	49
161,9570263	2,573611111	5041,162453	-1,254444444	38	254,9958804	2,2495	2005,183292	-0,9025	49
165,0091454	2,890984848	4026,698288	1,319166667	38	255,998562	3,500333333	1502,389237	1,347	49
166,9981888	3,109818182	2610,631906	-1,571818182	39	257,0010637	3,385555556	1000,677487	-2,153333333	49
169,0358437	2,283	977,840199	1,538	39	257,5009513	2,214444444	1503,207568	1,232222222	49
169,6088207	2,050454545	1106,908409	-0,745	39	258,0017412	2,701111111	2002,086197	-0,982222222	49
170,0136839	1,795454545	1499,750685	1,305454545	39	259,0041588	3,467638889	1501,535891	1,718888889	49
170,7157291	2,080833333	936,88951	-0,49	39	260,0038274	2,7425	995,729827	-1,74875	49
171,5134345	2,234469697	497,242805	1,590833333	39	260,5056947	1,35275	1474,383657	0,99375	49
171,6526186	1,869469697	861,17027	-0,643636364	39	260,9995572	2,641	1588,121039	-0,359	49
172,0106773	4,4775	1989,322655	1,225833333	40	261,9800784	8,633111111	1534,99096	2,282	49
172,5137889	4,487666667	2486,85295	-3,251666667	40	262,5876782	7,787111111	1887,826837	-6,351111111	49
174	1,898857143	1591,86211	1,236	40	263,5150693	2,69225	1892,146454	1,436	50
175,0006418	2,388412698	2001,488356	-0,662857143	40	264,4755051	3,835	1533,804865	-1,25625	50
175,5918621	2,875555556	3419,206447	1,725555556	40	265,4072158	5,43375	1113,775934	2,57875	50
177,0021302	1,425	2493,898919	-1,15	40	266,0093099	6,115769231	938,15626	-2,855	50
179,0110686	0,429	1482,793077	0,275	40	266,5209917	5,879340659	1017,608375	3,260769231	50
179,4960291	0,238285714	1527,442357	-0,154	40	266,9474662	3,740714286	1065,641871	-2,618571429	50
180,4938616	0,136785714	947,562207	0,084285714	40	267,5386001	2,713571429	944,486962	1,122142857	50
181,0234714	1,18	1474,051903	-0,0525	40	268,0131081	6,467678571	1987,635739	-1,591428571	50
181,4414238	2,51125	2127,976678	1,1275	40	268,4830871	9,110096154	3041,068965	4,87625	50
182,4975233	2,58375	1508,27588	-1,38375	40	270,0007434	5,364755245	2007,086226	-4,233846154	51
183,5694005	1,61	925,956056	1,2	40	271,524156	1,264545455	974,473569	1,130909091	51
184,0057992	0,661111111	1002,618714	-0,41	40	272,0078297	0,729191919	979,577133	-0,133636364	51
184,4953566	1,178611111	1087,038534	0,251111111	40	272,4986296	2,577555556	2004,764228	0,595555556	51
185,0084179	2,78625	1472,993208	-0,9275	40	272,9874068	2,060181818	2014,46276	-1,982	51
185,5823951	3,32625	3002,220894	1,85875	40	274,5033938	0,928181818	996,173032	0,078181818	51
186,4814111	2,715	3077,620264	-1,4675	40	275,0018696	2,66	1001,76703	-0,85	51
188,584616	2,12625	1370,115473	1,2475	40	275,4995669	3,324545455	1498,694045	1,81	51
189,5590314	1,51	1431,705945	-0,87875	40	276,0036363	2,443776224	1507,806378	-1,514545455	52
189,9547315	1,535694444	2025,848008	0,63125	40	276,9982609	0,937692308	1501,739099	0,929230769	52
190,9907374	2,004444444	2029,189627	-0,904444444	40	277,5114426	1,543461538	2491,296458	-0,008461538	52
191,9805795	2,795454545	1996,333188	1,1	41	278,5	2,843181818	2333,164689	1,535	52
