



HAL
open science

Évolution morphologique des marges alluviales et évaluation des stocks de sédiments grossiers à Baix-Le-Logis-Neuf et Beaucaire

Gabrielle Seignemartin, Hervé Piégay, Barbara Belletti, Hossein Ghaffarian
Roohparvar, Thierry Winiarski, Brice Mourier

► **To cite this version:**

Gabrielle Seignemartin, Hervé Piégay, Barbara Belletti, Hossein Ghaffarian Roohparvar, Thierry Winiarski, et al.. Évolution morphologique des marges alluviales et évaluation des stocks de sédiments grossiers à Baix-Le-Logis-Neuf et Beaucaire. [Rapport de recherche] CNRS; ENTPE. 2021. hal-03290964

HAL Id: hal-03290964

<https://hal.science/hal-03290964>

Submitted on 19 Jul 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.

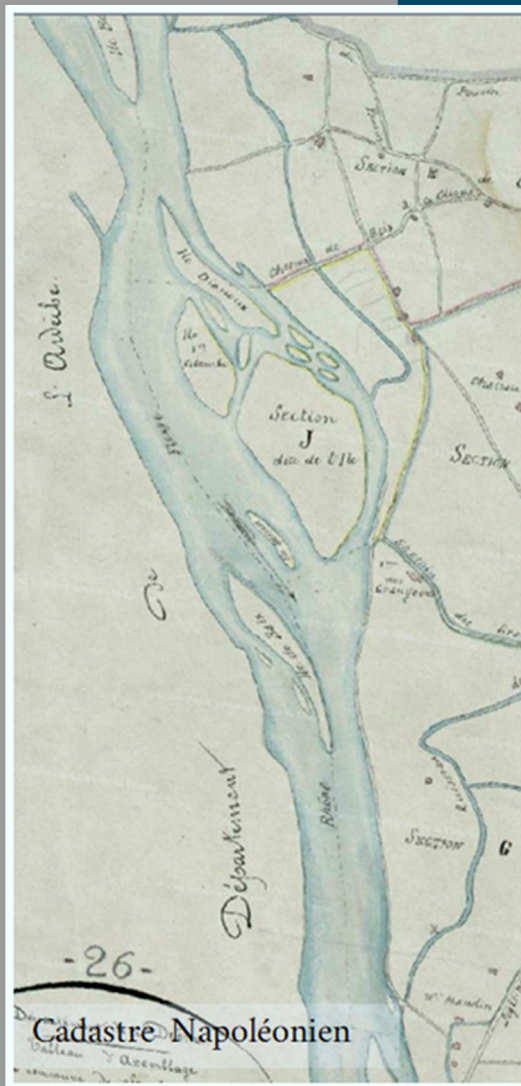


Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Évolution morphologique des marges alluviales et évaluation des stocks de sédiments grossiers à Baix-Le-Logis-Neuf et Beaucaire

OSR5 2018-2020

Rapport final

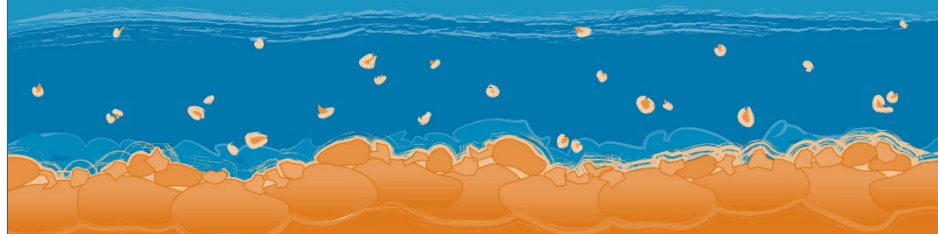


Cadaastre Napoléonien



Orthophotographie 2017

Plan
Rhône



Évolution morphologique des marges alluviales et évaluation des stocks de sédiments grossiers à Baix-Le-Logis-Neuf et Beaucaire

Rapport final – Version du 15 juin 2021

Axe A	Redynamisation des marges alluviales : faisabilité, risques, opportunités
Action A.1	Evolution morphologique des marges à l'échelle du RCC
Action A.2	Charge de fond et redynamisation du chenal
Sous-Action A.2.1	Evaluation des stocks de sédiments grossiers

Personnes impliquées	Equipe de recherche
Gabrielle Seignemartin Hervé Piégay Barbara Belletti Hossein Ghaffarian Roohparvar	CNRS - UMR 5600 EVS
Thierry Winiarski Brice Mourier	ENTPE

Pour citer ce document :

Seignemartin G., Piégay H., Belletti B., Ghaffarian Roohparvar H., Winiarski T., Mourier B. (2021). *Évolution morphologique des marges alluviales et évaluation des stocks de sédiments grossiers à Baix-Le-Logis-Neuf et Beaucaire*. Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5^{ème} Programme d'Actions, 51 p.

Résumé

L'approche multi-proxy conduite à Baix-Logis-Neuf et à Beaucaire (qui s'ajoutent aux 4 RCC étudiés durant l'OSR 4 : PBN, PDR, MON et DZM) a permis de comprendre l'impact des aménagements sur les processus de rétraction de la bande active et sur la dynamique d'atterrissement dans la plaine alluviale du Rhône, d'évaluer ainsi les épaisseurs et volumes de sédiments fins et grossiers stockés sur les marges alluviales. Elle a aussi permis de mieux appréhender le signal chimique des polluants du Rhône et ainsi, de mieux cerner les risques encourus en cas de remobilisation des sédiments fins.

Ainsi, nous avons observé que les différentes phases d'aménagement (endiguement et dérivation) ont eu des effets très significatifs sur la sédimentation de la plaine alluviale. Le phénomène de rétraction est plus important pour BLN et BEC (23 %) que sur les autres secteurs (entre 10 et 12%) lors de la phase 1810s-1860/1876 ; et ce, alors que les premiers endiguements importants sont observés sur le Rhône. Si sur les secteurs de PBN, PDR, DZM et BLN, la phase de correction présente une rétraction du même ordre de grandeur (entre 43 et 53% base 1860), ce n'est pas le cas à BEC où le phénomène est environ deux fois moins fort. Au niveau des secteurs de PBN, PDR, DZM et BEC (13,4% à 17,6 % base 1860), la phase post-dérivation est caractérisée par une rétraction du même ordre de grandeur, ce n'est pas le cas à BLN où le phénomène est là encore deux fois moins marqué.

Les deux secteurs amont (PBN et PDR) arborent des signatures chimiques bien différentes des trois secteurs aval (BLN, MON et DZM). PBN et PDR présentent des teneurs en zinc globalement plus importantes que BLN, MON et DZM, tandis que ces derniers ont des sédiments plus riches en nickel, enrichissement qui résulte possiblement de la contribution d'affluents de la rive gauche en provenance des Alpes occidentales, en premier lieu l'Isère. Les teneurs en plomb sont quant à elles plus importantes à PBN et PDR qu'à BLN, MON et DZM, mais cette différence est également associée à une distribution plus hétérogène (des valeurs faibles « plus faibles » et des valeurs fortes « plus fortes » à PBN et PDR qu'à BLN, MON et DZM). La présence de ces deux sites justes en aval de l'agglomération de Lyonnaise (pollution urbaine et présence du bassin industriel) pourrait expliquer cette variabilité.

Mots-clés

OSR ; Rhône ; Baix-Le-Logis-Neuf ; Beaucaire ; évolution planimétrique ; atterrissement ; sédiments grossiers et fins ; SIG ; radargramme ; ETM

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	3
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	4
2. PRESENTATION DES SITES : BAIX-LE-LOGIS-NEUF ET BEAUCAIRE	5
2.1. Secteur de Baix-Le-Logis-Neuf	5
2.2. Secteur de Beaucaire	6
3. RAPPELS METHODOLOGIQUES	7
3.1. Planimétrie intra- et inter-secteurs (plaine et endiguements Girardon).....	7
3.2. Sondages à la perche	8
3.3. Estimations des volumes de sédiments fins et grossiers.....	12
3.4. Transects au radar géologique (plaine et endiguements Girardon).....	12
3.5. Carottage sédimentaire & analyses en laboratoire	15
3.6. Chimie élémentaire des sédiments de la plaine alluviale (profils sédimentaires).....	16
4. TABLEAUX ET CARTES RECAPITULATIFS DES DONNEES UTILISEES/PRODUITES.....	17
5. RESULTATS	19
5.1. Secteur de Baix-le-Logis-Neuf.....	19
5.2. Secteur de Beaucaire	33
6. APPROCHE COMPARATIVE INTER-SECTEUR.....	40
7. CONCLUSIONS.....	45
8. ANNEXES	47
9. Références	51

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le présent rapport synthétise les avancées réalisées dans le cadre de l'axe A.1 et A2.1. de l'OSR5. Celui-ci s'inscrit dans la continuité de l'axe 2 de l'OSR 4 (2015-2017).

S'appuyant sur une approche multi-scalaire et intégrative, l'objectif de ce travail vise au recoupement et à la valorisation des données acquises dans OSR 4 et 5 pour aboutir à une meilleure compréhension de l'évolution morphologique des marges aménagées du Rhône. En effet, mieux comprendre l'évolution géohistorique (19ème et 20ème siècle) permet de mieux appréhender l'impact des aménagements en place et de fournir de nouvelles connaissances pour répondre aux objectifs de redynamisation des marges alluviales. Les enjeux liés au stockage/déstockage des sédiments fins de la plaine alluviale posent la question du relargage des contaminants qui sont potentiellement associés à ces sédiments.

Il s'agit ainsi d'évaluer les volumes de sédiments grossiers stockés dans les marges alluviales susceptibles d'être ré-érodées afin (i) d'établir des scénarios de recharge en lien avec les évaluations effectuées en A2.2 pour le secteur de Baix-Le-Logis-Neuf, ainsi que (ii) pour caractériser les changements morphologiques au niveau du secteur de Beaucaire, secteur d'importance stratégique puisqu'il intègre les changements hydrologiques affectant tout le corridor rhodanien et ses affluents.

Les données ont été obtenues dans le contexte de programmes de recherche précédents (OSR4, RhonEco, OHM) et de post-traitements effectués dans le cadre de l'OSR5 (2018-2019). L'étude inclut les RCC (Rhône Court-Circuités) de Baix-Le-Logis-Neuf (BLN) et Beaucaire (BEC), à la suite du travail déjà réalisé sur les secteurs de Pierre-Bénite (PBN), Péage-de-Roussillon (PDR), de Montélimar (MON), Donzère-Mondragon (DZM).

La méthodologie est issue des protocoles établis dans les rapports 1 et 2 de l'axe 2 de l'OSR 4 (2015-2017). Les jeux de données sont issus de campagnes de terrain (sondages à la perche, prélèvements, transects GPR, etc.), d'analyses géomatiques (planimétrie diachronique, analyse spatiale et modélisation, etc.), ou encore d'analyses en laboratoire (granulométrie, chimie, etc.). Ils sont complétés par des jeux de données externes (e.g. analyses chimiques avant travaux réalisées par la CNR).

L'approche comparative multi-indicateurs et multi-secteurs offre la possibilité d'approcher les facteurs de contrôle à la base des similarités et dissemblances des trajectoires évolutives des marges aménagées (Figure 1).

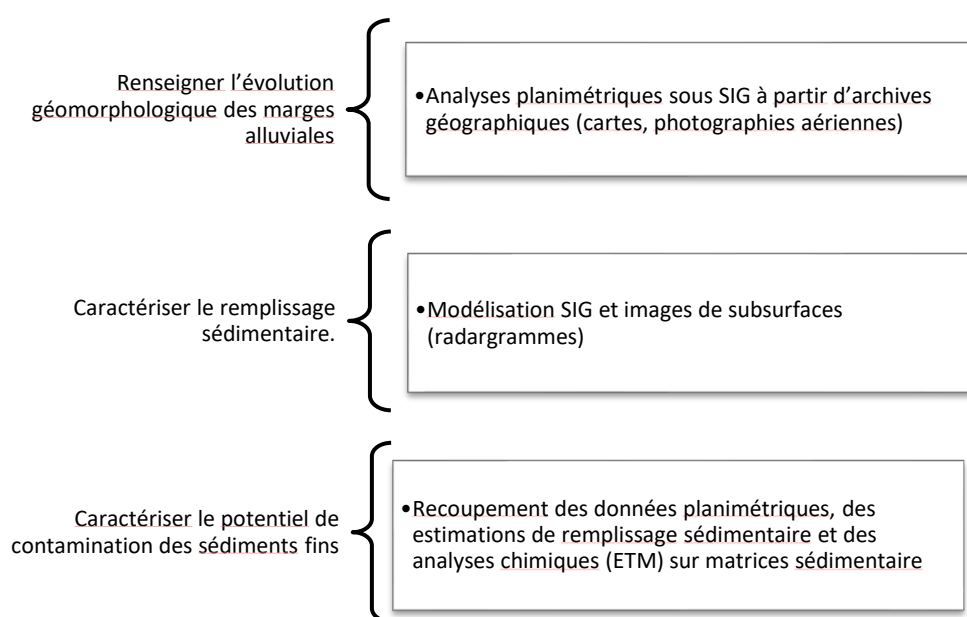


Figure 1 : Approche multi-proxy pour une caractérisation morpho-sédimentaire des marges fluviales

2. PRESENTATION DES SITES : BAIX-LE-LOGIS-NEUF ET BEUCAIRE

Les secteurs d'étude sont situés entre les PK 133 et 145 (Baix-Le-Logis-Neuf, Figure 2) et les PK 260 et 280 (Beaucaire, Figure 3). Ces sites ont la particularité d'être constitués d'un tronçon appelé Vieux-Rhône (le cours naturel du Rhône) et d'un canal de dérivation destiné à la production hydroélectrique et la navigation. Le site de Beaucaire intègre quant à lui une zone d'étude en Rhône total ; et ce sur une dizaine de kilomètres à l'aval de la dérivation jusqu'à la diffluence entre le grand et le Petit Rhône.

2.1. Secteur de Baix-Le-Logis-Neuf



BAIX-LE-LOGIS-NEUF

Figure 2: vue aérienne du secteur de Baix-le-Logis-Neuf (PK 135 à PK 144.5). Source : IGN (2017)

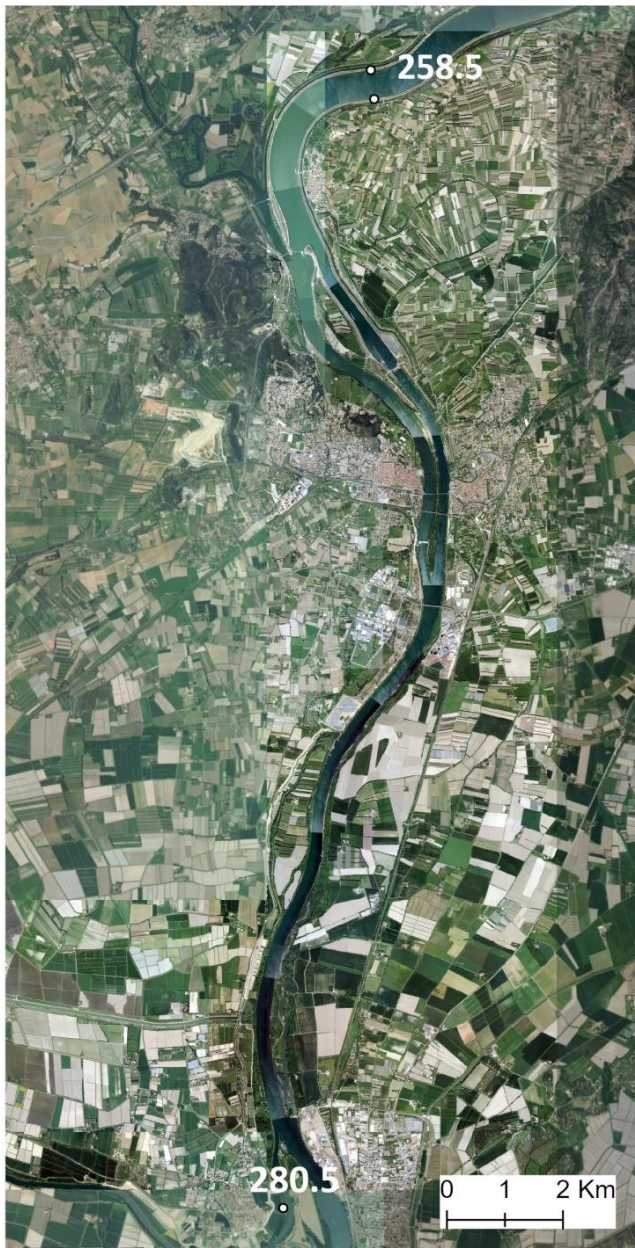
concernent essentiellement les villes du Pouzin et de Cruas et les zones de gravières se multiplient sur les marges terrestres du lit.

En 1860, la bande active à BLN présentait une largeur maximale de 1923 mètres au PK 137 et une largeur moyenne de 1309 mètres (Gaydou, 2013a). A cette même période, plusieurs digues submersibles et insubmersibles, ainsi que des digues basses en aval, isolaient déjà d'anciens bras de tressage. Une forêt alluviale était essentiellement établie à proximité de ces bras. Ailleurs, la plaine était utilisée à des fins agricoles. L'urbanisation était peu développée, seul le village de Baix se situait à l'intérieur de la Bande Active Historique (BAH).

Entre 1860 et 1880, des aménagements Girardon ont été implantés le long des deux rives. Ils sont présents sur un linéaire d'environ 10 km, soit l'intégralité du tronçon étudié. Ils ont alors favorisé la réduction de la largeur du chenal principal (voir section 4.1.1), le piégeage de sédiments fins dans les marges alluviales, leur assèchement (la superficie des îlots a diminué de 20%) et leur boisement (augmentation de la surface de la forêt alluviale de 80%) (Gaydou, 2013a).

Progressivement l'urbanisation se développe dans la plaine, essentiellement en rive droite (2% de la BAH ; Gaydou, 2013a). Les aménagements hydroélectriques de la CNR ont été construits en 1960. Ils dérivent la majeure partie du débit dans le canal hydroélectrique. Il ne transite alors plus qu'un débit réservé dans le vieux Rhône ; ce qui conduit à la diminution de la surface en eau et à l'apparition de bancs de galets. Les aires d'activité se développent, elles

2.2. Secteur de Beaucaire



Beaucaire

Figure 3 : vue aérienne du secteur de Beaucaire (PK 258.5 à PK 280.5). Source : IGN (2017)

En 1860, la bande active du Rhône présente une largeur maximale de 1500 mètres au PK 265 et une largeur moyenne de 1105 mètres. La bande active de tressage, représentait 31% de la BAH tandis que la surface des bancs de galets correspondait à 10% (Gaydou, 2013b). La forêt alluviale était située principalement à proximité de la bande active de tressage. La plaine était occupée par l'agriculture.

Entre 1860 et 1880, des aménagements ont été implantés le long des deux rives. Ils sont présents sur un linéaire de 5,4 km, soit 74% de la longueur du tronçon court-circuité (Gaydou, 2013b). Suite à ces aménagements, des Casiers Girardon ont été réalisés à partir de la fin du 19ème siècle ; leur construction sera achevée dans la première moitié du 20ème (Raccasi, 2008). Ces aménagements ont favorisé la réduction de la largeur du chenal principal, le piégeage des sédiments dans les marges alluviales, leur assèchement (la superficie des lînes a diminué de 98% ; Gaydou, 2013b) et leur boisement. Les bancs de galets situés sur les marges du chenal se boisent tandis que ceux qui étaient présents dans le chenal sont évacués vers l'aval. Progressivement, les villes de Beaucaire et de Tarascon se développent.

Les aménagements hydroélectriques de la CNR ont été construits en 1970. Ils dérivent la majeure partie du débit dans le canal hydroélectrique. Il ne transite plus qu'un débit réservé dans le vieux Rhône conduisant à la diminution de la surface en eau. L'urbanisation et les aires d'activité se développent à proximité des deux villes de Beaucaire et Tarascon. Elles représentent 25% de la superficie de la BAH en 2006 (Gaydou, 2013b).

3. RAPPELS METHODOLOGIQUES

3.1. Planimétrie intra- et inter-secteurs (plaine et endiguements Girardon)

3.1.1. Principe de la planimétrie diachronique

L'étude de l'évolution planimétrique a été réalisée sous SIG. Plusieurs couches géomatiques ont été créées selon les procédés de géoréférencement, de photo-interprétation et de digitalisation détaillés dans le livrable II.1 de l'OSR4 (Seignemartin *et al.*, 2018) ainsi que dans Tena *et al.* (2020). Ils ont été adaptés aux sites d'étude du présent rapport. Le résultat est une représentation vectorielle de la bande active à différentes dates au cours de la période étudiée (Figure 4). Cela permet de connaître l'évolution planimétrique du tronçon à la suite de la construction des différents aménagements hydrauliques.

Dans le cadre de ce travail, entre 5 et 40 points d'amer ont été identifiés pour le géoréférencement des cartes anciennes, en fonction de l'échelle et de la surface cartographiée, et 15 points d'amer en moyenne pour les images aériennes historiques.

La digitalisation des bandes actives a été effectuée à une échelle entre 1:2000 et 1:5000 pour les cartes anciennes, et entre 1:500 et 1:2000 pour les images et orthophotographies aériennes.

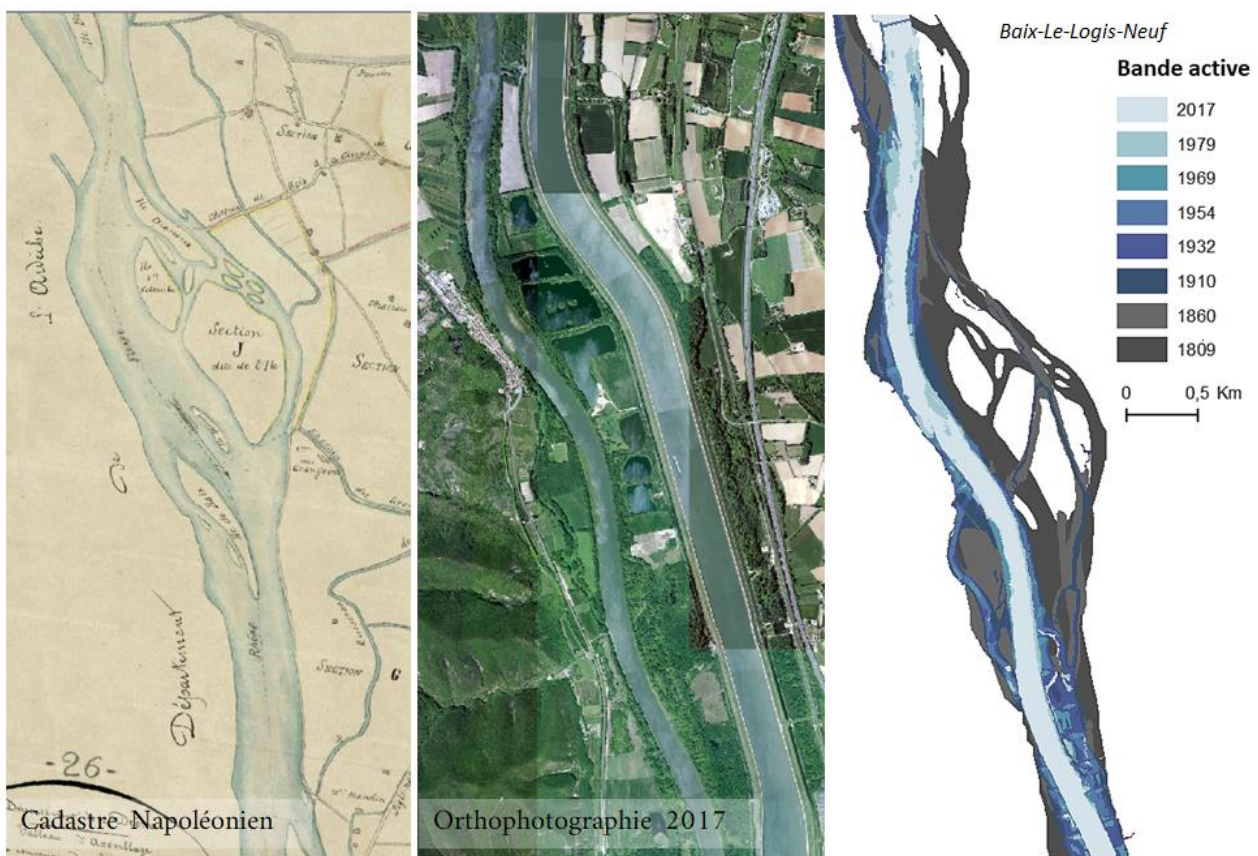


Figure 4 : exemples de cartes et orthophotographies géoréférencées à Baix-Le-Logis-Neuf ; et résultat de la vectorisation de la bande active à différentes dates

A partir des bandes actives, une analyse détaillée de l'évolution entre ces dates a permis de mieux comprendre les patrons spatiaux et temporels de sédimentation et l'atterrissement progressif dans les différents compartiments fluviaux du lit majeur. Ainsi, ont été distinguées 3 unités géohistoriques en fonction des périodes de sédimentation :

- les **unités « pré-Girardon »**, c'est-à-dire les surfaces qui ont été déconnectées avant et lors des aménagements Girardon, spécifiquement entre 1809 et 1910 environ ;
- les **unités « pré-barrage »**, c'est-à-dire les surfaces qui ont été atterries entre les aménagements Girardon et hydrauliques, spécifiquement entre 1910 et les années 60-70 environ ;
- les **unités « post-barrage »**, c'est-à-dire les surfaces qui ont été atterries à la suite de la construction de l'aménagement hydraulique et de la progression de l'évolution de la bande active vers des surfaces terrestres, spécifiquement entre 1960-70 et 2017.