193,019927	3,036363636	1989,733832	-1,695454545	41	280,0027391	4,477272727	2409,195556	-1,308181818	53
193,9769127	3,409090909	2524,825613	1,340909091	41	280,8331647	8,600090909	3168,86264	3,169090909	53
195,0096608	2,805324675	1994,470136	-2,068181818	41	282,4119347	9,275545455	4535,286054	-5,431	53
196,5017383	1,618142857	2005,066219	0,737142857	41	284,002031	6,742323232	3963,809557	3,844545455	54
197,004131	4,195545455	2507,203729	-0,881	41	286,9472207	5,258888889	2531,615534	-2,897777778	54
198,5068045	8,045454545	1995,796549	3,314545455	41	287,9658405	2,844111111	3027,895668	2,361111111	54
199,5113347	6,803216783	3468,837505	-4,730909091	41	289,4788362	0,534111111	2539,463	-0,483	54
200,5026011	6,693418803	3515,877198	2,072307692	42	290,9937362	3,273611111	2034,562034	0,051111111	55
202,9801722	7,778888889	3017,374737	-4,621111111	42	292,0182992	4,893611111	4482,04041	-3,2225	55
204,0184783	5,147777778	3480,345254	3,157777778	43	293,0282982	3,19968254	5938,478304	1,671111111	55
205,9975469	3,004444444	3000,920979	-1,99	43	296,5003396	3,075714286	4483,920783	-1,528571429	55
207,4988235	3,093333333	2487,182301	1,014444444	43	298,9667765	2,112142857	4025,808772	1,547142857	55
208,9984679	3,335138889	2496,84689	-0,278888889	43	300,9842604	2,662777778	3509,584941	-0,565	55
209,9860058	3,275138889	2405,60374	1,25625	43	302,9925853	4,418547009	2495,656334	2,097777778	55
211,4953148	5,292638889	1772,508989	-2,018888889	43	304,4938454	3,846602564	1992,948464	-2,320769231	55
212,3916095	9,98375	2608,004035	3,27375	43	305,4882416	2,550833333	2004,181904	1,525833333	55
213,2678238	8,692222222	2235,019542	-6,71	43	306,4867938	2,081666667	1521,479899	-1,025	55
214,9996136	2,041313131	994,332244	1,982222222	44	307,4924235	1,856666667	1002,290824	1,056666667	55
215,5028433	1,44	914,477939	-0,059090909	44	308,0082737	1,874285714	2003,160103	-0,8	55
215,9939458	4,003216783	2000,110738	1,380909091	44	308,4947144	2,550952381	2524,638477	1,074285714	55
216,4173213	4,483216783	1981,628365	-2,622307692	44	310,0114338	2,166666667	1495,23458	-1,476666667	55
217,9940566	2,094242424	1160,738179	1,860909091	44	311,0193528	2,866666667	1985,348445	0,69	55
218,3989496	1,148787879	1997,852731	-0,233333333	45	311,5066684	4,262666667	1984,772404	-2,176666667	55
219,1547947	1,845454545	1652,023395	0,915454545	45	313,0047013	4,537111111	960,78161	2,086	55
220,3968024	1,52	1492,416546	-0,93	45	313,4914408	5,853333333	1021,125825	-2,451111111	55
220,8068181	2,356666667	1752,217096	0,59	45	313,9654829	4,23	1555,465097	3,402222222	55
221,8892189	5,0525	2195,380129	-1,766666667	45	314,5125666	1,378888889	1485,299432	-0,827777778	55
222,5590352	6,890277778	2479,739395	3,285833333	45	315,520948	8,967777778	2074,626361	0,551111111	55
224,084599	3,781111111	1456,273179	-3,604444444	45	315,9978661	12,742666667	3120,810175	-8,416666667	55
225,0387746	0,895555556								

Annexe 6 : Profils en long de la période avant les crues (1996/2000 en pointillés rouge) et après les crues (2004/2007 en bleu) de 2001 à 2003