3.1.2. Planimétrie diachronique à Baix-Le-Logis-Neuf

L'analyse diachronique du secteur de Baix-Le-Logis-Neuf a été effectuée à partir de 8 dates (1809-1860, 1860, 1910, 1932, 1954, 1969, 1979 et 2017).

Le cadastre napoléonien (levé dans le premier tiers du 19ème siècle) et la carte de 1860 permettent de caractériser le tracé en plan du chenal avant les aménagements Girardon, alors que les cartes des Plans Branciard (1910) permettent d'avoir un état postérieur à ces aménagements. La série de photos de 1932 permet de définir un état du cours d'eau intermédiaire entre les deux aménagements, alors que la série de photos de 1954 permet l'observation de l'état avant la mise en service du barrage de Pouzin (1960). Les séries de 1969 et 1979 donnent un aperçu de l'état et de son évolution respectivement une dizaine et une vingtaine d'années après la construction de l'ouvrage. La série de 2017 correspond à la date la plus récente disponible.

3.1.3. Planimétrie diachronique à Beaucaire

L'analyse diachronique du secteur de Beaucaire a été effectuée également à partir de 8 dates (1812-1836, 1876, 1906-07, 1942, 1962, 1975, 1984 et 2017).

Comme pour BLN, le cadastre napoléonien levé dans le premier tiers du 19ème siècle et la carte de 1876 permettent de déterminer le tracé en plan du chenal avant les aménagements Girardon, alors que les cartes des Plans Branciard (1906-07) permettent d'avoir un état postérieur à ces aménagements. La série de photos de 1942 permet de définir un état du cours d'eau intermédiaire entre les deux aménagements, alors que la série de photos de 1962 permet l'observation de l'état avant la mise en service du barrage de Vallabrègues (1970). Les séries de 1975 et 1984 donnent un aperçu de l'état et de son évolution respectivement 5 et 14 ans après la construction de l'ouvrage. La série de 2017 correspond à la date la plus récente disponible.

3.2. Sondages à la perche

Afin d'analyser la sédimentation historique, une campagne de terrain a permis d'informer les différents compartiments alluviaux. Les sondages à la perche permettent de déterminer les épaisseurs de sédiments fins surplombant le stock alluvial grossier et d'en déduire la délimitation du toit de galets (Figure 5). La technique des « sondages à la perche » consiste à enfoncer manuellement un train de tiges en acier dans le sol jusqu'à atteindre le toit des alluvions grossières. Une fois le toit de graviers atteint, la perche bute sur la surface solide en galets correspondant à l'ancien lit du Rhône (avant aménagement).



Figure 5 : photo illustrant l'étagement ancien lit du Rhône – surcouche de fines

En 2019, la CNR a déjà effectué 102 points de sondage de 10 à 500 cm de profondeur sur les deux rives le long du vieux Rhône, dans les secteurs de « Saulce » (rive gauche) et de « l'île du Gouvernement » (rive droite), comme le montre la Figure 6 (zone rose). L'échantillonnage spatial a été stratifié selon la chronologie d'atterrissement obtenue lors de l'analyse planimétrique.

Au cours de la nouvelle campagne de terrain, réalisée du 10 au 12 mars 2020 pour répondre aux objectifs de l'action A2.1 du programme OSR5, 55 nouveaux sondages ont été réalisés le long de transects spécifiques. Trois nouveaux sites ont été sélectionnés pour l'étude (Figure 6). Les sites BLN 1 et BLN 2 (Figure 6, zones bleues et rouges) sont importants pour

connaître la profondeur des sédiments grossiers qui peuvent être potentiellement remobilisés afin de pouvoir accompagner la définition des actions de restauration de la dynamique latérale sur ces zones. Le site BLN3 (Figure 6, zone en vert) est également intéressant pour vérifier le patron de sédimentation et d'atterrissement des casiers et marges fluviales à la suite des travaux déjà effectués sur les autres secteurs dans le cadre de l'OSR3 et 4.

Au total, 13 transects ont été levés : T1 à T5 sur BLN1, T6 à T10 sur BLN2 et T11 à T13 sur BLN3. Pour sélectionner ces transects, les 3 types d'unités (décrites en section 3.1.1.) ont été analysés. Elles correspondent à 3 périodes différentes en termes de dynamique de sédimentation des marges et d'évolution du fleuve.

En effet, ces unités géohistoriques, calquées sur la chronologie d'aménagement, renvoient à des dynamiques sédimentaires distinctes, affectant la nature et le volume des sédiments stockés sur les marges alluviales (cf. rapports OSR 4). De ce fait, afin d'être les plus représentatifs possibles du milieu alluvial rhodanien, les sondages à la perche ont été l'objet d'un échantillonnage stratifié selon ces unités géohistoriques.

Pour réduire les incertitudes et permettre une meilleure couverture, deux points de sondage ont été retenus pour chaque unité traversée par un transect (cercles en bleu, rouge et vert sur la Figure 6 (b, c et d)). En plus des points de sondage, deux points à BLN3 ont été sélectionnés pour effectuer les profils verticaux (carottes sédimentaires ; Figure 6 (d), étoile verte). Les données des sondages à la perche ont ensuite été couplées aux données topographiques issues de la BDT Rhône et au niveau du talweg connu, afin de visualiser dans l'espace (pour les transects) et longitudinalement leur distribution et permettre d'estimer les volumes de sédiments stockés dans les différentes unités.

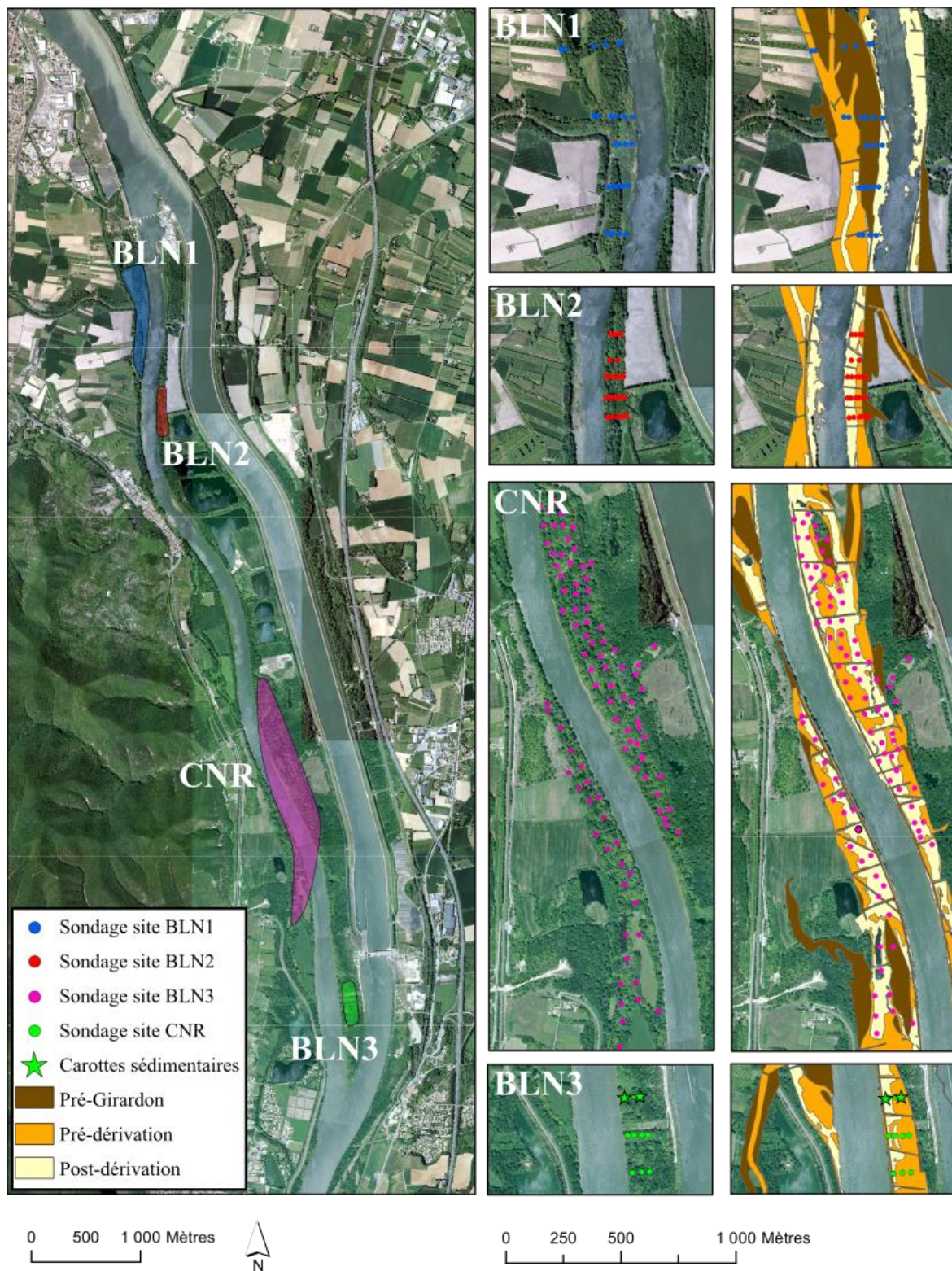


Figure 6 : localisation des sondages à la perche à Baix-Le-Logis-Neuf : sous-secteurs BLN1, BLN2, BLN3 et CNR

A Beaucaire, 12 transects ont été prédéfinis : T1 et T2 sur BEC1, T3 à T5 sur BEC 2 T6 à T9 sur BEC 3 et T10 à T12 sur BEC 4. Néanmoins, sur un échantillonnage prévu de 76 points de sondage, seuls 31 ont pu être réalisés en raison de l'annulation des campagnes de terrain du fait des restrictions sanitaires (2020) et des conditions hydrologiques. En effet, le secteur de BEC présente une grande partie de son tracé en Rhône total, tronçon sur lequel il est risqué d'accéder aux marges alluviales pour des débits supérieurs à 1200-1500 m³/s. A titre indicatif, l'unique mission menée à bien (qui a permis de relevés les 31 points) a été effectuée pour des débits journaliers moyens avoisinant les 800 m³/s. La Figure 7 présente ainsi les sondages réalisés.

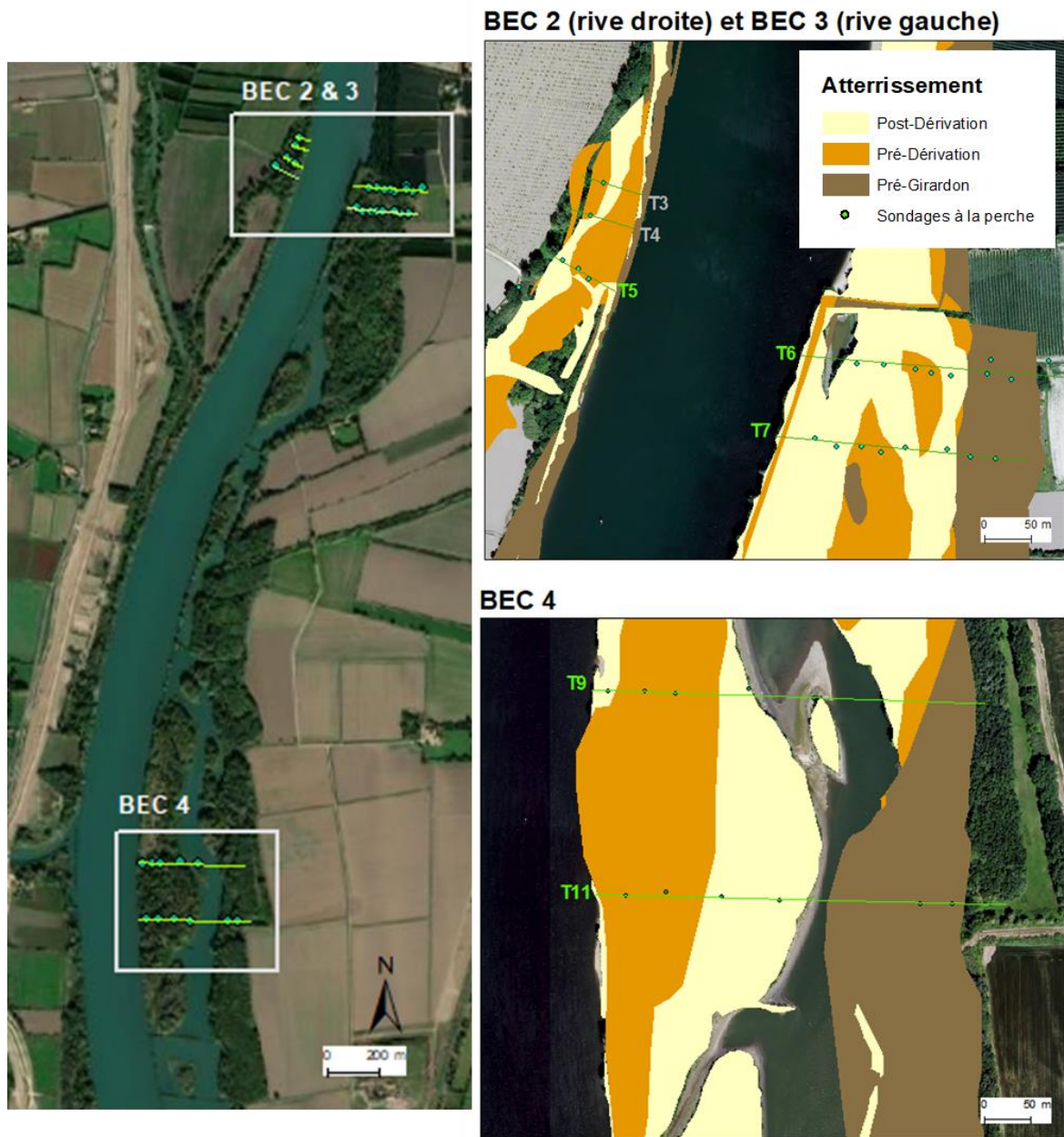


Figure 7 : localisation des sondages à la perche à Beaucaire lors de la campagne OSR5

3.3. Estimations des volumes de sédiments fins et grossiers

Il est possible d'obtenir des estimations des volumes de sédiments fins et grossiers stockés au niveau des marges alluviales en combinant :

- le MNT Lidar,
- le niveau du toit de galets obtenu par sondage à la perche,
- le talweg nous permettant de déterminer un « fond de vallée ».

En effet, la différence entre altitude du toit de galets et altitude de surface (MNT LIDAR) donne une estimation des épaisseurs de sédiments fins. La différence entre le « fond de vallée » et le toit de galets donne une estimation des épaisseurs théoriques de sédiments grossiers. En les confrontant à l'emprise surfacique des entités géohistoriques, on en déduit des volumes sédimentaires correspondants.

Les altitudes du thalweg utilisées proviennent de la base de données de Parrot (2015) (Figure 8). Comme il y avait des lacunes entre les PK 133 à 145 (le site BLN), une courbe polynomiale a été ajustée sur l'évolution longitudinale des altitudes afin de recalculer les valeurs manquantes (la ligne grise).

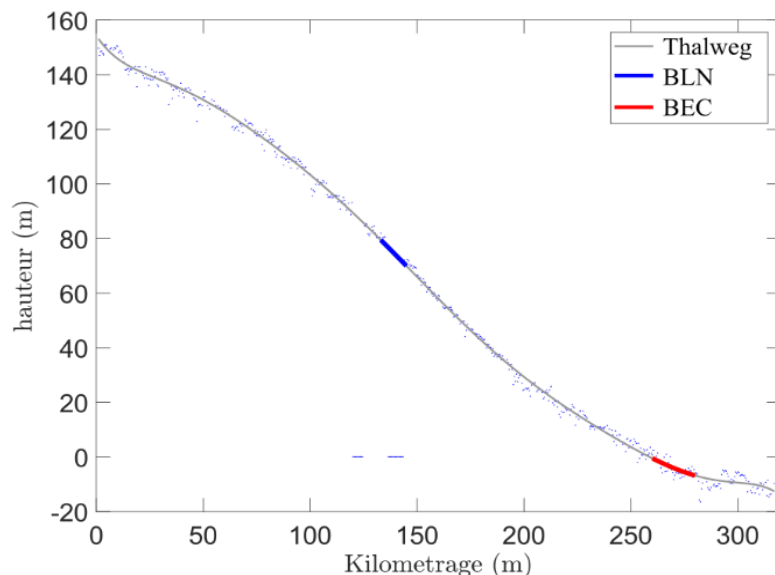


Figure 8 : thalweg du Rhône depuis Lyon

3.4. Transects au radar géologique (plaine et endiguements Girardon)

La caractérisation de la structure du sol par radar pédologique (Ground Penetrating Radar) est une méthode géophysique non invasive. Le GPR fournit des images à haute résolution de structures souterraines peu profondes et est souvent employé lors d'études sédimentologiques (Davis *et al.*, 1989 ; Beres et Haeni, 1991 ; Gawthorpe *et al.*, 1993). Le GPR est basé sur un principe de réflexion du signal (dans la lignée des techniques de réflexion sismique et de sonar) mais pour sa part, il utilise un rayonnement électromagnétique. En effet, des impulsions discrètes d'énergie électromagnétique haute fréquence (MHz) sont générées et transmises dans le sol. Elles sont partiellement réémises lorsqu'elles traversent l'interface de couches de sol aux propriétés diélectriques différentes. La technique GPR permet d'évaluer la structure des sédiments jusqu'à une profondeur de 10 à 20 m. Cette limite n'a pas d'impact sur notre étude car les structures sédimentaires qui nous intéressent sont situées au-dessus du toit de gravier lui-même situé à moins de 10 m de profondeur. Aussi, la fréquence d'émission affecte la résolution verticale de l'image GPR, qui varie de 10 cm à 1 m (Jol, 1995). Les images sont acquises dans le cadre du programme OSR5 par l'équipe de l'ENTPE (ENTPE, UMR 5023 LEHNA) qui a utilisé une

structure GSSI SIR 3000 (Geophysical Survey Structure Inc., Salem, USA), avec une antenne blindée à une fréquence centrale de 200 MHz en mode monostatique.

Sur les radargrammes, les réflecteurs sont des tracés correspondant aux lignes de réflexion du signal traduisant un changement de structure/texture dans le sol. L'étude des particularités de ces radargrammes et de ces réflecteurs permet d'interpréter ainsi les profils GPR et les structures sédimentaires associées sur une profondeur donnée.

La compilation et la juxtaposition des signaux enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permettent d'obtenir un profil 2D appelé radargramme (Figure 9). Sur ce profil 2D vertical, les réflecteurs correspondent aux lignes de réflexion du signal associées au changement de structure et/ou de texture dans le sol. Le radargramme rend ainsi compte, sur une « coupe » verticale, des principales structures sédimentaires et donne une idée de la nature du dépôt (Vauclin, 2020b ; Regli *et al.*, 2002 ; Beres *et al.*, 1999).

La relation entre structures sédimentaires, la texture, la présence et la densité de réflecteurs des radargrammes a été approfondie au sein de l'étude de Vauclin *et al.* (2020b). Des transects GPR ont été couplés à des carottes sédimentaires afin de valider la complémentarité des approches et de caractériser la dynamique sédimentaire de la plaine alluviale (principalement en dehors des infrastructures Girardon).

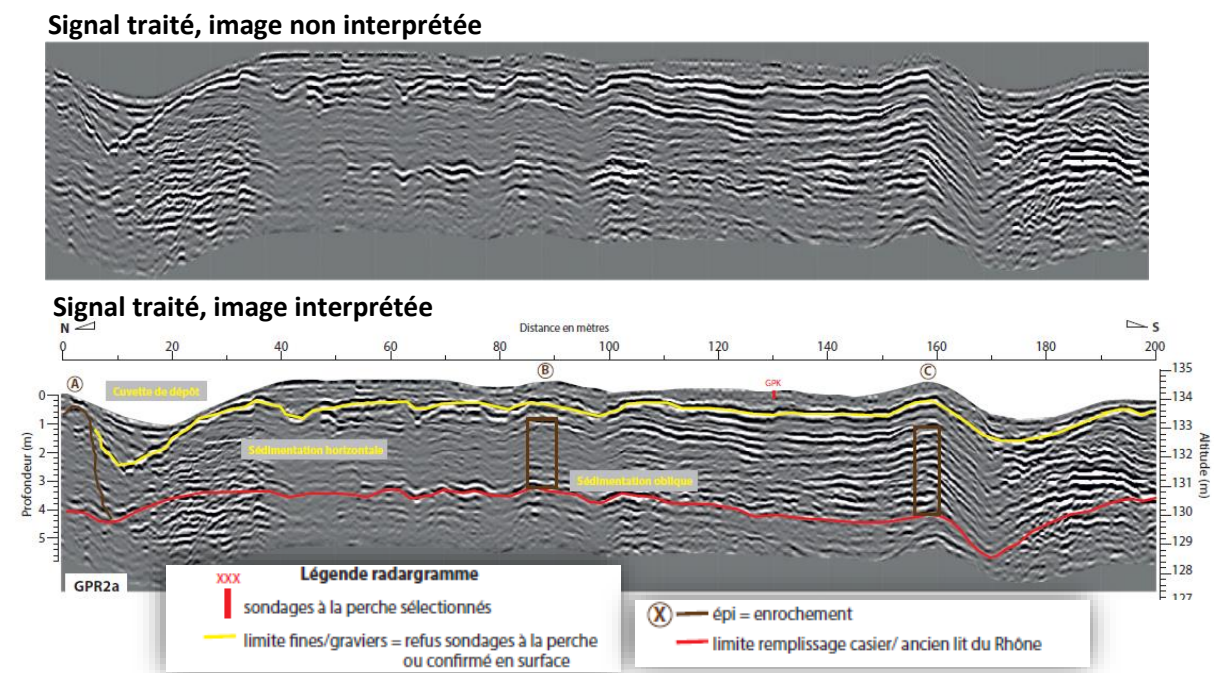


Figure 9 : traitement et interprétation du signal GPR (par T.Winiarski, pour l'OSR4, 2018)

Au niveau de BLN, les transects ont été effectués en rive droite du Rhône, au niveau de deux zones recoupant diverses entités géohistoriques (Figure 10). La zone 1 est située en aval du barrage au niveau du PK 136. La seconde zone est localisée au niveau des PK 137 et 138.

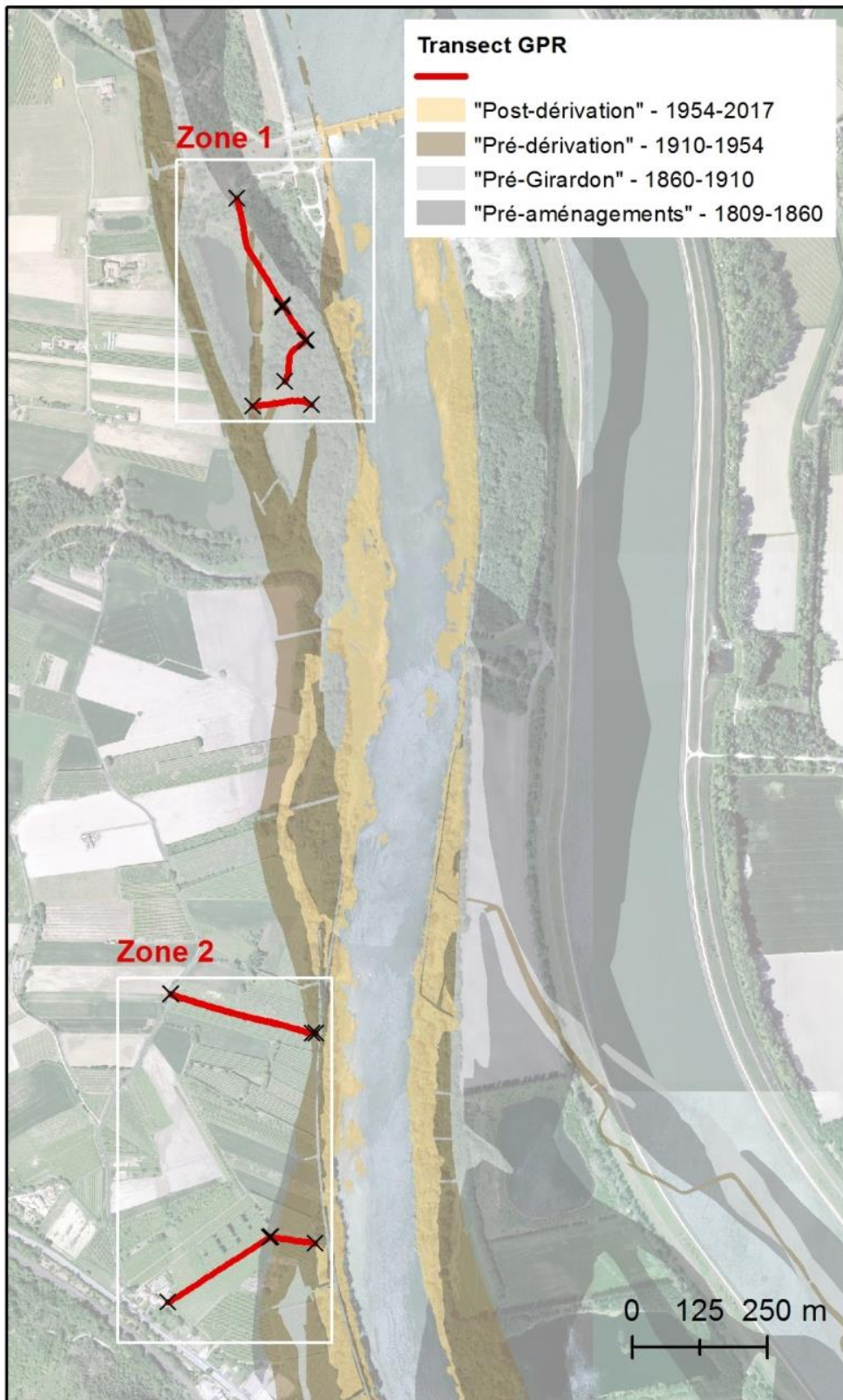


Figure 10 : localisation des transects GPR à Baix-Le-Logis-Neuf

Les profils GPR effectués à BEC (Figure 11) sont en cours d'analyses et les résultats seront présentés dans le rapport complémentaire prévu pour l'automne 2021.

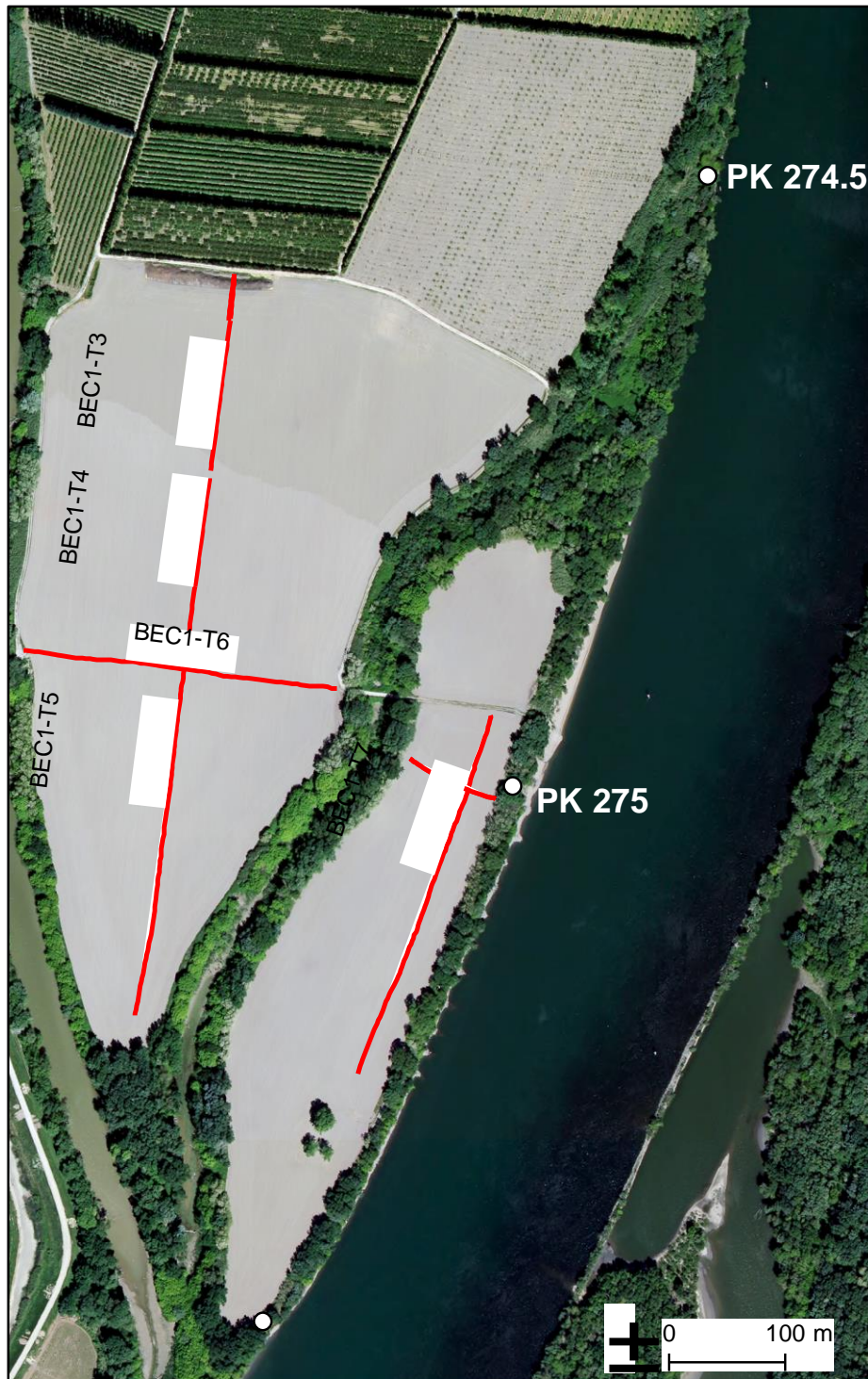


Figure 11 : localisation des transects GPR à Beaucaire (PK 274.5)

3.5. Carottage sédimentaire & analyses en laboratoire

L'emplacement des carottages a été choisi afin qu'ils soient représentatifs de milieux sédimentaires spécifiques (plus ou moins connectés au Rhône) et historiquement bien contextualisés. Les carottes ont

été effectuées à l'aide d'un carottier motorisé à percussion, modèle Cobra TT. Elles ont été conditionnées et annotées avant d'être destinées à différentes analyses agendées selon les conditions établies du report (granulométrie, chimie). Les carottes sont en cours d'analyses et les résultats seront présentés dans le rapport complémentaire prévu pour l'automne 2021.

3.6. Chimie élémentaire des sédiments de la plaine alluviale (profils sédimentaires)

L'échantillonnage des sédiments a été réalisé de la surface au toit des graviers grâce à une tarière pédologique manuelle (en échantillonnant par section de 20 cm) de manière à obtenir des profils verticaux de sédiments (Figure 13).

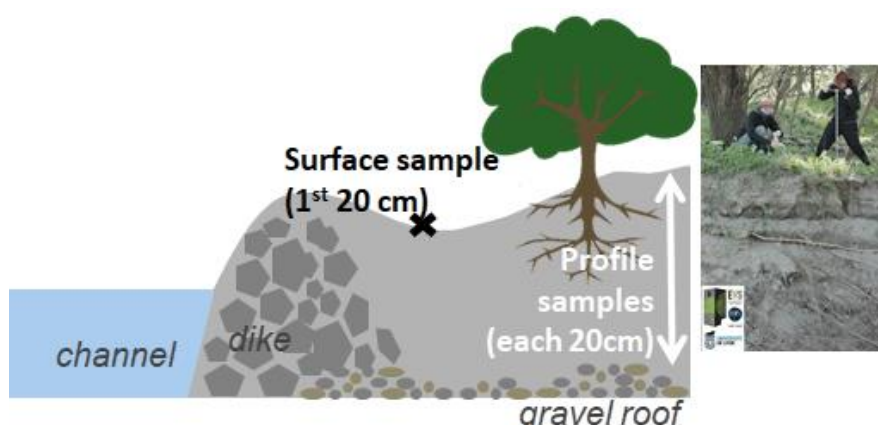


Figure 12 : Modalités de prélèvements à la tarière pédologique des échantillons sédimentaires

Les analyses chimiques des prélèvements effectués au carottier pédologique ont été réalisées grâce à un spectromètre à Fluorescence X portatif (XRF) au sein du laboratoire EVS. De marque *Spectro*, modèle *xSort*, il utilise le programme « Enviro-H ». Il est paramétré pour effectuer un screening de l'ensemble des éléments de la matrice analysée. Chaque résultat d'analyse XRF (teneur) est une moyenne réalisée sur un triplicat.

Le traitement a été effectué de manière ex-situ, les échantillons ont été séchés et tamisés (<63 μ m) (selon le protocole présenté dans le livrable N°1 de l'axe 2 d'OSR4) afin de pouvoir disposer d'un signal correspondant à une fraction granulométrique. Ce protocole résout les problèmes liés à la variabilité du taux d'humidité et atténue l'effet de la granulométrie. En effet, les grains (à partir des sables) induisent des porosités dans les matrices, ce qui modifie la densité de l'échantillon et affecte le signal.

Afin de vérifier la teneur en ETM (éléments traces métalliques) par XRF et de confirmer les concentrations obtenues, des analyses quantitatives par ICP-MS et ICP-AES ont été effectuées. Les coefficients de corrélation entre les estimations des techniques ICP et XRF ont été calculés pour l'ensemble des éléments détectés. Les corrélations sont bonnes pour 6 éléments : Zn, Pb, Cu, Ni, Sr, Fe. Les teneurs sont alors corrigées par le jeu d'équations obtenues (cf. livrable N°1 de l'axe 2 d'OSR4).

4. TABLEAUX ET CARTES, RECAPITULATIFS DES DONNEES UTILISEES/PRODUITES

Tableau 1 : jeu de données SIG

Type de données	Secteur	Dates	Formats
Archives cartographiques/ géographiques géoréférencées et digitalisées	BLN	1809-60, 1860, 1910, 1932, 1954, 1969, 1979, 2017	Images : Tiff, Jpeg
			Digitalisation : Shape
Archives cartographiques/ géographiques géoréférencées et digitalisées	BEC	1812-1836, 1876, 1906-07, 1942, 1962, 1975, 1984, 2017	Images : Tiff, Jpeg
			Digitalisation : Shape
LiDAR de la BDT Rhône	BLN, BEC	2010	Raster

Tableau 2 : détail du jeu de données photographiques

Station	Echelle	Date	Débit (m ³ /s)	Date de Construction du barrage	Années avant/après barrage
Le Rhône à Viviers V4530010 Ardèche (07) Qmoy=1480 m ³ /s [1420~1530]	1:15300	1932/06/05	1690	1960	-28
	1:25400	1954/06/18	1040		-6
	1:16000	1969/06/03	1380		9
	1:71900	1979/07/17	1020		19
		15/05/2017	1340		57
Le Rhône à Beaucaire V7200010 Gard (30) Qmoy=1700 m ³ /s [1630~1760]	1:24500	1942/06/18	1640	1970	-28
	1:25500	1962/06/23	1630		-8
	16000	1975/06/04	1930		5
	30300	1984/04/28	1730		14
		2017/04/17	535*		47

*Pour 2017 la valeur de débit n'était pas disponible pour la station sélectionnée. La station située à Tarascon (Le Rhône à Tarascon [Beaucaire-Tarascon] V7200015) a donc été utilisée. Bien que le débit soit significativement plus faible par rapport aux valeurs moyennes, l'emprise des surfaces aquatiques sur les orthophotos se situe dans la plage de niveau moyen ; permettant ainsi une validation visuelle.

Les images LiDAR de la BDT Rhône de l'IGN[®] ont été utilisées pour caractériser la topographie de surface des sites d'étude (Tableau 1) afin de justifier le choix des sites où effectuer le terrain (

Tableau 3).

Tableau 3 : jeu de données terrain

Nom de l'échantillonnage	Secteur	Type	Nombre de prélèvements	Types d'analyses effectuées	Campagne –	Localisation GPS
					Référent	
Sondage à la perche à BLN	BLN	Sondage à la perche	55	Mesure épaisseur sédiment fin	EVS	OK
			102		CNR	
Sondage à la perche à BEC	BEC	Sondage à la perche	31 sur 73 prévus initialement	Mesure épaisseur sédiment fin	EVS	OK

Tableau 4 : jeu de données "Sédiments"

ID	Nom de l'échantillonnage	Secteur	Type de prélèvements	Types d'analyses effectuées	Nombre d'analyses	Matric e étudié e	Campagne –Référent	Localisatio n GPS
Sed BLN	Profils sédimentaires BLN	BLN	Tarière pédologique – tous les 20 cm	Chimie élémentaire - XRF portatif : <i>Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	25 échantillons 2 profils	63µm	EVS	OK
Sed BLN	Echantillons Lône de Geronton	BLN	Carottes	Granulométrie et chimie élémentaire, PCB et HAP	14 carottes, à hauteur de 1 à 4 analyses par carotte	2mm	CNR	CF. cartes CNR
Sed Carotte Morereau (2020)	Echantillons Mas des Tours (43.743833N, 4.626192E)	BEC (PK 275)	Carotte	Granulométrie, TOC, 137Cs, 210Pb, OBT, Zinc	1 carotte sédimentée de 1982 to 2017	2mm	Morereau (2020)	CF. cartes Morereau
Sed BEC	Profils sédimentaires	BEC	Tarière pédologique – tous les 20 cm	Chimie élémentaire - XRF portatif : <i>Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	N échantillons N profils	63µm	EVS	x

5. RESULTATS

5.1. Secteur de Baix-le-Logis-Neuf

5.1.1. Planimétrie diachronique : évolution de la bande active

L'analyse des bases de données cartographiques et photographiques a abouti à l'obtention d'une diachronie détaillée de l'évolution de la bande active et du processus d'atterrissement associé (Figure 14).

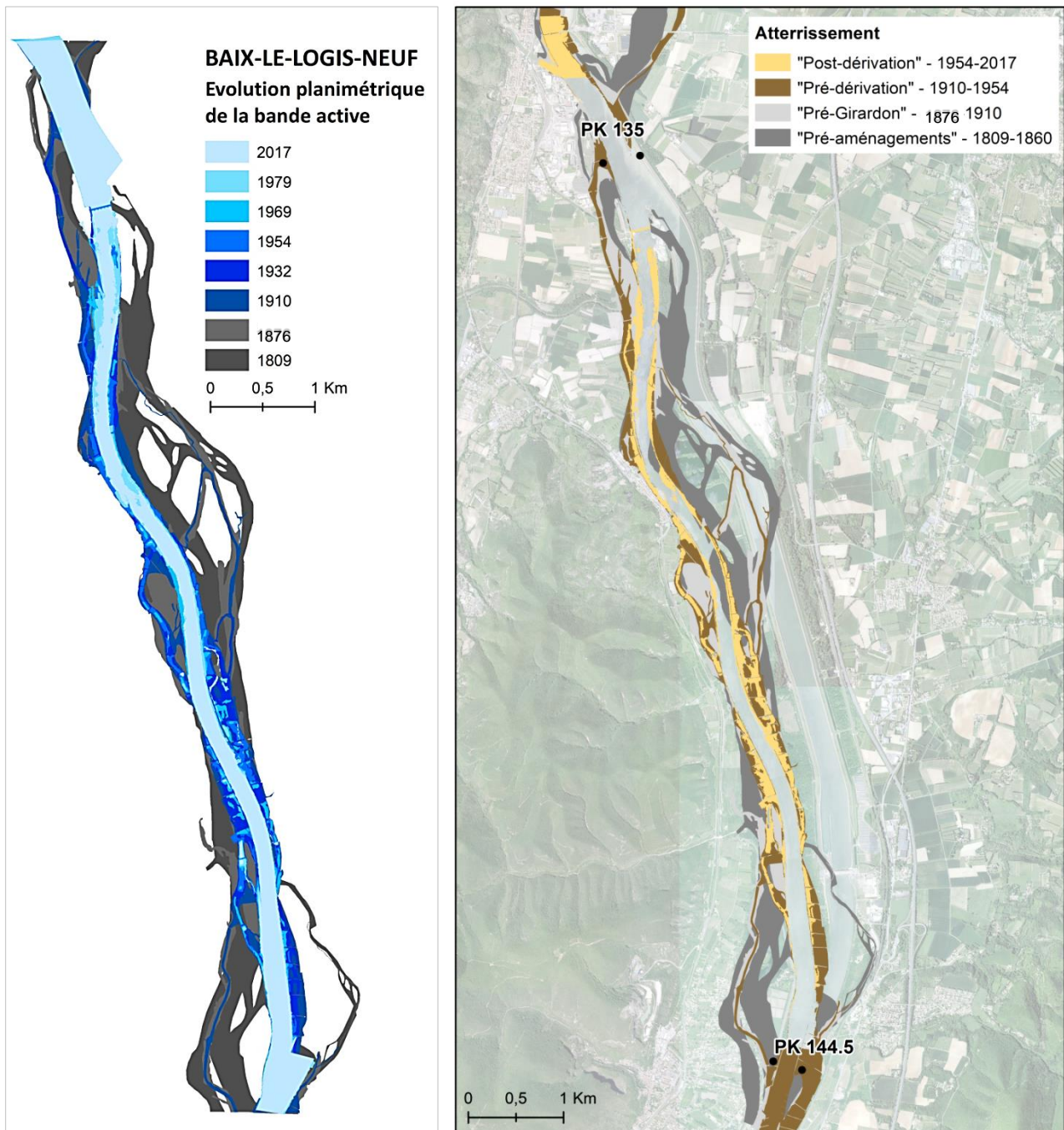


Figure 13 : évolution à Baix-Le-Logis-Neuf de la bande active du Rhône (à gauche) et processus d'atterrissement subsidiaire ordonné selon les entités géohistoriques décrites en partie méthodologique (à droite)

Une rétraction de 23 % de la bande active est observable entre la série cartographique de 1809 (BA₁₈₀₉ = 557,5 ha) et celle de 1860 (BA₁₈₆₀ = 433,4 ha). Entre 1860 et 1910, la bande active se rétracte encore de 14,9 %, passant de 433,4 ha à 369,2 ha (Figure 15).

Or, la phase de 1809 à 1876 correspond aux premiers aménagements de grande envergure (e.g. digues des pommiers en rive gauche construite datant de 1853, aux environs du PK 128.5). La réduction de 22,3 % de la bande active est concomitante à la mise en place des digues insubmersibles et submersibles, et pourrait ainsi être à l'origine de la déconnection de certains bras de tressage qui disparaissent entre les deux dates (cf. Figure 15, comparaison de la BA de 1810 et 1860).

La période de 1876 à 1905 correspond à une importante phase d'endiguement des marges alluviales (digues insubmersibles et submersibles des années 1870-1880 et mise en place des épis et ouvrages Girardon entre 1880 et 1900 ; e.g. épis noyés de Monteillet en rive droite entre 1882 et 1884, PK 130.5).

La bande active continue de se rétracter tout au long de la première moitié du 20^{ème} siècle (Figure 15). En 1932, hormis la présence de quelques rares bras encore connectés, la bande active se réduit à un chenal devenu unique (Figure 16). En 1954, la surface ne s'étend plus que sur 247,4 ha, soit 44,4 % de la surface de 1810 (Figure 15). Ainsi, entre le début du 19^{ème} et le milieu du 20^{ème} siècle, la bande active s'est déjà rétractée de 56%.

A la suite des aménagements hydrauliques de la CNR (1960), la rétraction de la bande active est plus modeste et l'atterrissement des casiers se fait en deux temps : en 1969, soit 9 ans après la construction du barrage, les casiers sont encore en eau et connectés (Figure 17). Au cours des 10 ans qui suivent (1979), les bancs et les casiers sont alors sédimentés et colonisés par la végétation.

En 2017, la bande active s'étend sur 213,3 ha et ne représente alors plus que 38 % de la bande active de 1809 ou encore 49,2 % de la bande active de 1876 (ici mentionnée pour la comparaison aux autres secteurs – PBN, PDR, MON, DZM - où l'état de 1860 correspond à l'état initial).

En 2017, la bande active présente une largeur moyenne de 199 m contre 520 m au début du 19^{ème} (estimée à partir du Cadastre Napoléonien).

BLN - Evolution de la bande active

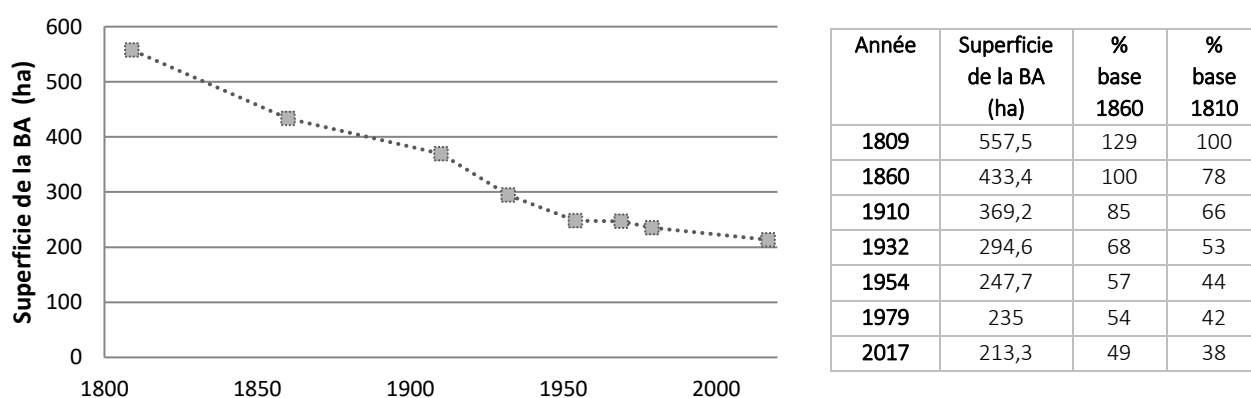


Figure 14 : évolution de la surface de la bande active à BLN
N.B. Après 1960 (dérivation), la bande active n'inclut pas la partie dérivée.

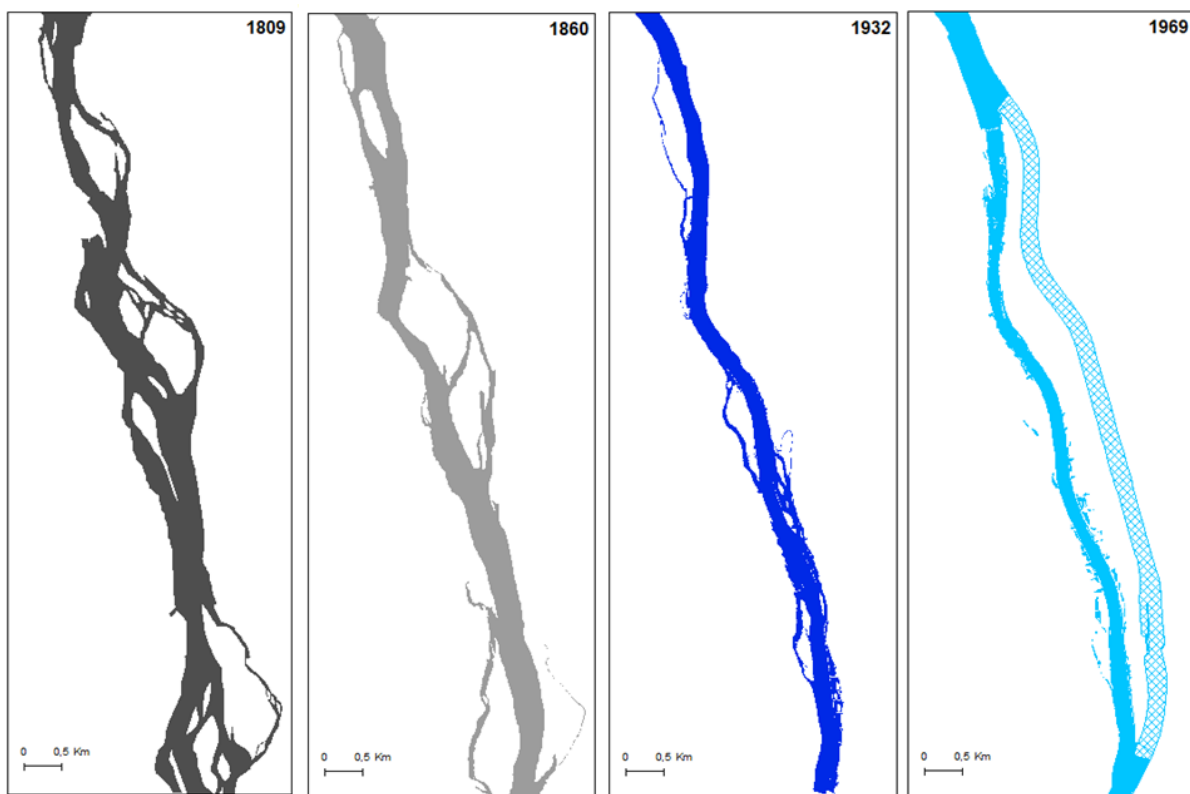


Figure 15 : cartes illustrant l'évolution planimétrique de la bande active à BLN – phénomène de rétraction et simplification morphologique entre 1809, 1860 et 1932 et 1969

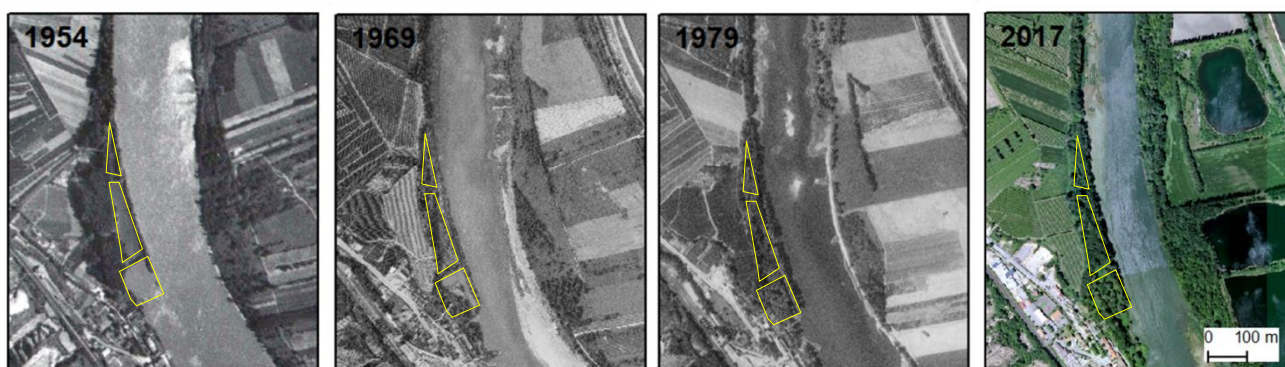


Figure 16 : série diachronique montrant l'évolution de l'atterrissement au sein des casiers Girardon (en jaune, PK 137.5)

5.1.2. Phénomène d'atterrissement des marges alluviales

L'analyse diachronique de l'évolution de la bande active à BLN a permis de caractériser les périodes d'atterrissement et de végétalisation, la surface passant alors du statut de lit mineur à celui de « lit majeur ». Dans notre contexte théorique, il est considéré que la surface devient « lit majeur » lorsqu'une végétation ligneuse s'installe, ou lorsque certaines entités sont déconnectées du chenal principal par la construction d'un ouvrage d'endiguement. Ces surfaces atterries ont été quantifiées : à BLN, elles représentent :

- 125 ha pour la période pré-Girardon (1809-1860), soit 0,24 ha/km linéaire/an.
- 64 ha pour la période « phase d'endiguement » (1860-1910), soit 0,128 ha/km linéaire/an.
- 121 ha pour la période pré-dérivation (1910-1954), soit 0,275 ha /km linéaire/an.
- 34 ha pour la période post-dérivation (1954-2017), soit 0,055 ha/km linéaire/an.

5.1.3. Stocks sédimentaires en place

Pour analyser les volumes sédimentaires correspondant aux unités géohistoriques, la topographie de surface a tout d'abord été caractérisée à partir des données LiDAR sur les transects sélectionnés. Ensuite, les épaisseurs moyennes et les volumes moyens de sédiment fin ont été calculés à partir des sondages localisés sur la Figure 17 pour les unités fluviales de sédimentation suivantes : « avant Girardon » (marron), « avant dérivation » (orange) et « après dérivation » (jaune). Pour chacun des transects (de T1 à T13), la Figure 17 permet de visualiser l'évolution de la topographie de surface (ligne noire), la profondeur mesurée via les sondages à la perche (sommet des graviers ; points colorés) et le thalweg du fleuve (ligne grise).

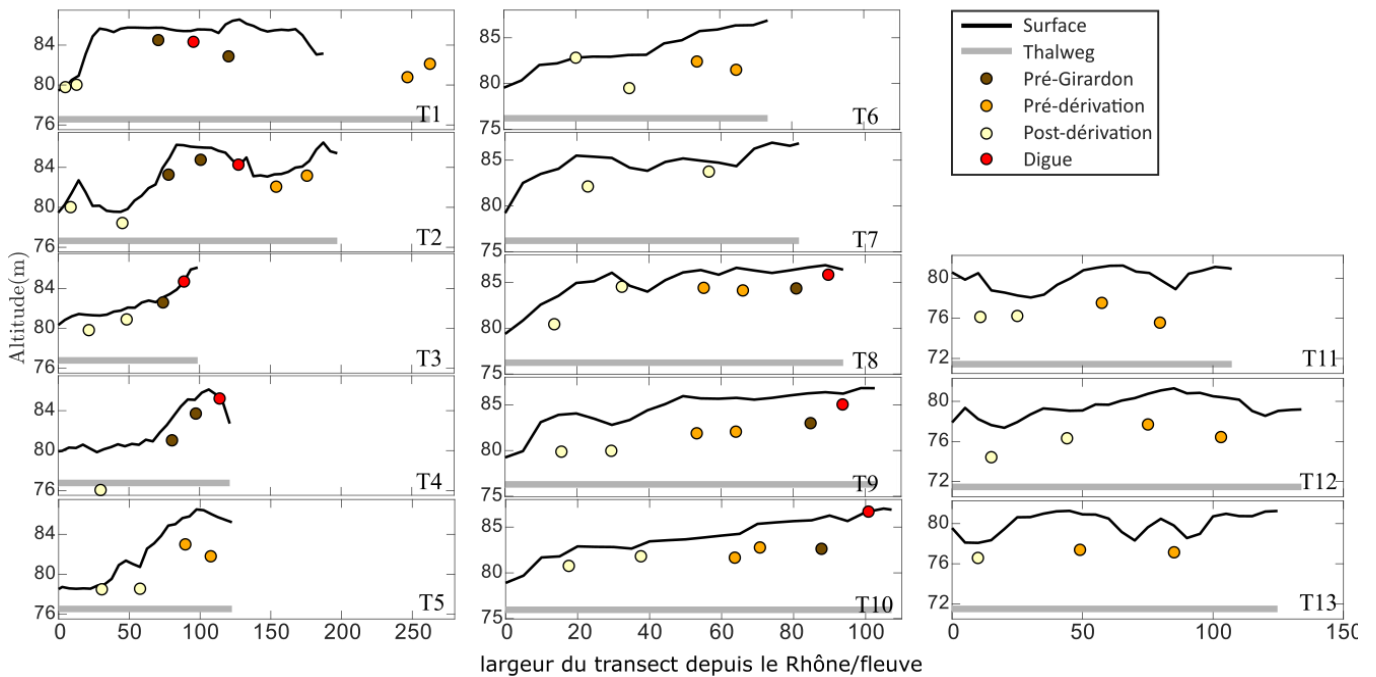


Figure 17: épaisseur des sédiments fins basée sur des mesures de terrain pour le secteur de Baix-Le-Logis-Neuf. Les transects T1 à T5 (BLN1) sont situés en rive droite, T6 à T10 (BLN2) et T11 à T13 (BLN3) en rive gauche

Comme nous disposons de l'altitude de la surface du lit majeur et celle du thalweg, ainsi que l'épaisseur des sédiments fins, il est possible d'estimer l'épaisseur de la couche sous-jacente de grossier. L'épaisseur de la couche de grossier est calculée au niveau de chacun des transects (Tableau 5).

Tableau 5 : altitude du toit de graviers et épaisseur de graviers dans les différents transects (sondages EVS)

Transect	PK	Elevation moyenne de surface	Elevation moyenne du talweg	Elevation moyenne du toit de galets	Epaisseurs de fines (m)	Epaisseurs de grossiers (m)
T1	136	85,39	78,18	82,86	2,53 ± 1,35	4,68 ± 1,4
T2	136,3	82,41	77,98	80,83	1,3 ± 0,13	2,85 ± 0,8
T3	136,4	81,89	77,89	80,84	0,83 ± 0,4	2,95 ± 1,09
T4	136,6	82,39	77,76	79,5	2,61 ± 1,38	1,74 ± 2,48
T5	136,8	83,85	77,67	81,45	2,4 ± 1,57	3,78 ± 1,01
T6	137,1	83,63	77,37	80,15	3,48 ± 0,78	2,78 ± 1,72
T7	137,2	83,97	77,1	81,97	2 ± 1,41	4,88 ± 1,15
T8	137,3	83,88	76,81	82,11	1,77 ± 0,8	5,3 ± 2,18
T9	137,4	83,61	76,54	80,96	2,65 ± 0,89	4,42 ± 2,25
T10	137,5	83,43	76,34	81,15	2,28 ± 0,86	4,81 ± 1,45
T11	142,7	81,29	73,99	77,85	3,44 ± 0,86	3,86 ± 1,17
T12	142,9	80,2	73,89	76,85	3,35 ± 0,53	2,96 ± 0,43
T13	143,1	80,2	73,81	77,24	2,58 ± 1,05	3,43 ± 0,18

Les épaisseurs moyennes des couches de sédiments fins et grossiers ont été estimées. Associées aux données planimétriques, ces différentes épaisseurs permettent d'obtenir une estimation des stocks de sédiments fins et de graviers associés à ces unités au sein du tronçon (Tableau 6 6).

L'épaisseur des sédiments fins est plutôt uniforme quelle que soit l'unité géohistorique (de 2,1 à 2,4 m). Concernant les épaisseurs de graviers, elles sont plus importantes sur les unités anciennes (pré-Girardon et pré-dérivation) que sur les unités récentes (4,4 m versus 3,2 m). Les écart-types sont plutôt équivalents et plaident en faveur d'une différence significative d'épaisseur observée entre les périodes. Les volumes estimés de sédiments fins sont plus importants sur la période pré-dérivation (épaisseur de fines et surface atterries plus importantes : en moyenne 2,4 m sur un total de 121 ha) qu'au niveau des autres unités géohistoriques. Les volumes de sédiments grossiers associés sont aussi plus importants sur cette période-là. Néanmoins, les volumes de grossiers de l'unité post-dérivation sont tout de même évalués à 1,1 millions de mètres cubes et représentent une recharge sédimentaire potentielle à la fois plus facilement remobilisable par le fleuve (unité la plus proche du chenal) et recouverte par des stocks de sédiments fins moindres.

Tableau 6 : caractéristiques des unités fluviales de sédimentation actuelles à Baix-Le-Logis-Neuf (ensemble des sondages EVS et CNR)

Unité	Surface (ha)	Ép. sédiments fins			Ép. graviers	STD (m)	Volume sédiments fins (10 ⁶ m ³)	Volume graviers (10 ⁶ m ³)
		Nombre d'obs.		Moyenne (m)				
		EVS	CNR					
Pré-Girardon (1860-1910)	64	19	7	2,3	4,4	2,5	1,5	2,8
Pré-dérivation (1910-1954)	121	19	26	2,4	4,4	2,5	2,9	5,3
Post-dérivation (1954-2017)	34	23	58	2,1	3,2	2	0,7	1,1

Afin d'évaluer la variation longitudinale des stocks sédimentaires en fonction des différentes unités géohistoriques, nous avons représenté sur un même graphique l'altitude du toit de galets

correspondant à chacune d'entre elles. Une droite de tendance longitudinale est appliquée pour chaque période (Figure 18).

La pente longitudinale moyenne du toit de galets pour les unités végétalisées lors de la phase de pré-dérivation est presque équivalente à celle du talweg (Figure 18). En revanche, on note une importante diminution de la pente longitudinale moyenne du toit de galets pour les unités végétalisées lors de la phase d'endiguement et durant celle post-dérivation. Les unités végétalisées en phase post-dérivation présentent un toit de galets significativement plus bas que lors des deux autres phases sans que le talweg lui-même soit affecté, comme le souligne l'analyse du talweg ci-dessous (cf. Figure 19). Ceci peut s'expliquer par le fait que les surfaces végétalisées en post-dérivation ne correspondent pas cette fois à des zones d'accumulation en marge du lit (comme dans le cas des zones-pré-dérivation) mais davantage au fond de l'ancien lit lui-même. Dès lors, ceci expliquerait que le toit de galet soit significativement plus bas, et ce, même sans phénomène d'incision correspondant à cette période.

En outre, on notera que globalement, BLN est un secteur qui présente peu d'incision (cf. Figure 19) :

- incision moyenne dans la période « Girardon-barrage CNR » : $-0,35\text{ m} \pm 0,58$,
- exhaussement phase « Barrage CNR - Actuel » : $0,05\text{ m} \pm 0,59$,
- incision moyenne « totale » = $-0,14\text{ m} \pm 0,7$

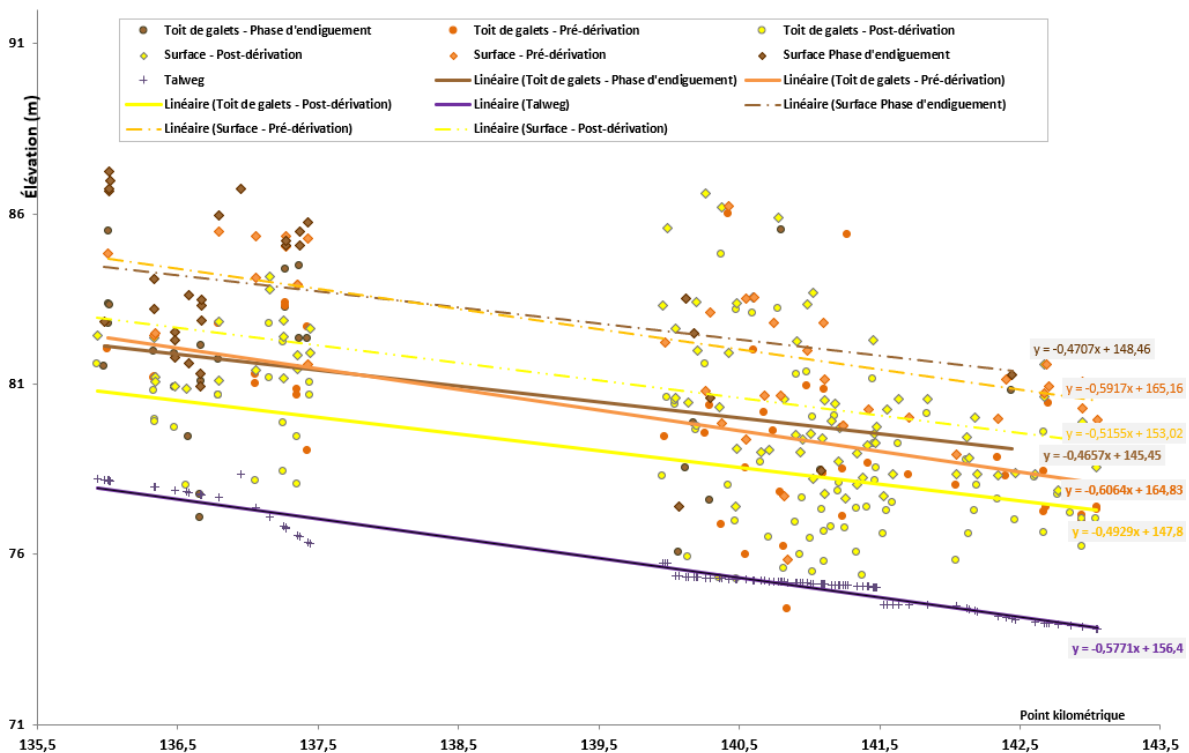


Figure 18 : profondeur des sédiments grossiers basée sur des mesures de terrain réalisées sur le site Baix-Le-Logis-Neuf. Les données incluent les sondages EVS (avant PK 138 et après PK 142) et CNR (entre PK 140 et 142)

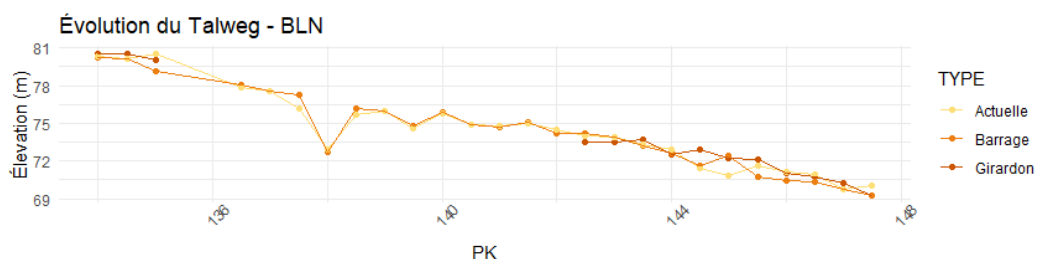


Figure 19 : évolution du talweg à BLN selon trois dates : Girardon (début 20ème), barrage (1962) et actuelle (2009) (données source : Parrot 2015)
Les données de la série « Girardon » sont manquantes entre les PK 135 et 143.

5.1.4. Analyses de subsurface : profils obtenus au radar pédologique (GPR)

Les profils GPR de la campagne de l'OSR5 sont localisés au niveau de deux zones en rive droite du Vieux-Rhône de BLN. Les huit profils obtenus (tous les radargrammes sont disponibles en annexe) permettent d'appuyer les résultats de la campagne de sondage à la perche, situant le toit de galets (ancien lit du Rhône) au niveau de profondeurs comprises entre 2,5 m et 5 m.

Sur le GPR 4 provenant de la zone 1 de BLN (Figure 21 et 22), on distingue des réflecteurs épais entre - 3 m et -1,5 m de profondeur, plus ou moins horizontaux ou obliques à d'autres endroits, avec des motifs parallèles, et sigmoïdaux (classification adaptée de Regli *et al.*, 2002). Ceci est typique de la sédimentation « ancienne », pré-aménagement et caractéristique d'un Rhône plus puissant, charriant et accumulant sur ses marges une sédimentation plus grossière. La partie supérieure, comprise entre - 1,5 m et 0 m présente des réflecteurs moins marqués, voire des zones de « réflexion faible » dont l'aspect est lisse, témoignant d'une stratification sédimentaire associée à des dépôts de sédiments plus fins. En marges du Rhône, ce type de stratification peut correspondre à des apports de particules fines (sables, limons) déposés lors des crues (Vauclin *et al.*, 2020, OSR 5 - Rapport de 2019, OSR 4 – rapports de 2018). Sur le plan géohistorique, le GPR 4 est localisé dans une zone du lit mineur de 1860 (*cf.* carte Figure 22), devenue terrestre et boisée en 1932 (*cf.* photographie Figure 22). Ainsi, la stratification « sédiments grossiers surplombés par des fines » pourrait témoigner de l'impact de la déconnexion des marges alluviales suite à la mise en place des aménagements Girardon. En effet, la zone d'étude, aquatique sur les cartes de 1860, s'atterrit puis se végétalise au début du 20^{ème} siècle. A noter qu'entre 40 et 110 m, l'occupation du sol change dans les années 1960, avec la conversion de boisements en surface agricole (*cf.* photographies Figure 22) ; ce qui rend les couches en surface difficilement interprétables sur le plan structurel.

Le GPR 8 provenant de la zone 2 de BLN (Figure 21 & 23) témoigne d'une organisation différente du fait d'anciens bras morts, ayant ainsi modifié le patron classique « étagé » (sous-couche de grossier / surcouche de fines). En effet, on discerne deux zones - entre 21 et 32m et entre 60 et 70 m - caractérisées par des faciès « lisses » entourés de faciès à réflecteurs obliques épais (Figure 23 & 24). Ce transect correspond à une partie plus ancienne de la plaine alluviale (*cf.* carte de 1860 Figure 23), située derrière des digues. On note une surcouche de fines moins importante (60 premiers centimètres) que sur le radargramme précédent. L'ensemble du transect est situé au niveau d'une zone ayant connu un changement d'occupation du sol dans les années 50-60, passant d'une zone boisée à une surface agricole (*cf.* photographies Figure 23). Ainsi, la partie superficielle du profil est là aussi difficilement interprétable sur le plan structurel.

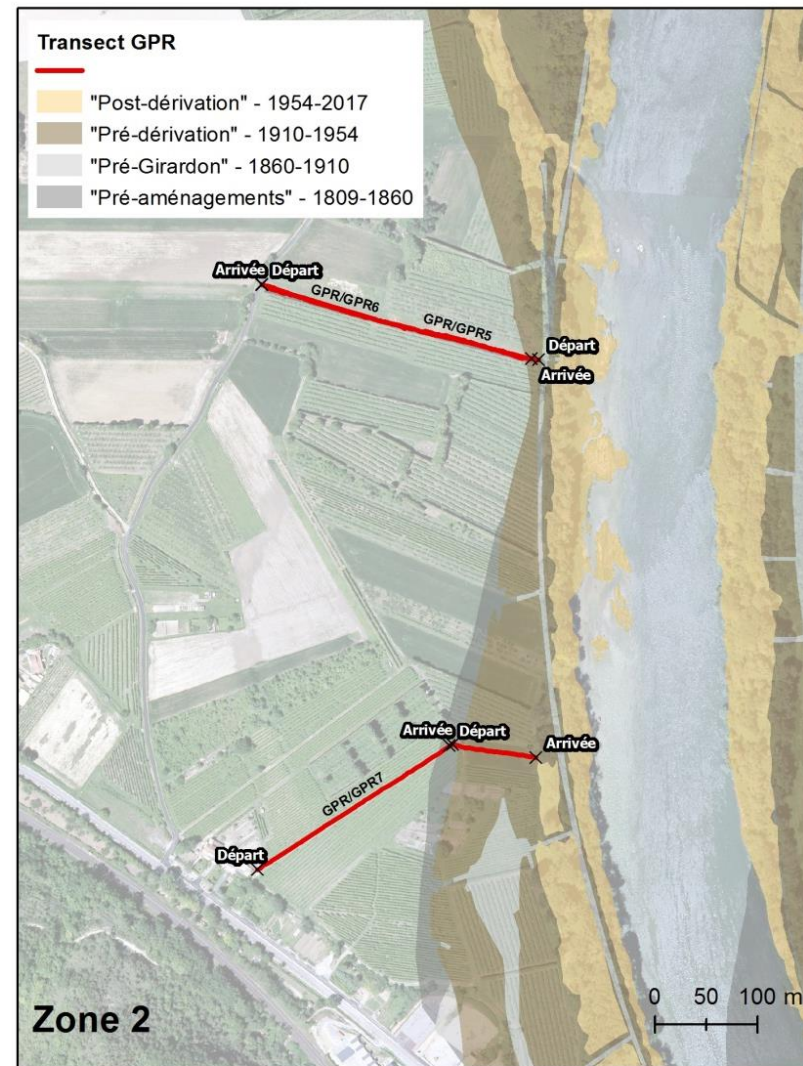
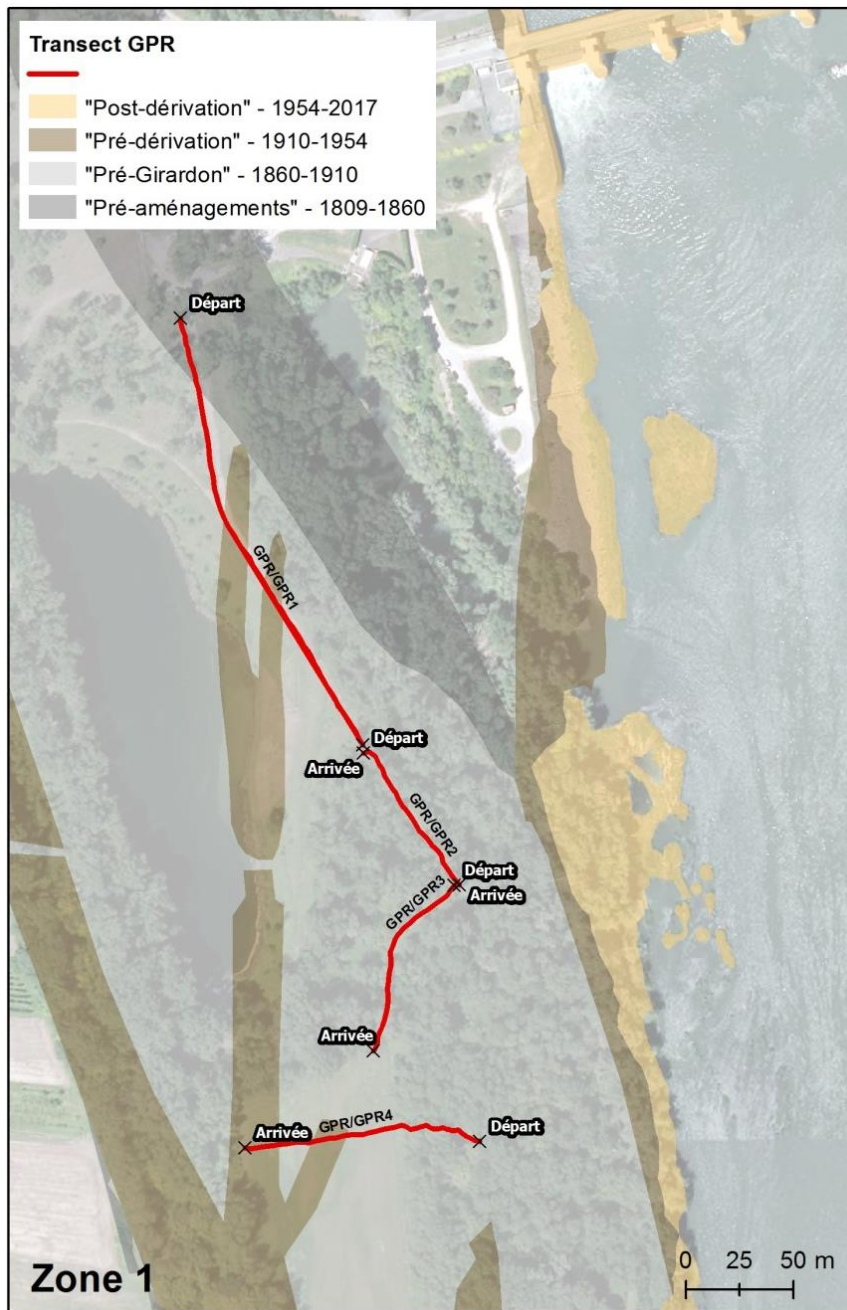
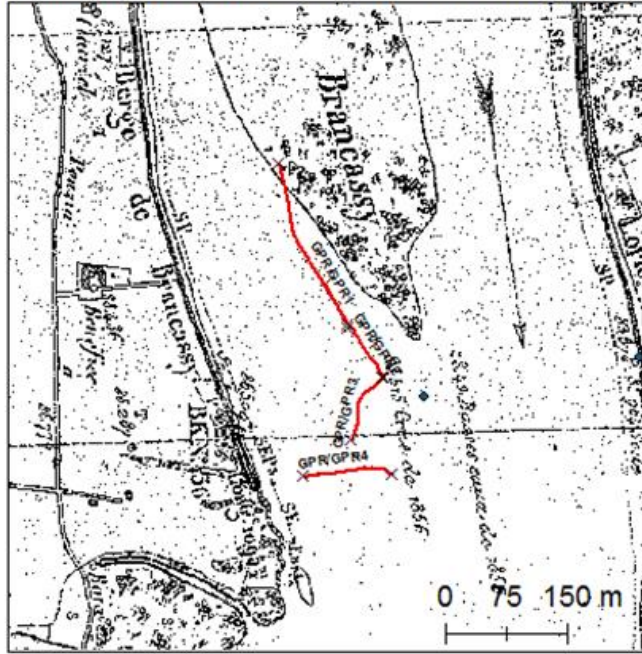
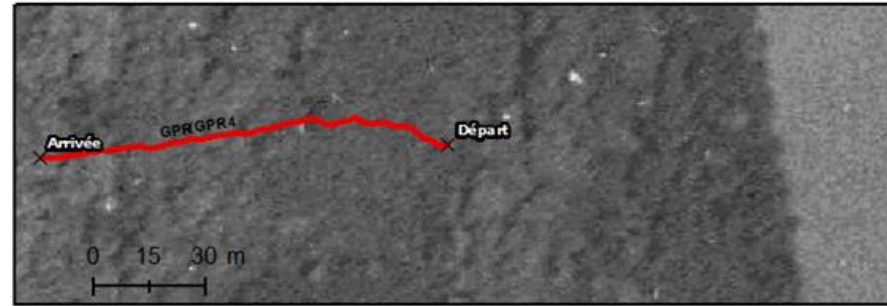


Figure 21 : cartographie des transects GPR à BLN et leur contexte géohistorique

BLN - Zone 1 - Atlas Pont & Chaussées (1860)



BLN - GPR 4 - 1932



BLN - GPR 4 - 2017



Forêt alluviale

Champs (*changement d'occupation du sol dans les années 60*)

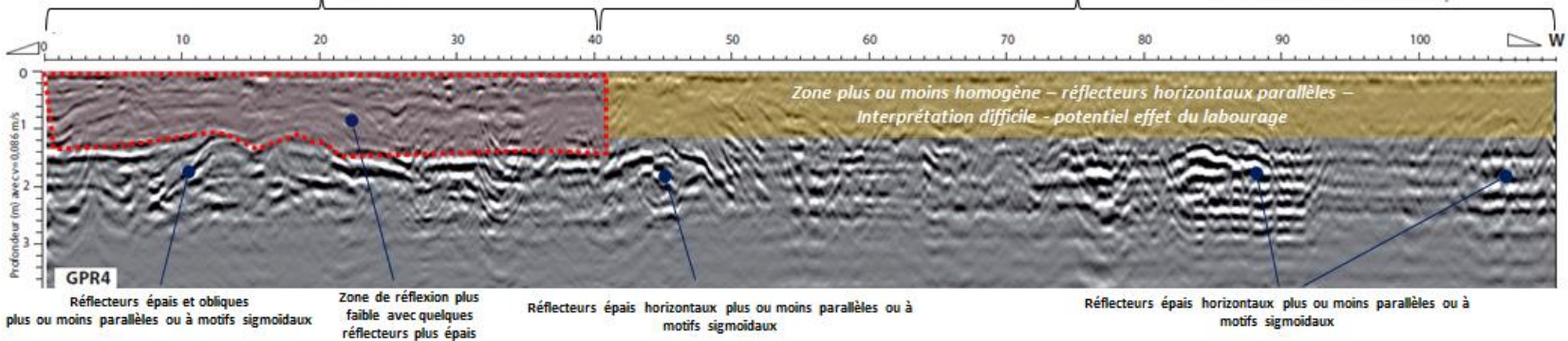
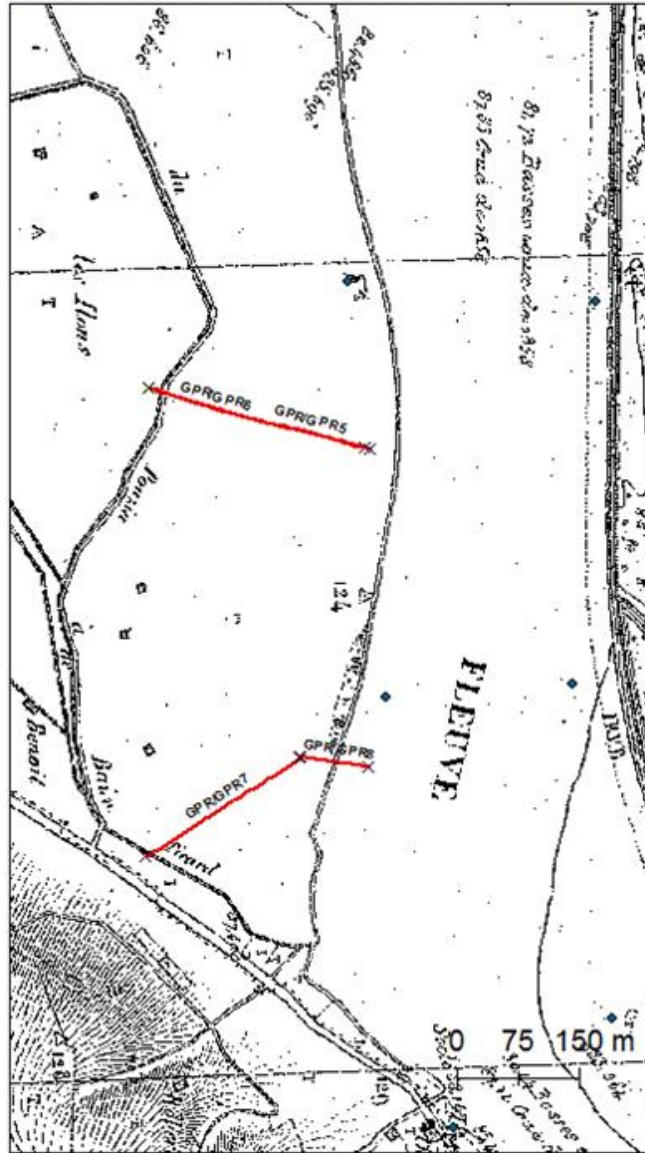
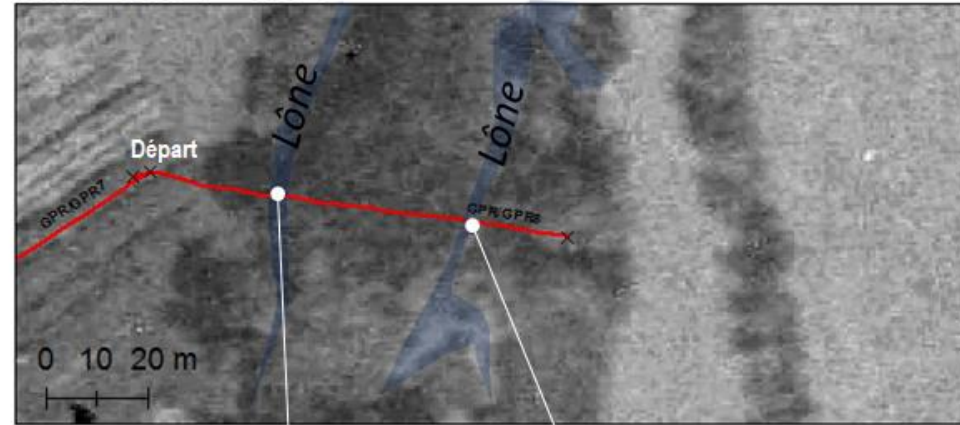


Figure 22 : contextualisation géohistorique et profil stratigraphique (version intermédiaire non détendancée) correspondant au transect GPR4 à BLN

BLN - Zone 2 - Atlas Pont & Chaussées (1860)



BLN - GPR 8 - 1932



BLN - GPR 8 - 2017

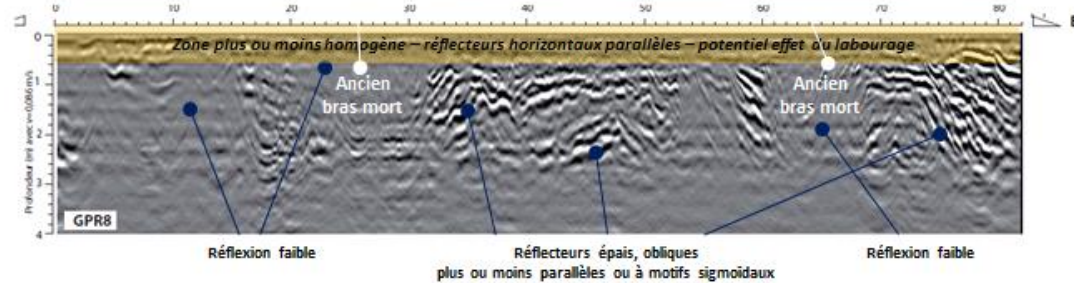


Figure 23 : contextualisation géohistorique et profil stratigraphique (version intermédiaire non détendancée) correspondant un transect GPR 8 à BLN

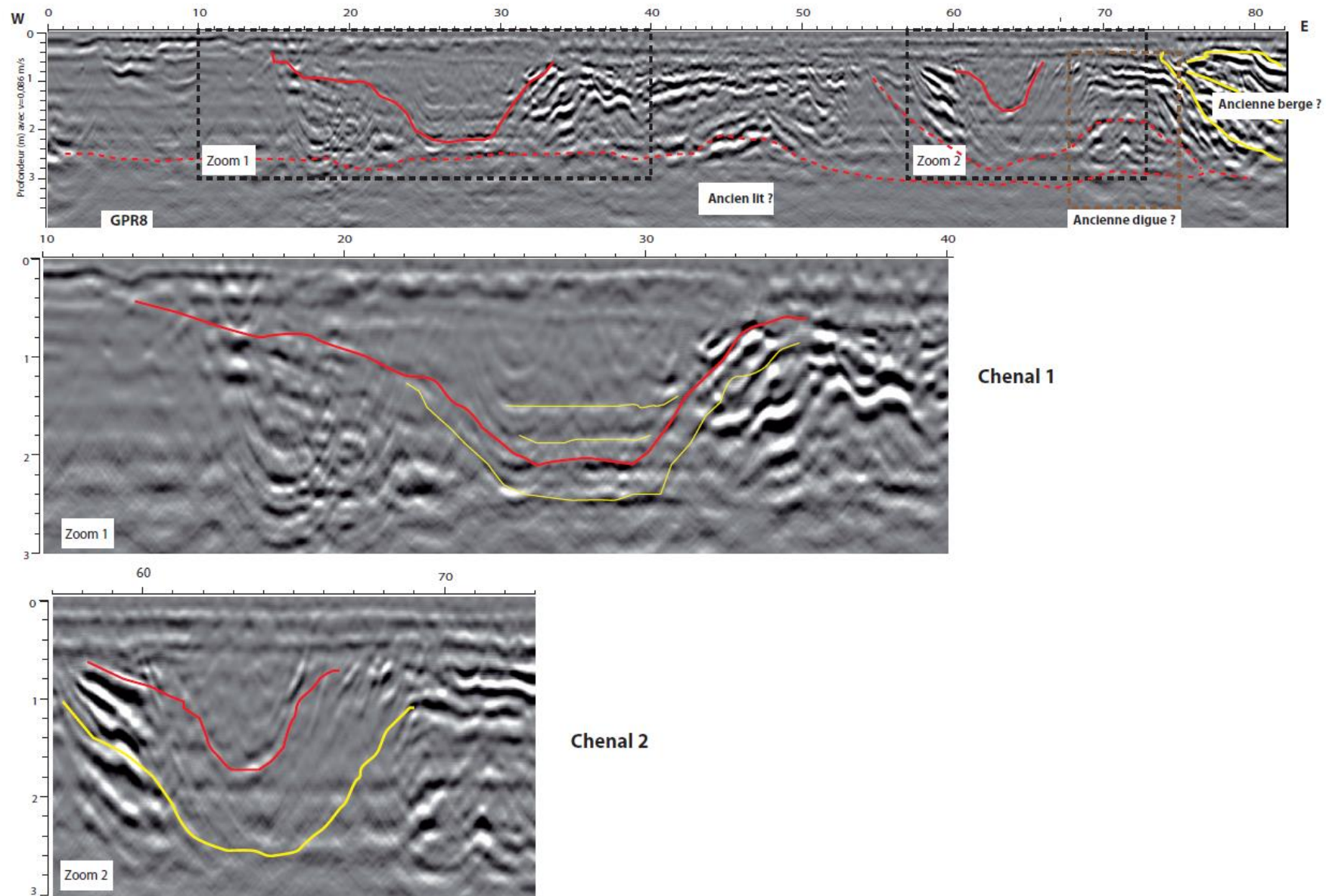


Figure 24 : radargramme GPR 8 à BLN (version intermédiaire non détendancée) - zoom sur les chenaux correspondant à d'anciens bras morts

5.1.5. Analyses sédimentaires

- a. Compilation des données préexistantes

Prélèvement de la lône de Géronton (CNR)

Les concentrations en ETM (Tableau 7) ne témoignent pas d'une contamination importante puisque les seuils S1 ne sont jamais dépassés même sur les maximums observés ($0,1 < Q_{sm} < 0,5$).

Les teneurs en mercure et en cadmium ont aussi été évaluées, avec une moyenne de 0,57 mg/kg en cadmium pour les 9 échantillons dont les teneurs dépassent le seuil de détection (20 échantillons avec $[Cd] < 0,5 \text{ mg/kg}$) et de 0,24 mg/kg en cadmium pour les 25 échantillons où les teneurs dépassent la limite (4 échantillons avec $[Hg] < 0,1 \text{ mg/kg}$).

En revanche, les teneurs des 7 PCB sont plus importantes avec des concentrations comprises entre 0,01 et 0,06 mg/kg pour 11 des 28 échantillons ; ou plus encore, des concentrations supérieures 0,06 mg/kg pour 16 des 28 échantillons ; 1 seul étant en concentration inférieure à 0,01 mg/kg.

Tableau 7 : teneurs en ETM dans les sédiments de surface de la lône de Géronton (Source : CNR - ICP-MS)

n=29	Chrome	Nickel	Cuivre	Zinc	Arsenic	Plomb
Moyenne	33,2	31,7	26	93	15,1	41,9
Ecart-type	8,8	7,3	8,1	23,2	4,6	14,2
Min	6,9	4,9	7	17,9	3,9	12,3
Max	50	42	42	130	24	73
S1	150	50	100	300	30	100

- b. Acquisition OSR5 : profils sédimentaires dans la plaine alluviale atterries au début du 20^{ème} siècle

Les deux profils sédimentaires ont été prélevés en rive gauche du vieux-Rhône (Cf. Figure 25), peu après le PK 142,5. Ils mesurent 1,8 m (P1 : incomplet – mesure pénétromètre : 4,2 m) et 2,8 m (P2), Les analyses chimiques ont été réalisées ex-situ, après séchage et tamisage à 63 μm .

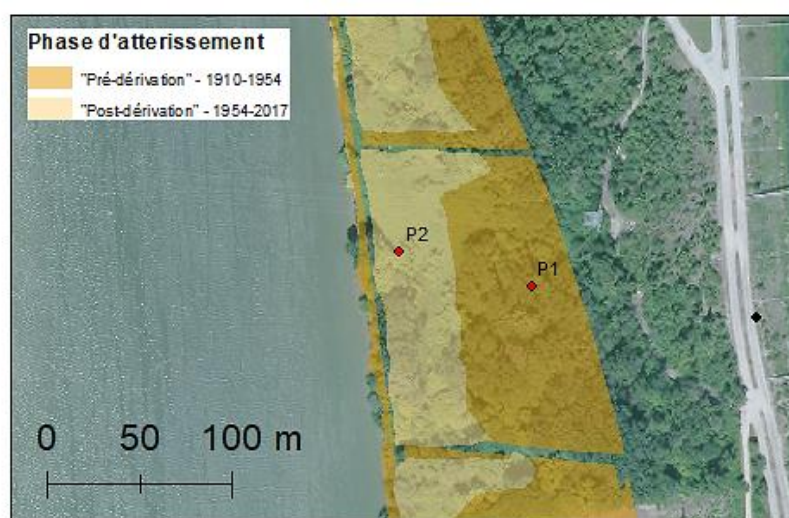


Figure 25 : localisation des profils sédimentaires

Le profil P1 est localisé à 87 m du chenal, dans une zone atterrie avant la dérivation tandis que P2 est situé à seulement 20 m du chenal, dans une zone atterrie en post-dérivation.

Les teneurs moyennes des deux profils sont un peu plus élevées que celles des prélèvements provenant de la lône de Géronton et demeurent globalement en dessous du seuil S1 (Tableau 8). Ceci peut notamment être imputable au fait que nous analysons la fraction fine (<63µm), ce qui peut potentiellement concentrer le signal. Les variations observées (étendue du signal) sont plus fortes pour le Zinc (Max/Min = 1,9) et le Plomb (Max/Min = 3,7) et le Nickel (Max/Min = 2,1). Nous allons donc observer ce qu'il se passe sur le plan stationnel.

Tableau 8 : teneurs en ETM (mg/kg) dans des profils prélevés sur le site de BLN (données OSR5)
Analyses sur la fraction fine, par XRF portatif corrigées avec les équations du jeu de contrôle ICP

n=25	Zinc	Plomb	Cuivre	Nickel	Fer
Moyenne	120,4	64,8	33,2	55,6	24245,8
Ecart-Type	21,5	23,2	6,8	5	1710,1
Médiane	117,6	64,5	32,6	56,2	24139,2
Min-Max	92,7-173,8	31,2-116	24-50	44,2-65,9	21784,1-28774,8
S1	300	100	100	50	

Les deux profils sédimentaires (cf. Figure 26, P1 et P2) témoignent d'un pic de contamination aux alentours de 160-180 cm de profondeur pour P1 et 120 cm pour P2 ($[Zn]_{max} = 173,8$ mg/kg, $[Pb]_{max} = 116$ mg/kg, $[Cu]_{max} = 50$ mg/kg), puis le signal diminue plus ou moins progressivement alors que l'on se rapproche de la surface.

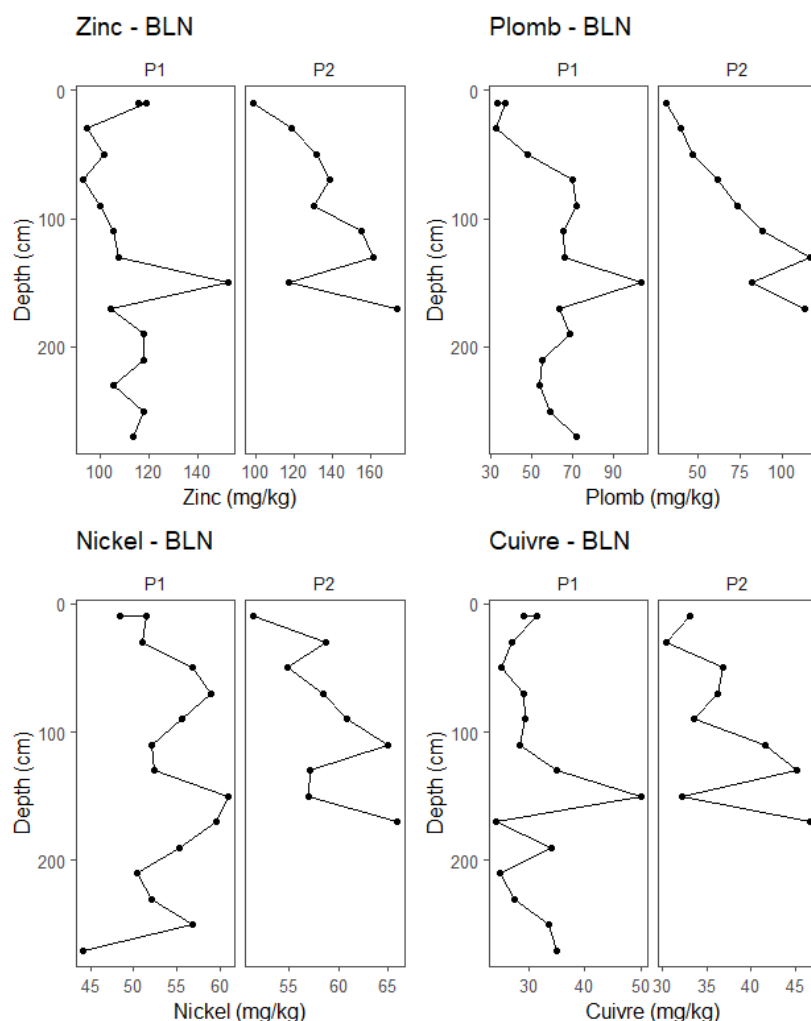


Figure 26 : teneurs en zinc, plomb, cuivre et nickel sur la fraction fine des sédiments provenant de BLN
Analyses sur la fraction fine, par XRF portatif corrigées avec les équations du jeu de contrôle ICP

Les teneurs en ETM des deux échantillonnages disponibles à BLN semblent concordantes. Ces valeurs seront analysées dans un contexte sectoriel dans la partie 6 de ce rapport, intégrant une approche en lien avec les connaissances du fonds géochimique acquises récemment sur le Rhône. Le pic chimique enregistré au niveau de P1 et P2 pourrait correspondre à celui - bien connu sur le Rhône - des années 1970-80 (Dendievel *et al.*, 2020 ; Seignemartin, 2020). Le contexte géohistorique d'atterrissement n'exclut pas cette possibilité puisque P1 est un profil **incomplet** ayant commencé à s'atterrir dès le début du 20^{ème} siècle. Le prélèvement pourrait ainsi correspondre à un haut de section, sédimenté plus tardivement au cours du 20^{ème} siècle. En ce qui concerne P2, qui s'est atterri en post-dérivation (à partir des années 60), le pic observé pourrait correspondre à celui des années 1970-80 ; hypothèse appuyée par la concomitance du signal observé dans les jeux de données provenant d'autres secteurs du Rhône.

c. Carottes pédologiques de la campagne de terrain de 2021

Trois carottes pédologiques ont été prélevées en mars 2021. Elles sont localisées de façon à couvrir différentes périodes de sédimentation (Figure 27). La carotte C1 est localisée en zone atterrie durant la phase post-dérivation (1954-2017), C2 en zone atterrie pré-dérivation (1910-1954) et C3 en zone atterrie en durant la phase d'endiguement (1860-1910).

Des analyses granulométriques et chimiques sont prévues et les résultats seront communiqués dans le rapport complémentaire fourni par l'ENTPE (automne 2021). Elles auront pour but de caractériser l'évolution des archives sédimentaires en fonction de la chronologie des aménagements, mais aussi de l'histoire des pollutions du Rhône.

Il est intéressant de noter qu'elles ont été réalisées au niveau du casier adjacent à celui des prélèvements à la tarière pédologique qui ont fait l'objet des analyses XRF (Figure 25). Ainsi, il sera possible de comparer les signaux chimiques observés en regard des phases d'atterrissement.

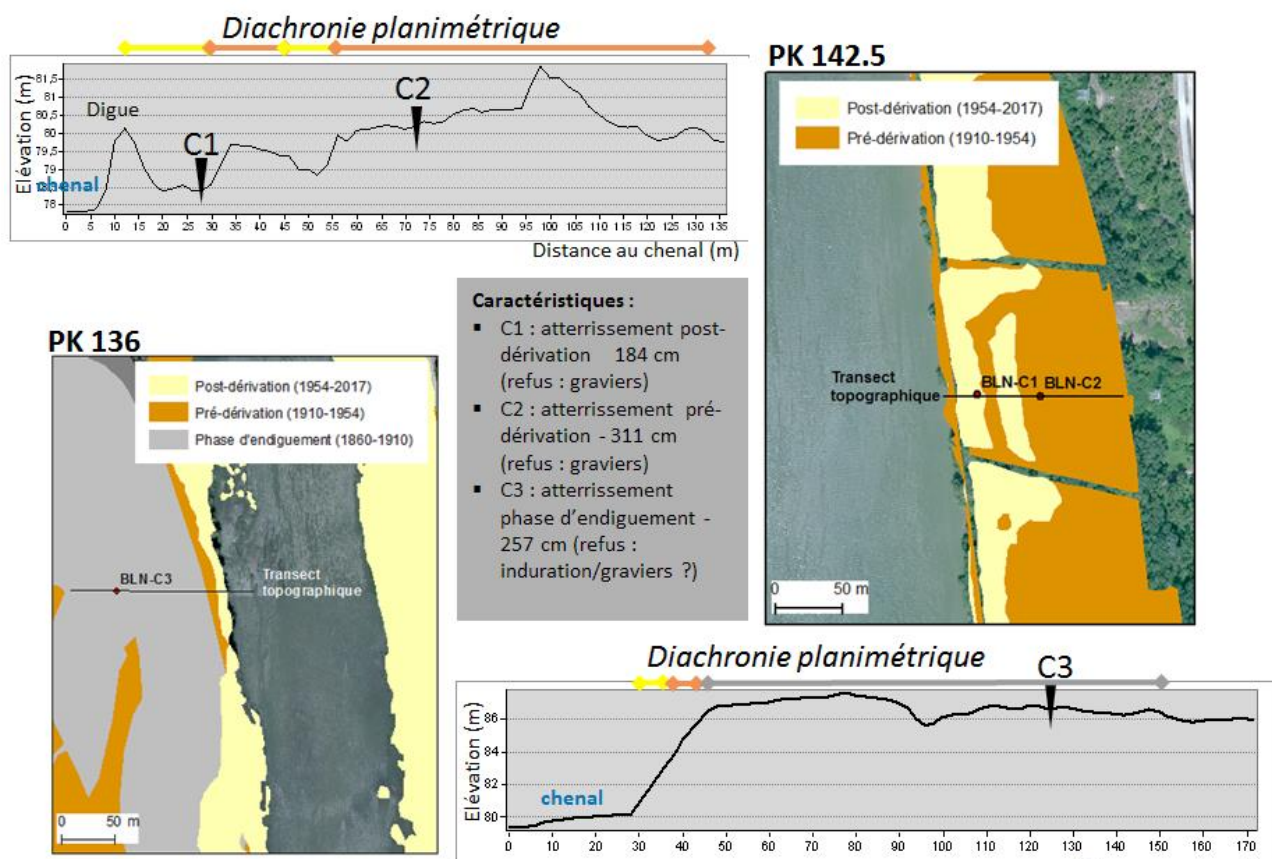


Figure 27 : caractéristiques et contexte géohistorique des carottes pédologiques prélevées à BLN

5.2. Secteur de Beaucaire

5.2.1. Planimétrie diachronique : évolution de la bande active

L'analyse des bases de données cartographiques et photographiques a abouti à l'obtention d'une diachronie détaillée de l'évolution de la bande active et du processus d'atterrissement associé (Figure 28).

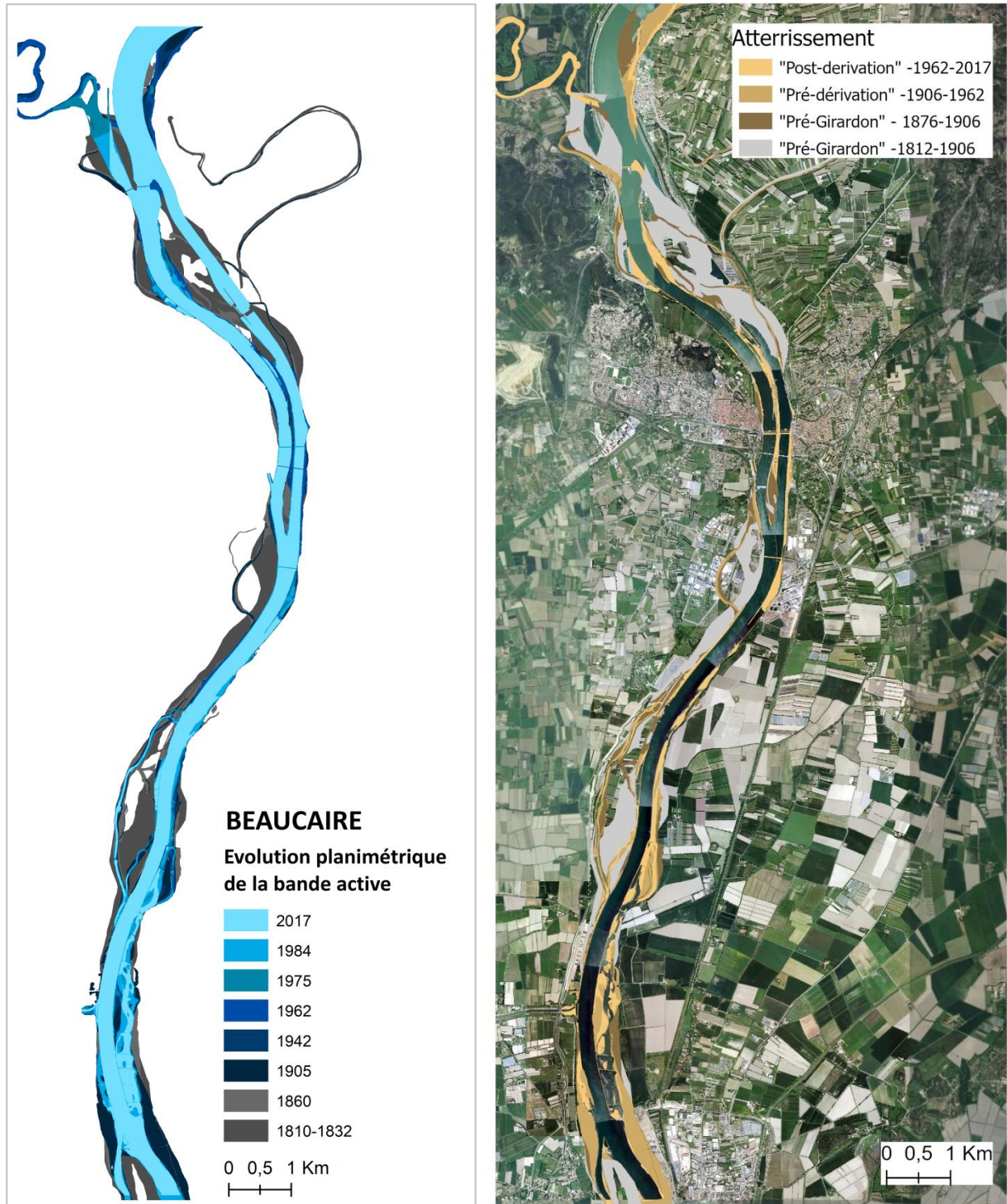


Figure 28 : évolution à Beaucaire de la bande active du Rhône (à gauche) et processus d'atterrissement subsidiaire ordonné selon les entités géohistoriques décrites en partie méthodologique (à droite)

Comme pour le site BLN, on observe une rétraction déjà très prononcée de la bande active entre le début du 19^{ème} siècle (1292 ha) et 1860 (964,5 ha) (Figure 30). Cette réduction est estimée à 25,3% de la bande active. Entre 1860 et 1905, la bande active se rétracte de 8,7 %, passant de 964,5 ha à 881 ha (Tableau 9, secteur entier ; Figure 29).

Durant la première moitié du 19^{ème} siècle, les premiers grands ouvrages d'endiguement sont installés dans la plaine alluviale du Rhône (e.g, digue séparative de la ville de Tarascon- rive droite 1852-1855, PK 266). La période de 1860 à 1905 s'inscrit comme phase intense d'endiguement des marges alluviales (digues insubmersibles et submersibles des années 1870-1880 – et mise en place des épis et ouvrages Girardon entre 1880 et 1900 ; e.g, digue et tenons du Mas des tours – rive gauche, 1878-1880, PK 276).

La bande active continue de se rétracter tout au long de la première moitié du 20^{ème} siècle, En 1962, la surface ne s'étend plus que sur 735,9 ha, soit 55 % de la surface de 1810. Il semblerait alors que la bande active s'ajuste encore suite aux aménagements correctifs.

Les séries de 1962 et de 1975 nous permettent de saisir l'effet de la dérivation sur la bande active du Rhône (sur la partie court-circuitée, seule la bande active du Vieux-Rhône est prise en compte) : on observe une nouvelle réduction de la surface de la bande active qui évolue de 735 ha (1962) à 629 ha (1975). En 2017, la bande active s'étend sur 533 ha et ne représente alors plus que 41% de la bande active de 1810 ou encore 55% de la bande active de 1860 (ici mentionnée pour la comparaison aux autres secteurs – PBN, PDR, MON, DZM - où l'état de 1860 correspond à l'état initial).

Tableau 9 : évolution de la BA sur le secteur de BEC à différentes dates clefs de l'aménagement du Rhône

*le « secteur entier » correspond au linéaire de 18,9 km, intégrant le linéaire du Vieux-Rhône et la partie en « Rhône total »,

	Etat du Rhône	Secteur entier* (18,9 km)	Amont Vieux-Rhône (7,9 km)	Aval (11km)
		Superficie de la BA (ha)		
1810	Non aménagé	1292	608	684,1
1860	Premiers ouvrages d'endiguement	964,5	370,8	593,8
1905	Corrigé	881	321,8	559,2
1962	Corrigé (+ 60 ans)	735,9	295,1	440,9
1975	Corrigé (+ 70 ans) et dérivé (+5 ans)	629,9	199	430,8
2017	Corrigé (+ 120 ans) et dérivé (+ 37 ans)	532,9	199,1	333,8

Après 1970 (dérivation), il n'inclut pas la partie dérivée.

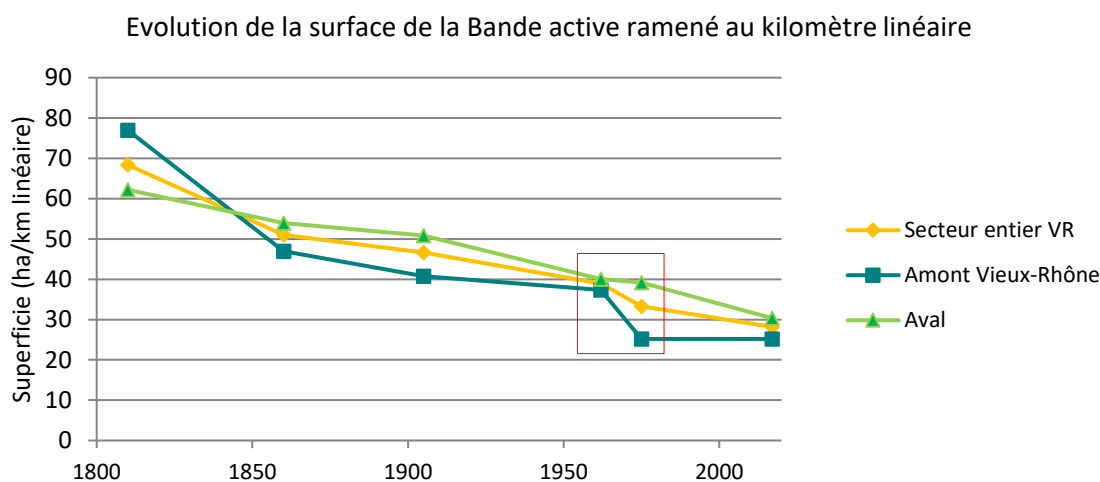


Figure 29 : évolution de la surface de la bande active (ha/km linéaire) à BEC au cours des deux derniers siècles

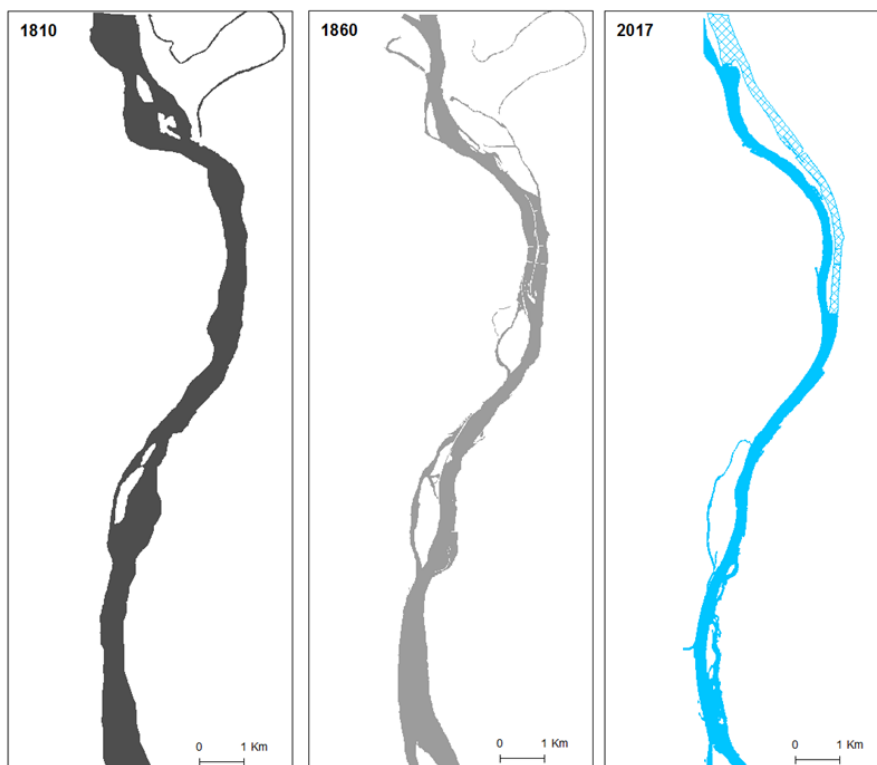


Figure 30 : cartes illustrant l'évolution planimétrique de la bande active – phénomène de rétraction et simplification morphologique entre 1810, 1860 et 2017

Phénomène de rétraction - partie court-circuitée versus Rhône total

Pour cette étude de l'évolution de la bande active à BEC, la partie aval qui ne présente pas de dérivation a été étudiée indépendamment de la partie amont qui est quant à elle, est court-circuitée (Tableau 9 « Amont Vieux-Rhône », « Aval », Figure 29).

La partie RCC présente un phénomène de rétraction amplifié tandis que la partie aval présente une réduction de la bande active moins marquée : le coefficient de la pente « Superficie₁₉₆₂₋₁₉₇₅ » est de -0,93 pour la partie court-circuitée contre -0,07 dans la partie aval, soit un phénomène de rétraction amplifié de presque 10 fois entre les deux situations (Figure 29, cadre rouge). En revanche, sur la période qui suit, ce phénomène s'inverse : le coefficient de la pente « Superficie₁₉₇₅₋₂₀₁₇ » avoisine 0 pour la partie RCC contre -0,21 pour la partie Aval.

En outre on notera que la partie aval est marquée par une forte incision (Figure 31) : durant la phase post-Girardon (Girardon-Barrage) qui est en moyenne de $-2,88\text{m} \pm 2,6$ (contre $-1,52\text{m} \pm 2,65$ à l'amont) mais aussi durant la phase Post-dérivation (Barrage-Actuelle) avec une moyenne de $-1,06\text{m} \pm 1,42$ (contre un exhaussement de $+0,34\text{m} \pm 1,7$ à l'amont).

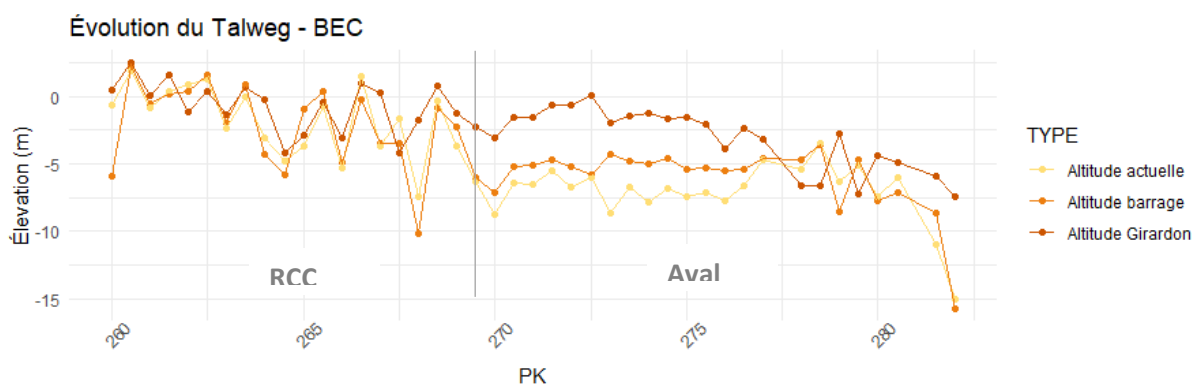


Figure 31 : évolution du talweg à BEC au cours du 20^{ème} siècle établie à partir de trois dates d'observation : Girardon (début 20^{ème}), barrage (1962) et actuelle (2009) (données source : Parrot 2015),

5.2.2. L'atterrissement des marges alluviales

L'analyse diachronique de l'évolution de la bande active à BEC a permis de caractériser les périodes d'atterrissement. Ces surfaces atterries ont été quantifiées (Tableau 10, Figure 32) ; sur l'ensemble du tronçon étudié, elles représentent :

- 328 ha pour la période pré-Girardon, soit 0,35 ha/km linéaire/an.
- 84 ha pour la période « phase d'endiguement », soit 0,097 ha/km linéaire/an.
- 154 ha pour la phase Post-Girardon, soit 0,14 ha/km linéaire/an.
- 106 ha pour la période « phase de dérivation » soit 0,432 ha/km linéaire/an.
- 97 ha pour la période post-dérivation, soit 0,12 ha/km linéaire/an.

On notera qu'à l'image de la rétraction de la bande active, les dynamiques d'atterrissement diffèrent selon que l'on soit dans la partie RCC ou sur le Rhône total avec un décalage du phénomène dans le temps (Tableau 10 et Figure 32) : les surfaces s'atterrissent fortement durant la phase de dérivation (1962-1975) sur la partie RCC (+96 ha pour 7,9 km de linéaire) et n'augmentent plus par la suite (1975-2017), tandis que sur le tronçon sans dérivation (aval), l'atterrissement est quasi nul durant la période 1962-1975 et s'effectue principalement durant la période 1975-2017 (+97 ha pour 11 km de linéaire).

Tableau 10 : surfaces atterries selon les phases d'aménagement du Rhône

		Secteur entier VR	Amont Vieux-Rhône	Aval
		Superficie atterrie (ha)		
Pré-Girardon	1810-1860	327,5	237,2	90,3
Phase d'endiguement - fin 19ème s	1860-1905	83,5	49	34,5
Pre-dérivation (1906-1962)	1905-1962	145	26,7	118,3
Etat dérivé Phase de dérivation Post-dérivation	1962-2017	203	96	107,1
	1962-1975	106,1	96	10
	1975-2017	97	0	97
Total	1810-2017	592,9	759,1	408,9
Linéaire	x	18,9	7,9	11

Atterrissement moyen en ha/km/an selon la phase d'aménagement et la sous-sectorisation

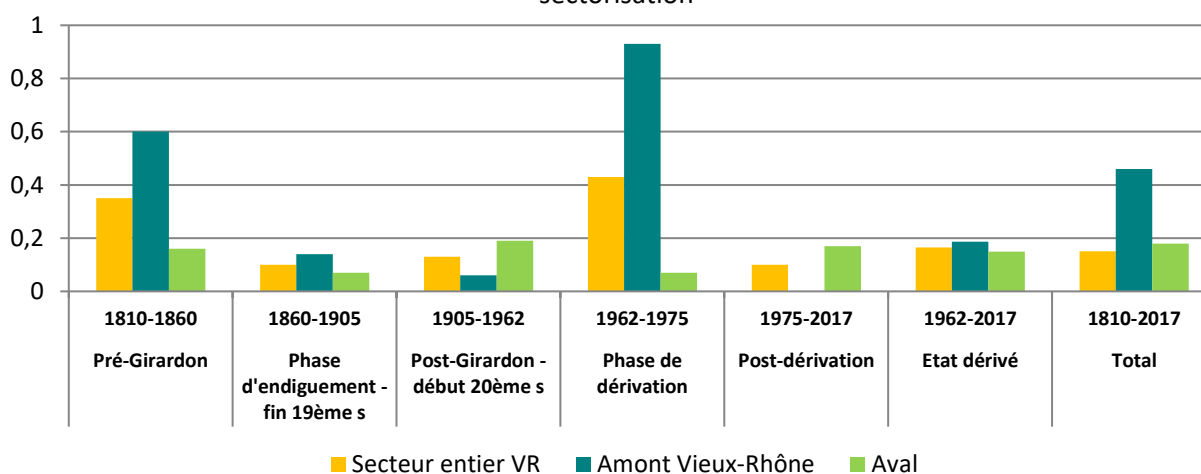


Figure 32 : atterrissement à BEC selon la phase d'aménagement (en hectare par kilomètre linéaire par année)

5.2.3. Stocks sédimentaires en place

Comme expliqué dans la partie méthodologie, sur un échantillonnage prévu de 76 points de sondage, seulement 31 ont pu être réalisés (annulation des campagnes de terrain du fait des restrictions sanitaires et des conditions hydrologiques).

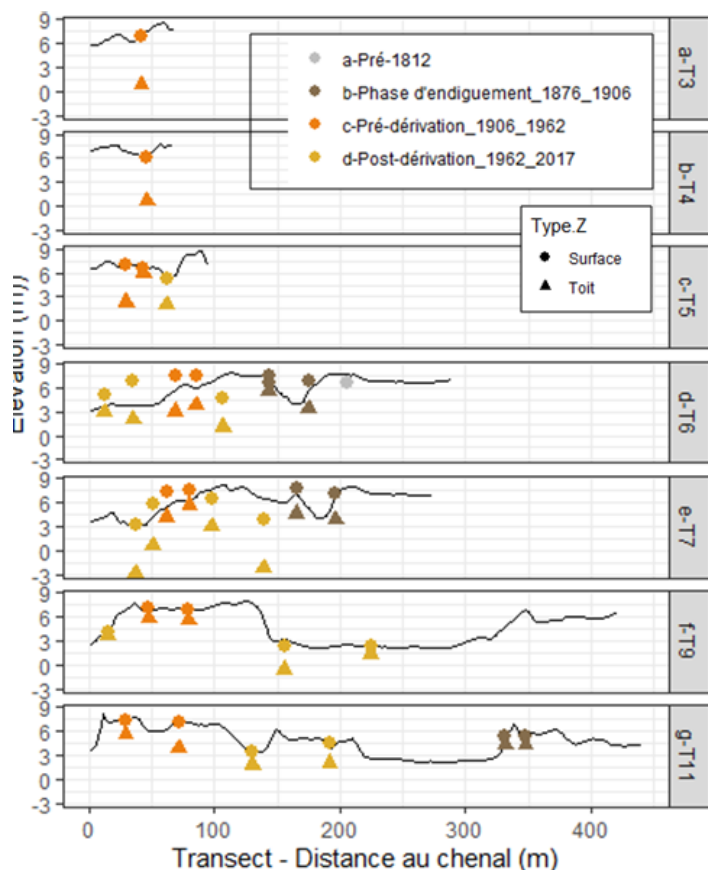


Figure 33 : caractéristiques topographiques des transects de sondages à la perche sur le secteur de BEC

BEC

Seuls les transects T6, T7, T9 et T11 sont complets (Figure 33, Tableau 11), avec deux points de sondage par unité géohistorique. On notera tout de même que la variabilité intra-transect (forts écart-types) n'est pas étonnante puisque ceux-ci traversent plusieurs unités géohistoriques (e.g. Transect 7 : $Z_{\text{toit de galets}} = 2, 1 \text{ m} \pm 3,2$).

Tableau 11 : caractéristiques topographiques, épaisseurs sédimentaires des transects d'échantillonnage des sondages à la perche à

ID	Nombre de sondages	PK	Z Surface moyen(m)	Z Toit galets moyen(m)	Z talweg moyen (m)	Epaisseur des sédiments Fine (m)	Epaisseur Grossier (m)
T3	1	274,58	6,88 ± NA	0,9 ± NA	1,74 ± NA	6 ± NA	< Talweg
T4	1	274,62	6,16 ± NA	0,7 ± NA	1,74 ± NA	5,5 ± NA	< Talweg
T5	3	274,67	6,3 ± 0,86	3,4 ± 2,2	1,74 ± 0	2,85 ± 2,01	1,7 ± 2,21
T6	7	274,62	6,52 ± 1,01	3,1 ± 1,4	1,74 ± 0	3,42 ± 1,01	1,3 ± 1,4
T7	8	274,72	6,12 ± 1,77	2,1 ± 3,2	1,75 ± 0	4,03 ± 1,5	0,3 ± 3,2
T9	5	277,42	4,58 ± 2,34	3,2 ± 2,7	1,85 ± 0	1,41 ± 0,93	1,3 ± 2,7
T11	6	277,65	5,57 ± 1,51	3,7 ± 1,4	1,85 ± 0	1,86 ± 0,86	1,9 ± 1,4

Le Tableau d'estimation (Tableau 12) des épaisseurs et des volumes grossiers est communiqué ci-dessous. Les tendances observées sont quelques peu inattendues : sur les autres sites (PBN, PDR MON et DZM), les épaisseurs de sédiments fins sont plus importantes aux niveaux des unités géohistoriques anciennes et plus faibles sur les unités récentes. Ce n'est pas le cas ici où la « Phase atterrie entre 1962-2017 » présente des épaisseurs de sédiments fins plus importantes ($E_{\text{fines}} = 3,3 \pm 1,8 \text{ m}$) que les unités plus anciennes (« Phase 1906-1962 » : $E_{\text{fines}} = 3,12 \pm 1,75 \text{ m}$; « Phase d'endiguement » (1876-1906) :

$E_{p_{\text{fines}}} = 2,36 \pm 1,14$ m). Les données GPR qui sont en cours de traitement pourront infirmer et confirmer ces tendances et orienter les campagnes de terrain futures.

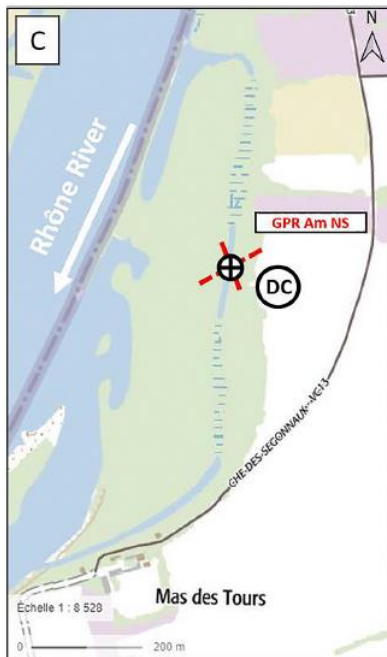
En outre, à BEC, seule la partie amont du secteur est dérivée. Or, l'ensemble des points de sondage est situé en aval, sur la partie non dérivée. De ce fait, l'interprétation que l'on a de l'homogénéité des épaisseurs de fines est que, contrairement aux cas des RCC où le débit est réduit, l'hydrologie dans les conditions de Rhône total induit des flux de matière et une sédimentation des fines qui sont plus importants et plus répartis sur les marges alluviales encore hydrologiquement connectées (ce qui serait ici le cas des zones végétalisées en phase 1906-1962 et phase 1962-2017).

Tableau 12 : caractéristiques topographiques et épaisseurs sédimentaires selon les unités géohistoriques à BEC

Unité	Nombre de sondages	Z surface (m)	Z talweg (m)	Epaisseur des sédiments fins (m)	Epaisseur des sédiments grossiers (m)	Aire associée à la phase (ha)	Volumes estimés de sédiments fins (10^6 m ³)	Volumes estimés de sédiments grossiers (10^6 m ³)
Pré-Girardon (1876-1906)	6	6,15 ± 1,69	1,74 ± NA	2,36 ± 1,14	2,55 ± 0,74	83,5	2	2,1
Phase 1906-1962	12	7,07 ± 0,39	1,78 ± 0,05	3,12 ± 1,75	2,17 ± 1,94	145	4,5	3,1
Phase 1962-2017	13	4,45 ± 1,42	1,78 ± 0,05	3,29 ± 1,79	< Talweg (-0,63 ± 1,9)	203	6,7	< Talweg

5.2.4. Compilation des données d'analyses sédimentaires préexistantes

Carottes sédimentaires du Mas des Tours (Morereau et al., 2020)



Dans le cadre de l'étude de Morereau *et al.* (2020), une carotte pédologique a été prélevée au niveau du PK 275, site du Mas des Tours (43,743833N, 4,626192E, cf. Figure 34).

Analyses granulométrique, Carbone Organique Total, analyses Césium 137, Plomb 210 et teneurs en Zinc viennent caractériser cette carotte longue d'environ 3m qui a sédimenté durant la fin du 20^{ème} siècle, entre 1982 et 2017. Elle est associée à un taux de sédimentation de 7,8 cm/an calculé à partir des résultats de la datation au Césium 137.

Il a été noté que la granulométrie est dominée par la fraction limoneuse, avec un pic sableux dans la tranche (90,5cm) correspondant à la crue de 2003 (D90 = 256 µm, 67% de sable).

Les teneurs en Zinc diminuent entre le début des années 1980 et 2017 (Figure 35), avec un maximum aux alentours de 300mg/kg (premiers centimètres) et des valeurs comprises entre 100 et 200mg/kg (Morereau *et al.*, 2020).

Figure 34 : localisation du carottage au Mas des Tours (source : Morereau *et al.*, 2020)

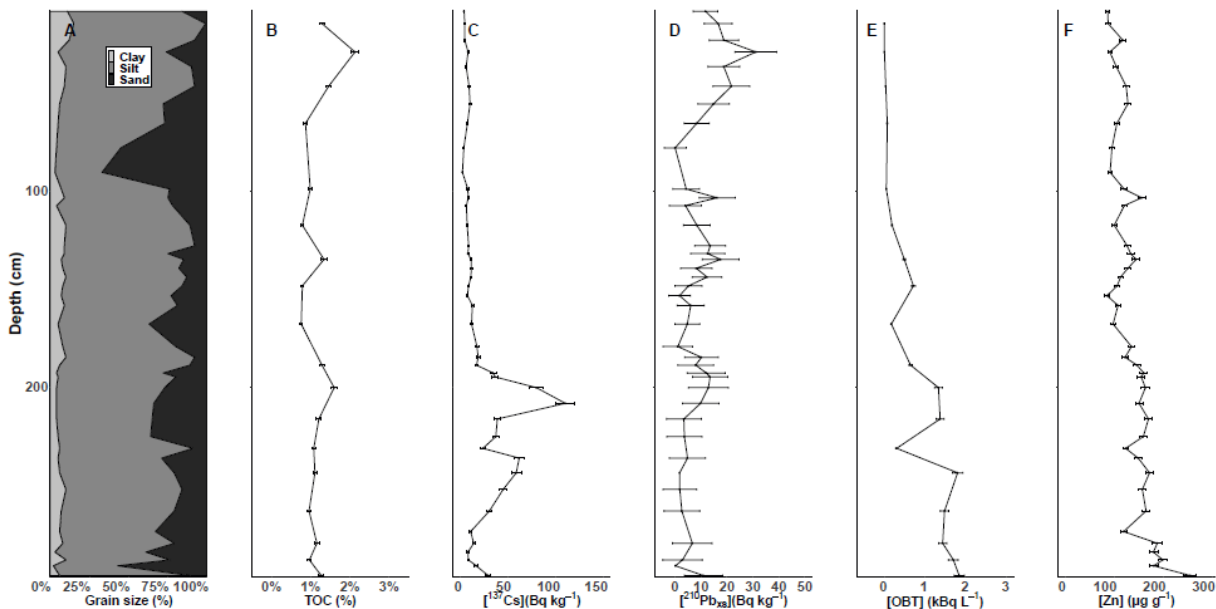


Figure 35 : analyses granulométriques, Carbone Organique Total, analyse du Césium 137, Plomb 210 et teneurs en Zinc sur la carotte du Mas des Tours (PK 275) – Source : Morereau *et al.* (2020)

6. APPROCHE COMPARATIVE INTER-SECTEUR

6.1. Evolution comparée de la largeur et de la surface de la bande active sur les sites de PBN, PDR, BLN, DZM et BEC

La bande active évolue fortement à BLN et BEC durant la période 1800s-1860/1876, avec une rétraction de l'ordre de 22% (Base 1810) tandis que pour PDR et DZM, elle est respectivement de 10 et 12% (Base 1810) (Figure 36).

La période qui correspond à la phase de correction (1860-1950s) présente des pourcentages de rétraction compris entre 43 et 53 % sur les secteurs de PBN, PDR, BLN et DZM (Base 1860). A BEC, la rétraction n'est que de 22% (Base 1860).

Sur la phase « dérivation-période actuelle », la rétraction varie de 17,6% à PBN où elle est la plus prononcée (Base 1860) à 7,9% à BLN où elle l'est le moins.

Ainsi, on note des différences importantes avec une rétraction plus importante pour BLN et BEC que sur les autres secteurs lors de la phase 1810s-1860/1876 alors que le Rhône voit apparaître sur son cours les premiers aménagements de digues de grande envergure. Si sur les secteurs de PBN, BLN, DZM et BLN, la phase de correction présente une rétraction du même ordre de grandeur, ce n'est pas le cas à BEC où le phénomène est deux fois moins fort. Il se pourrait qu'à BEC, les premiers endiguements du 19^{ème} aient eu un impact plus prononcé, tamponnant l'effet des endiguements Girardon, présentant peut-être eux-mêmes des caractéristiques d'implantation différentes (densité, taille des aménagements). Aussi, si sur les secteurs de PBN, BLN, DZM et BEC, la phase post-dérivation est caractérisée une rétraction du même ordre de grandeur, ce n'est pas le cas à BLN où le phénomène est deux fois moins fort. En outre, BLN a connu un fort atterrissement lors des deux premières phases ; déconnectant déjà fortement le chenal de sa plaine alluviale, ce qui pourrait amoindrir l'effet cumulatif de la dérivation. En outre, il serait possible, qu'étant donné la faible longueur du RCC de BLN, l'effet de *backwater* soit plus prononcé sur la partie aval du secteur, tempérant ainsi le processus d'atterrissement pos-dérivation.

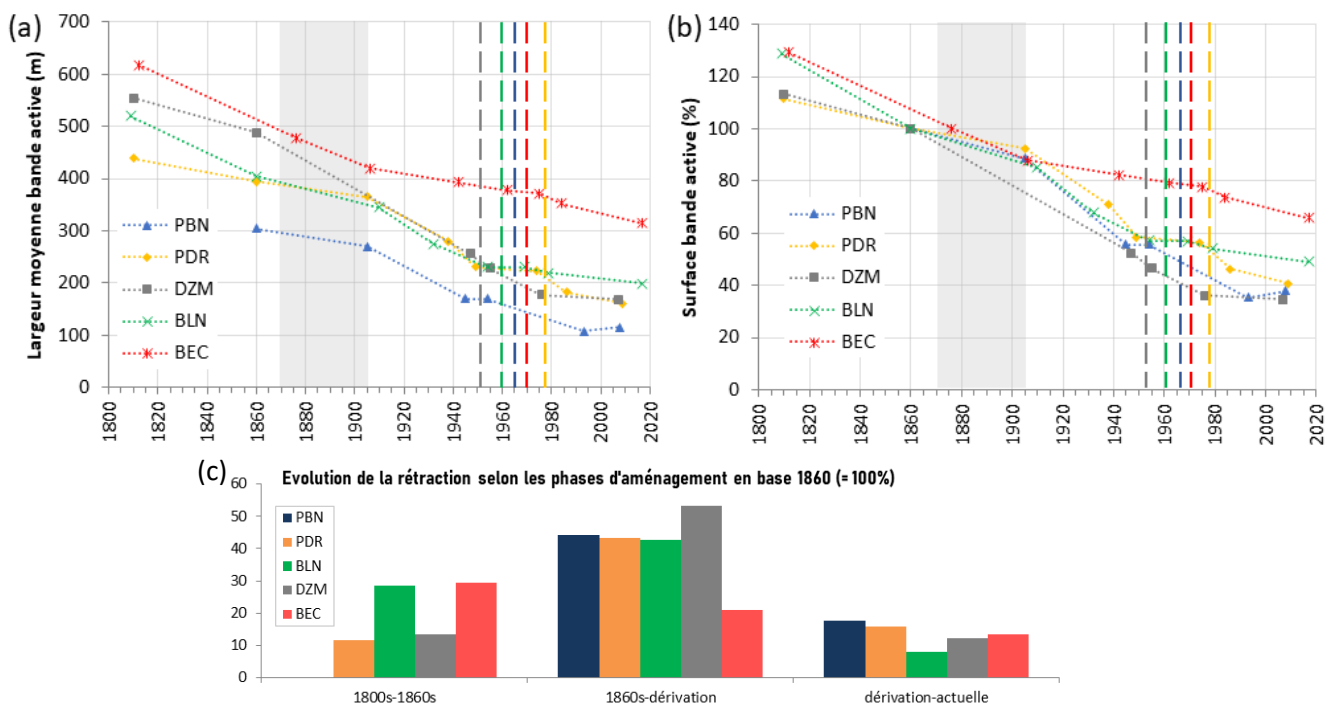


Figure 36 : Comparaison de l'évolution de la largeur des bandes actives pour les sites de BLN et BEC (OSR5) et les sites de PBN, PDR et DZM (OSR4) entre 1800 et 2017 : (a) Largeurs moyennes de bandes actives (m) ; (b) surfaces de bandes actives (%) (en raison d'un manque de données à PBN pour 1810, la valeur de 100% est

basée sur les données de 1860). Le cadre gris correspond à la première phase d'aménagement (digues longitudinales, épis et Casiers Girardon) sur l'ensemble des sites, et les lignes verticales pointillées colorées correspondent aux aménagements sur chacun des sites et (c) évolution de la rétraction selon les phases d'atterrissement (N.B : le graphe est en base Bande active de 1860 = 100% pour permettre la comparaison avec PBN qui n'a pas la date 1810 de renseignée ; ainsi les surfaces de la bande active de 1810 des autres secteurs 1810 sont > 100%. Le cumul de rétraction est donc en regard de la base de 1860.)

6.2. Comparaison des épaisseurs sédimentaires sur les sites de PBN, PDR, BLN et DZM

Les épaisseurs de sédiments grossiers (Figure 35.a) sont plus importantes à BLN, au niveau des unités d'atterrissement anciennes (E_{grossier} : 5,53 m pour 1880) puis diminuent alors que la date d'atterrissement est de plus en plus récente (E_{grossier} : 2,23 m pour 1998). C'est aussi le cas à PBN, secteur incisé (Tableau 13). On pourrait penser alors à un effet d'incision qui, au cours du temps, concourrait à entamer les stocks de grossiers selon un gradient distal/de connectivité au chenal. Néanmoins, le secteur de BLN ne semble pas présenter une forte incision (Tableau 13) ; toutefois cette observation est à nuancer car il s'agit en fait d'une interpolation (les données d'élévation du Talweg étant manquantes entre les PK 135 et 143 pour la période Girardon). Les deux autres secteurs ne montrent pas de tendance très significative en ce qui concerne les épaisseurs de grossiers, ce qui est plutôt concordant avec les données d'incision (faible et plutôt localisée, cf. Tableau 13).

En ce qui concerne les épaisseurs de sédiments fins (Figure 35.b), BLN est le seul secteur qui présente une augmentation des fines sur les périodes récentes (E_{fines} : 2,43 m pour 1974 ; 2,35 m pour 1998). Ce secteur est ainsi marqué par une surface d'atterrissement post-dérivation deux fois moins importante que sur les autres secteurs mais celle-ci enregistre en revanche une forte sédimentation. BLN est ainsi caractérisé par une sédimentation par les fines plus importantes. Ceci pourrait s'expliquer par l'effet back-water « proportionnellement amplifié » du fait de la faible taille de ce RCC.

Tableau 13 : incision moyenne selon la phase d'étude et le secteur

Evolution moyenne du talweg	Phase Girardon-Barrage	n Phase 1	Phase Barrage-Actuelle	n Phase 2	n Total	n Total
PBN	-2,39±2,11	31	-2,11±1,86	31	-4,5±2,21	31
PDR	-0,47±1,96	31	-0,84±1,96	31	-1,31±2,76	31
BLN	-0,35±0,58	14 – NA entre les PK 135 et 143.	0,05±0,59	26	-0,14±0,7	14
DZM	-0,23±1,33	69	-0,86±1,78	69	-1,09±1,99	69

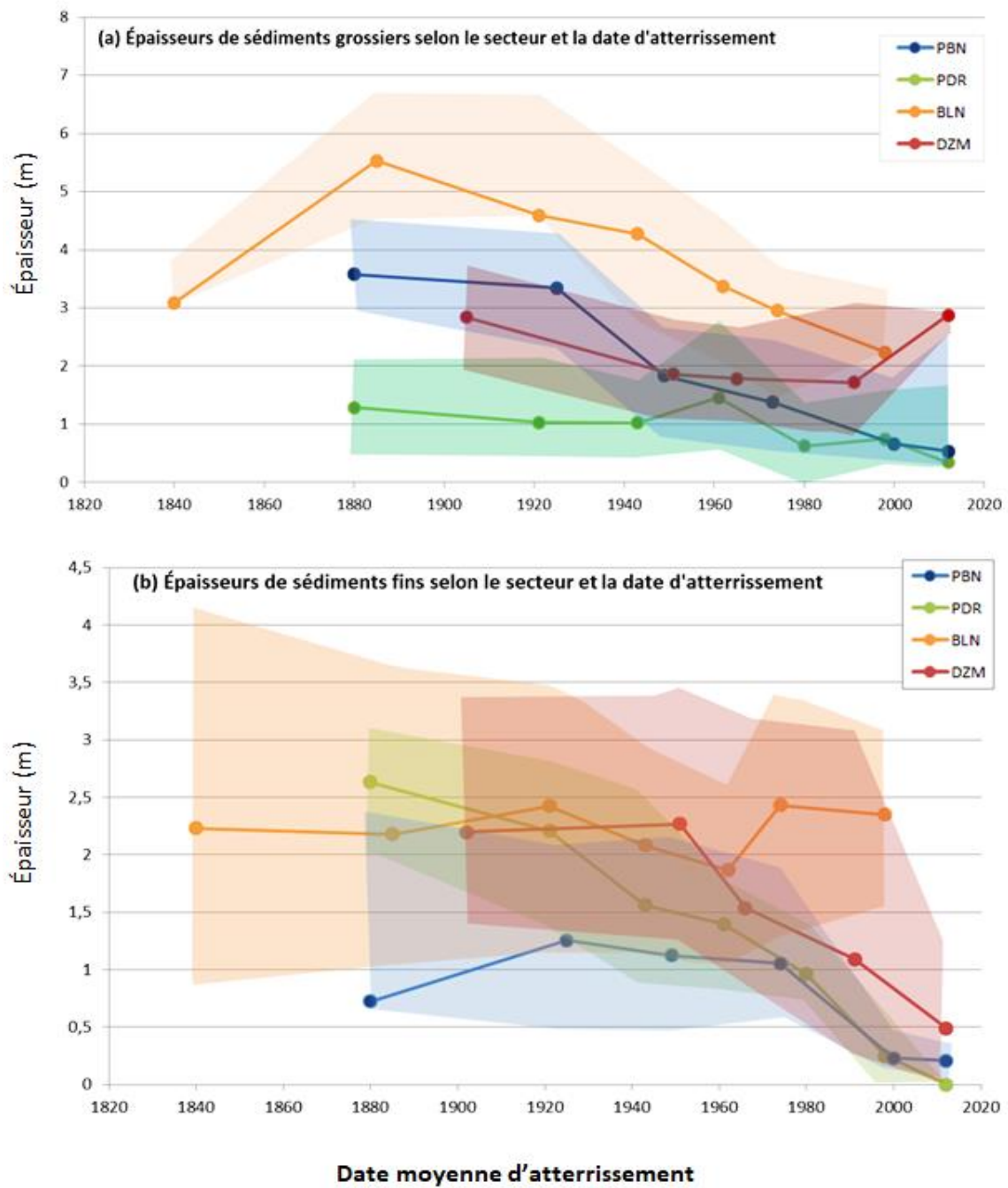


Figure 37 : épaisseurs de sédiments fins et grossiers sur les secteurs de PBN, PDR, PBN, DZM. Data source : Tena *et al.*, 2020 ; OSR5. Les zones en transparence représentent l'IQR.

6.2. Gradient longitudinal du signal chimique en Zinc, Plomb et Nickel

Les teneurs en Zinc diminuent selon un gradient amont-aval (Tableau 14, Figure 36). Les deux sites amont présentent des teneurs moyennes en Zinc plus importantes ($[Zn]_{PBN}=198,8 \pm 70,7$ mg/kg et $[Zn]_{PDR}=209,9 \pm 74,1$) que les sites plus en aval ($[Zn]_{BLN}=120,4 \pm 22$ mg/kg et $[Zn]_{MON}=149,5 \pm 33,2$, $[Zn]_{DZM}=144,9 \pm 30,5$).

Les teneurs en Plomb sont à peu près équivalentes quel que soit le secteur avec des valeurs moyennes comprises entre 60 et 70 mg/kg et des écart-types avoisinant 20 mg/kg (cf. Tableau 14). En revanche, il semblerait qu'il y ait davantage de teneurs avoisinant le seuil S1 (100mg/kg) sur les deux secteurs amont (Figure 36).

De plus, on notera pour le zinc ou le plomb que les valeurs plus fortes à PBN et PDR sont associées à des dépôts ayant commencé leur atterrissement au début ou au milieu du 20^{ème} siècle, donc ayant potentiellement enregistré le pic de polluants des années 80. En revanche, les sédiments des dépôts correspondant à un atterrissement débutant dans les années 80 et 90 ont des signatures chimiques associées à des concentrations plus faibles en ETM. Notre chronologie n'étant pas détaillée, il n'est pas possible encore de définir une fenêtre temporelle précise mais il semblerait tout de même que la contamination en plomb observée sur nos dépôts soit bel et bien antérieure aux années 90, et pourrait correspondre à la fenêtre des années 70 décrite par le BRGM (2013). De plus, les secteurs de PBN et PDR qui sont situés juste en aval de l'agglomération lyonnaise et du bassin industriel sud lyonnais (« vallée de la chimie »), sont longées par le réseau autoroutier (A7) et peuvent aussi potentiellement subir l'influence de zones d'activités minières (e.g. bassin minier de l'Azergue).

Concernant le Nickel, on observe un enrichissement amont-aval. Les deux sites amont présentent des teneurs moyennes en Zinc moins importantes ($[Ni]_{PBN}=41,4 \pm 4,3$ mg/kg et $[Ni]_{PDR}=42,5 \pm 5,7$) que les sites plus en aval ($[Ni]_{BLN}=55,6 \pm 5,12$ mg/kg et $[Ni]_{MON}=49,4 \pm 6,3$ mg/kg $[Ni]_{DZM}=47,4 \pm 4,7$ mg/kg). On notera que les deux profils de BLN témoignent de teneurs plus élevées que les nombreux profils des sites à l'aval, laissant penser à un enrichissement à l'amont du site de BLN et un effet de dilution sur les deux autres sites situés à l'aval de celui-ci. Ceci pourrait être concordant avec l'arrivée de l'Isère en amont du site.

A noter que les teneurs en Nickel du Rhône sont globalement élevées en comparaison de certaines rivières françaises : par exemple, le fond géochimique dans les sédiments du bassin de la Seine est de 16 mg/kg tandis que le LGB du Rhône moyen atteint 32,7 mg/kg (Dendievel *et al.*, 2020). Ce fond géogénique riche en nickel pourrait être lié aux apports des affluents drainant le massif des Alpes (e.g. l'Arve) chargés en nickel (altération et l'érosion des formations cristallines), et ceci est renforcé encore, plus en aval, au niveau du Rhône moyen par les affluents de la rive gauche en provenance des Alpes occidentales. C'est par exemple le cas de l'Isère connue pour ses MES riches en nickel (cf. Delile *et al.*, 2020). De fait, la signature observée sur BLN, situé à l'aval de l'Isère, est très proche de celles de MON et DZM

Tableau 14 : teneurs en Zinc, Plomb et Nickel par secteur. Les analyses (triplicats) ont été réalisées au XRF portatif *Spectro xSort*, module *enviro-h* sur sédiments secs tamisés à 63 µm.

	n	Zinc (mg/kg)	Lead (mg/kg)	Nickel (mg/kg)
PBN	142	198,84 ± 70,71	68,65 ± 22,56	41,39 ± 4,27
PDR	202	209,89 ± 74,06	69,23 ± 24,25	42,53 ± 5,67
BLN	24	120,42 ± 21,95	64,78 ± 23,69	55,61 ± 5,12
MON	149	149,49 ± 33,18	59,58 ± 20,8	49,4 ± 6,31
DZM	277	144,94 ± 30,48	63,19 ± 19,22	47,44 ± 4,68

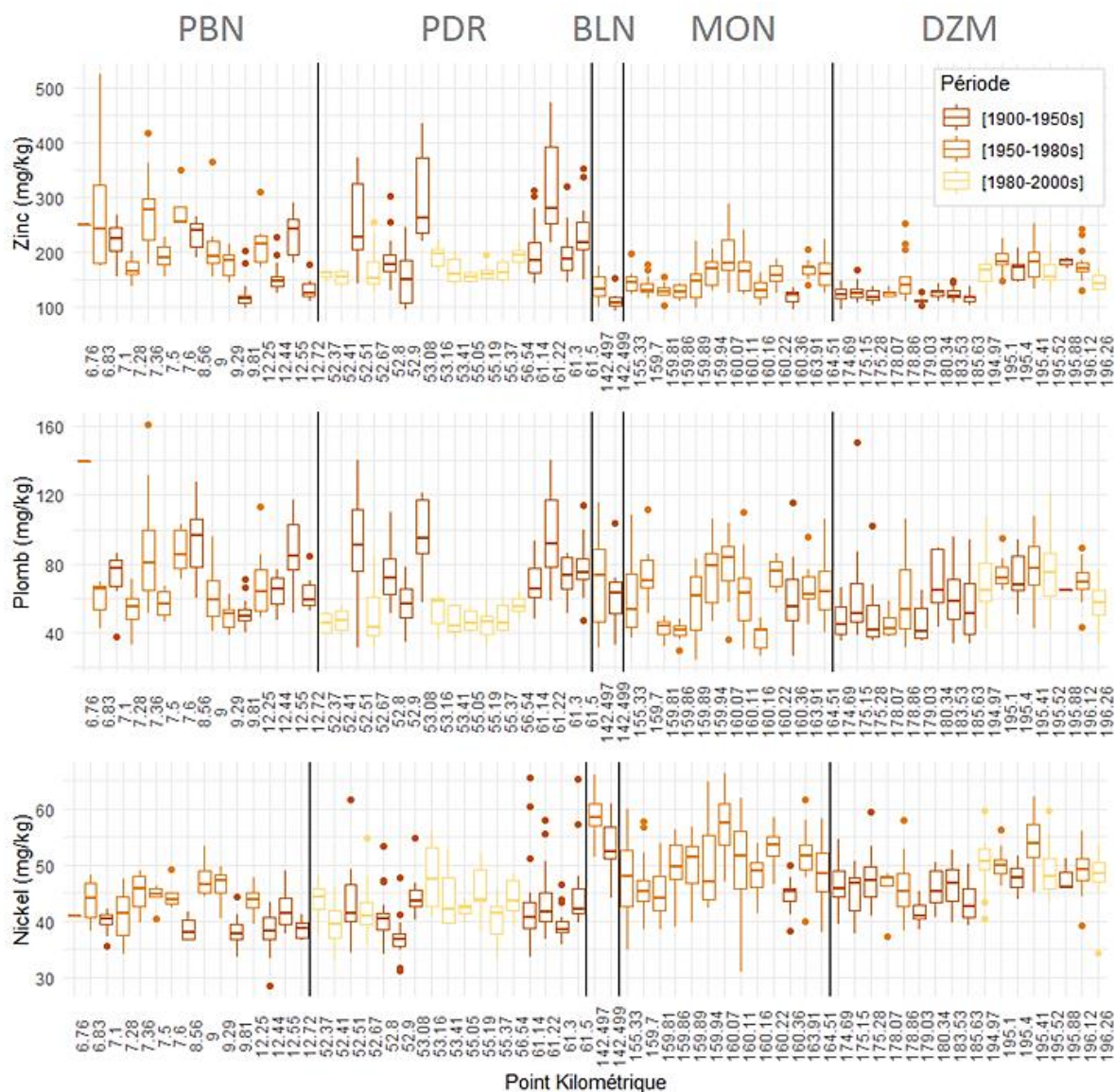


Figure 38 : teneurs en Zinc, Plomb et Nickel, selon un gradient amont-aval, présenté par secteur et selon la période d'atterrissement du dépôt estimée par SIG. Une boîte à moustache correspond à un profil sédimentaire prélevé à la tarière pédologique de la surface au toit de galets par segment de 20cm. Les analyses (triplicats) ont été réalisées au XRF portatif *Spectro xSort*, module *enviro-h* sur sédiments secs tamisés à 63 μm .

7. CONCLUSIONS

L'approche multi-proxy conduite sur 6 RCC auxquels s'ajoute le sous-secteur en Rhône total à BEC, a permis :

- de comprendre l'impact des aménagements sur les processus de rétraction de la bande active et sur la dynamique d'atterrissement de la plaine alluviale du Rhône.
- d'évaluer les épaisseurs et volumes de sédiments fins et grossiers stockés sur les marges alluviales.
- de mieux appréhender le signal chimique des polluants du Rhône et ainsi, de mieux cerner les risques encourus en cas de remobilisation des sédiments fins.

Ainsi, nous avons observé que les différentes phases d'aménagement (endiguement et dérivation) ont eu des effets très significatifs sur la sédimentation de la plaine alluviale.

Sur le **secteur de BLN**, on observe une rétraction de la bande active de 22% pour la période pré-Girardon (1809-1860), 12% supplémentaires (base 1809) pour la période « phase d'endiguement » (1860-1910), 22 % pour la période pré-dérivation (1910-1954), 6 % pour la période post-dérivation (1954-2017). La bande active de 2017 ne représente alors plus que 38% de la BA de 1809, 49 % de la BA de 1860).

Les épaisseurs de sédiments fins sont réparties de façon homogène quelle que soit l'unité géohistorique (2m en moyenne pour l'unité post-dérivation contre 2,3 m pour l'unité pré-dérivation). On note que les épaisseurs de grossiers sont plus importantes pour l'unité pré-dérivation que pour l'unité post-dérivation (4,4 contre 3,2 m). Les volumes estimés de sédiments fins sont plus importants sur la période pré-dérivation (épaisseur de fines et surface atterries plus importantes : en moyenne 2,3 m sur 121 ha) qu'au niveau des autres unités géohistoriques. Les volumes de sédiments grossiers associés sont aussi plus importants sur cette période-là. En outre, les volumes de grossiers de l'unité post-dérivation sont tout de même évalués à 1,1 millions de mètres cubes et représentent une recharge sédimentaire potentielle à la fois plus facilement remobilisable par le fleuve (unité la plus proche du chenal) et recouverte par de moindres stocks de sédiments fins.

Les concentrations en ETM observées à BLN (Zinc = 120,4 mg/kg, Plomb = 64,8 mg/kg) correspondent à des valeurs qui ne dépassent pas les seuils S1. En revanche, le Nickel ([Ni] = 55,6 mg/kg), bien que dépassant le seuil S1 correspond à une valeur « normale haute » pour le Rhône.

Sur le **secteur de BEC**, on observe une rétraction de la bande active de 25% pour la période pré-Girardon (1810-1860), 6 % supplémentaires (base 1810) pour la période « phase d'endiguement » (1860-1910), 11 % pour la période pré-dérivation (1910-1954), 15 % pour la période post-dérivation (1954-2017). La bande active de 2017 ne représente alors plus que 41% de la BA de 1809, 55 % de la BA de 1860).

Il est en outre intéressant de montrer la différence de dynamique des phénomènes d'atterrissement entre les sections en RCC et la section en Rhône total. A BEC, secteur qui présente les deux configurations, le phénomène est décalé dans le temps : les surfaces s'atterrissent fortement durant la phase de dérivation (1962-1975) sur la partie RCC et n'augmentent plus par la suite (1975-2017), tandis que sur le tronçon Rhône total (aval), l'atterrissement est quasi nul durant la période 1962-1975 et s'effectue principalement durant la période 1975-2017. Le tronçon en Rhône total (aval) est notamment associé à un plus fort phénomène d'incision sur l'ensemble de la période post-dérivation que la partie amont.

Il est difficile de définir des tendances générales sur les épaisseurs et les volumes de sédiments fins et grossiers au regard de l'échantillonnage réalisé à ce jour.

L'analyse comparative a permis de mettre cependant en évidence des similarités et différences en inter-sites :

- Une rétraction plus importante pour BLN et BEC que sur les autres secteurs lors de la phase **1810s-1860/1876** (~22%) alors que le Rhône voit apparaître sur son cours les premiers aménagements de digues de grande envergure. Si sur les secteurs de PBN, PDR, DZM et BLN, la **phase de correction** présente une rétraction du même ordre de grandeur (43 à 53%), ce n'est pas le cas à BEC où le phénomène est deux fois moins fort. Au niveau des secteurs de PBN, BLN, DZM et BEC, la phase **post-dérivation** est caractérisée une rétraction du même ordre de grandeur (14 à 18%), ce n'est pas le cas à BLN où le phénomène est deux fois moins fort.
- Les deux secteurs amont (PBN et PDR) arborent des signatures chimiques bien différentes des trois secteurs aval (BLN, MON et DZM). PBN et PDR présentent des teneurs en zinc globalement plus importantes que BLN, MON et DZM, tandis que ces derniers ont des sédiments plus riches en nickel, enrichissements possiblement imputables à l'arrivée d'affluents de la rive gauche en provenance des Alpes occidentales. Les teneurs en plomb sont quant à elles plus importantes à PBN et PDR qu'à BLN, MON et DZM, mais cette différence semble portée par une distribution plus hétérogènes également (des valeurs faibles « plus faibles » et des « valeurs fortes plus fortes » à PBN et PDR qu'à BLN, MON et DZM). La présence de ces deux sites justes en aval de l'agglomération lyonnaise, du bassin industriel sud lyonnais (« vallée de la chimie ») pourrait expliquer cette variabilité.

Les analyses complémentaires prévues pour l'automne 2021 concernent :

- L'analyse des radargrammes complémentaires.
- L'étude des carottes sédimentaires prélevées au printemps 2021 (analyses granulométriques, chimie, etc.).

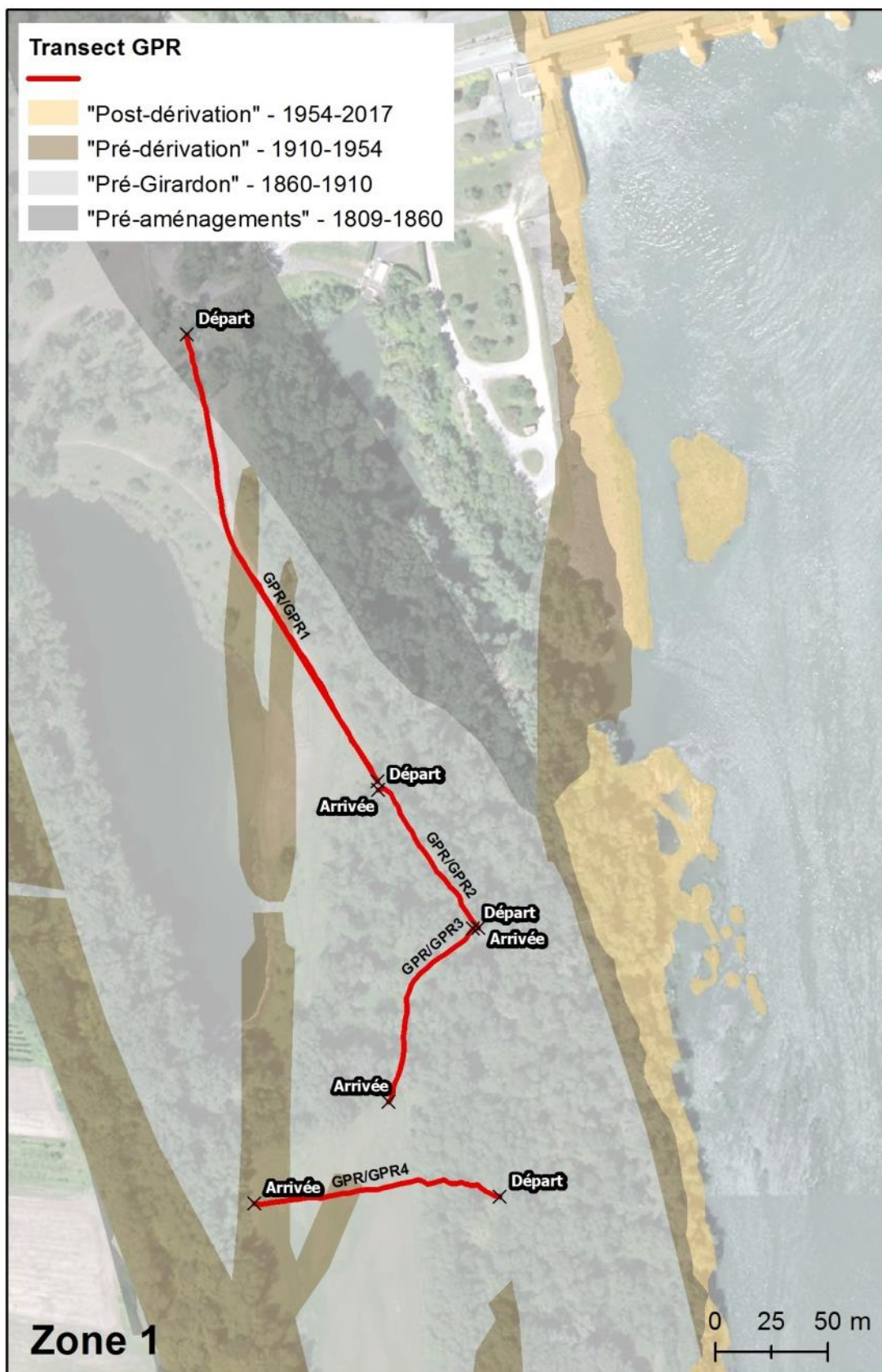
Elles seront présentées dans le cadre d'un rapport coordonné par l'ENTPE.

8. ANNEXES

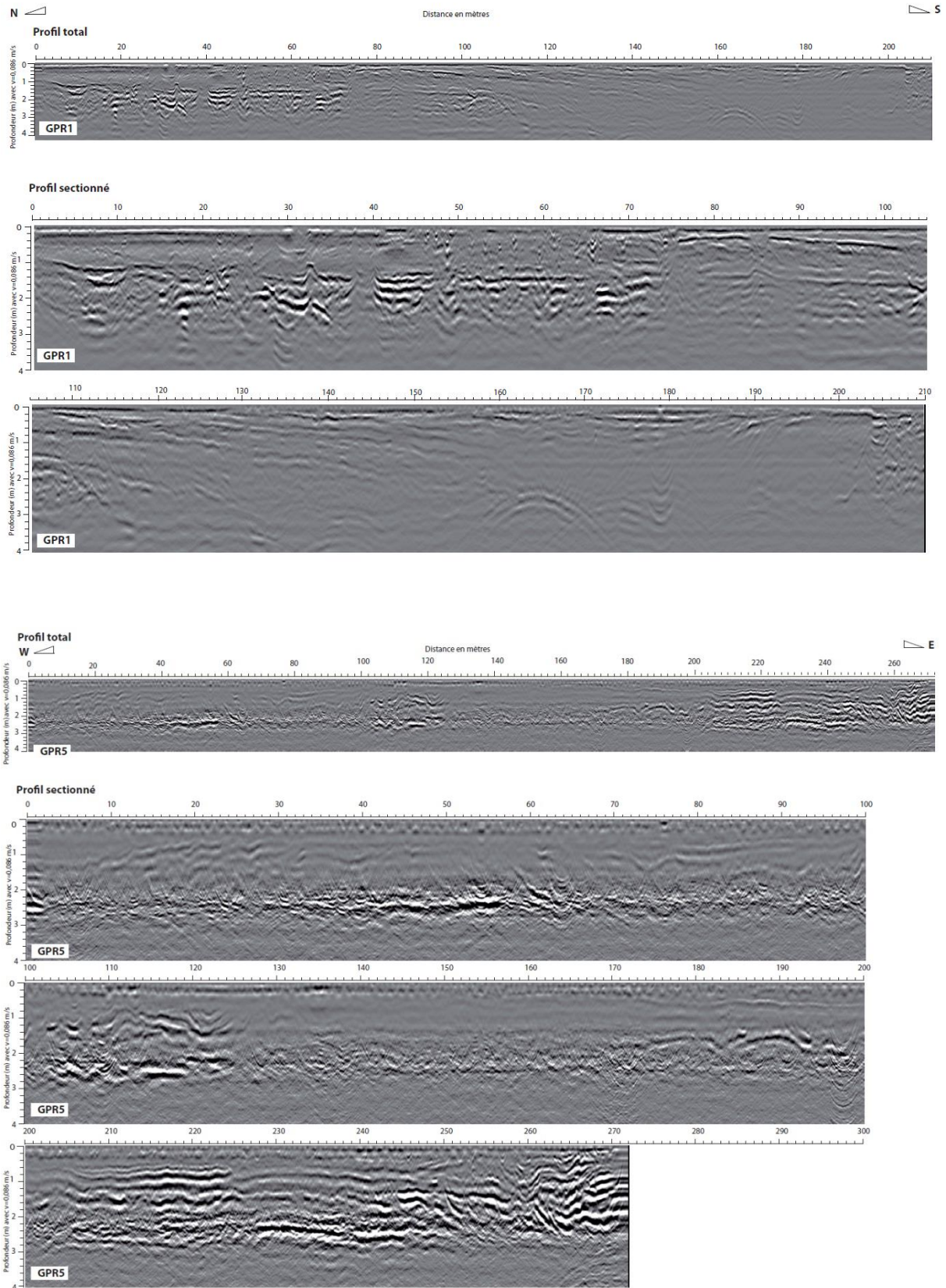
Localisation des transects GPR à BLN zone 1

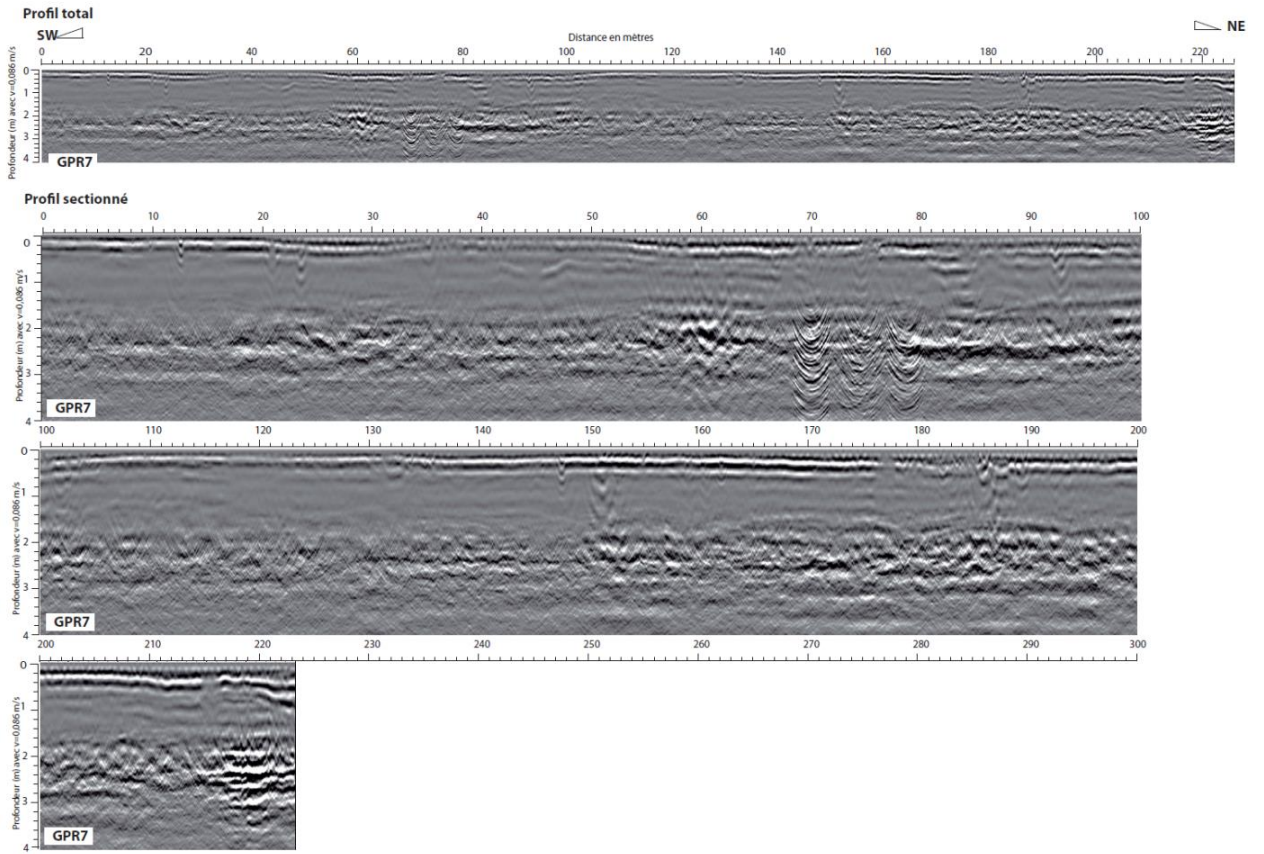


Localisation des transects GPR à BLN zone 2



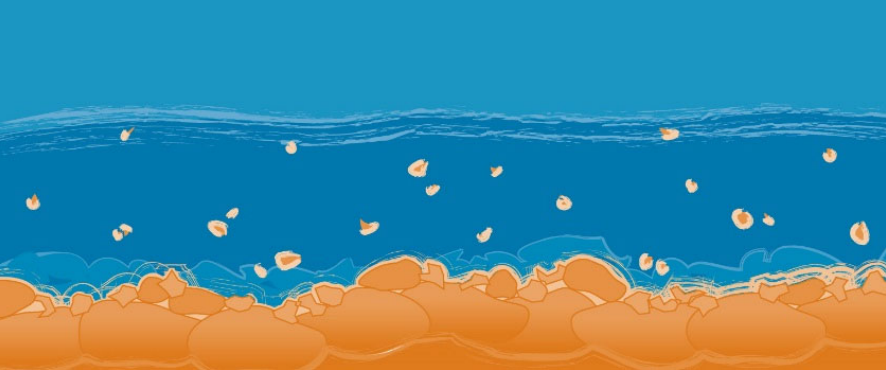
Radargrammes additionnels à BLN (version intermédiaire non détendancée)





9. Références

- Delile, H., Masson, M., Miège, C., Le Coz, J., Poulier, G., Le Bescond, C., Radakovitch, O., Coquery, M., (2020). Hydro-climatic drivers of land-based organic and inorganic particulate micropollutant fluxes: The regime of the largest river water inflow of the Mediterranean Sea. *Water Research* 185, 116067. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116067>
- Dendievel, A.-M., Mourier, B., Dabrin, A., Delile, H., Coynel, A., Gosset, A., Liber, Y., Berger, J.-F., Bedell, J.-P. (2020). Metal pollution trajectories and mixture risk assessed by combining dated cores and subsurface sediments along a major European river (Rhône River, France). *Environment International* 144, 106032. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106032>
- Gaydou P. (2013a). Schéma directeur de ré-activation de la dynamique fluviale des marges du Rhône. Secteur de Baix-Le-Logis-Neuf. Version du 23 Mai 2013. OSR 2
- Gaydou P. (2013b). Schéma directeur de ré-activation de la dynamique fluviale des marges du Rhône. Secteur de Vallabrègues. Version du 23 Mai 2013. OSR 2
- Morereau A., Lepage H., Claval D., Cossonnet C., Ambrosi J.P., Mourier B., Winiarski T., Copard Y., Eyrolle F. (2020) Trajectories of technogenic tritium in the Rhône River (France), *Journal of Environmental Radioactivity*, Volumes 223–224, ISSN 0265-931X, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106370>.
- Piégay H., Seignemartin G., Tena A., Räßple B., Barra A., Berger J.-F., Roux G., Michal T., Vazquez D., Winiarski T. (2018). RAPPORT N°2 - Stocks sédimentaires des marges actives – Approche comparée inter-sites DZM – PDR – PBN. Action II.2, II.3 et II.4. Sédimentation et morphologie du lit majeur. OSR4 (2015-2017).
- Raccasi G. (2008). Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, Recherches en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues. Thèse de doctorat. Université de Provence - Aix-Marseille I, 334 pp.
- Regli, C., Huggenberger, P., Rauber, M. (2002). Interpretation of drill core and georadar data of coarse gravel deposits. *Journal of Hydrology* 255, 234–252. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00531-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00531-5)
- Seignemartin G. (2020). Évolution contemporaine des « casiers Girardon » du Rhône : approche géohistorique à partir d'indicateurs morpho-sédimentaires, géochimiques et phytoécologiques. Université Lumière Lyon 2. Thèse de doctorat.
- Seignemartin G., Tena A., Räßple B., Arnaud F., Barra A., Berger J.-F., Faure O., Launay M., Le Coz J., Roux G., Massor H., Winiarski T., Piégay H. (2018.) RAPPORT N°1 - Stocks sédimentaires des marges actives – Méthodologie générale et application sur Péage-de-Roussillon. Action II.2, II.3 et II.4. Sédimentation et morphologie du lit majeur. OSR4 (2015-2017).
- Tena A., Piégay H., Seignemartin G., Barra A., Berger J.F., Mourier B., Winiarski T. (2020). Cumulative effects of channel correction and regulation on floodplain terrestrialisation patterns and connectivity. *Geomorphology* 354. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107034>.



Observatoire des Sédiments du Rhône

Plan
Rhône
Saône

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

agence
de l'eau
RHÔNE MEDITERRANÉE
CORSE
établissement public de l'État

AVEC LE SOUTIEN DE L'UNION EUROPÉENNE

L'EUROPE S'ENGAGE
pour le Rhône
et la Saône
avec le FEDER

UNION EUROPÉENNE

CNR

EDF

La Région
Occitanie
Pyrénées - Méditerranée

RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR

La Région
Auvergne-Rhône-Alpes

cnrs

EVS
Environnement
Vie Société

cerege
CENTRE EUROPÉEN
DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT
DES GÉOCHIMIES DE L'ENVIRONNEMENT

INRAE

ENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Ifremer

mio
Mediterranean Institute
of Oceanography

ZA
Zone
Atelier
LTER FRANCE BASSIN DU RHÔNE

Ohm
Observatoire Hommes-milieux - Vallée du Rhône

LabEx
DRIHM

cnrs

INVESTISSEMENTS
D'AVENIR

Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact :

bertrand.morandi@graie.org