



HAL
open science

**Programme OSR4 2015-2017. Actions II.2, II.3 et II.4. :
Sédimentation et morphologie du lit majeur. RAPPORT
N°1 - Stocks sédimentaires des marges actives -
Méthodologie générale et application sur
Péage-de-Roussillon.**

Gabrielle Seignemartin, Alvaro Tena-Pagan, Bianca Räßple, Fanny Arnaud,
Adrien Barra, Jean-Francois Berger, Olivier Faure, Marina Launay Launay,
Jérôme Lecoq, Gwenaëlle Roux, et al.

► **To cite this version:**

Gabrielle Seignemartin, Alvaro Tena-Pagan, Bianca Räßple, Fanny Arnaud, Adrien Barra, et al..
Programme OSR4 2015-2017. Actions II.2, II.3 et II.4. : Sédimentation et morphologie du lit majeur.
RAPPORT N°1 - Stocks sédimentaires des marges actives - Méthodologie générale et application sur
Péage-de-Roussillon.. [Rapport de recherche] UMR 5600 EVS CNRS; LEHNA - UMR C NRS 5023;
IRSTEA. 2018, 76 p. hal-02072794

HAL Id: hal-02072794

<https://hal.science/hal-02072794>

Submitted on 23 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.

OSR4 2015-2017

Sédimentation et morphologie du lit majeur

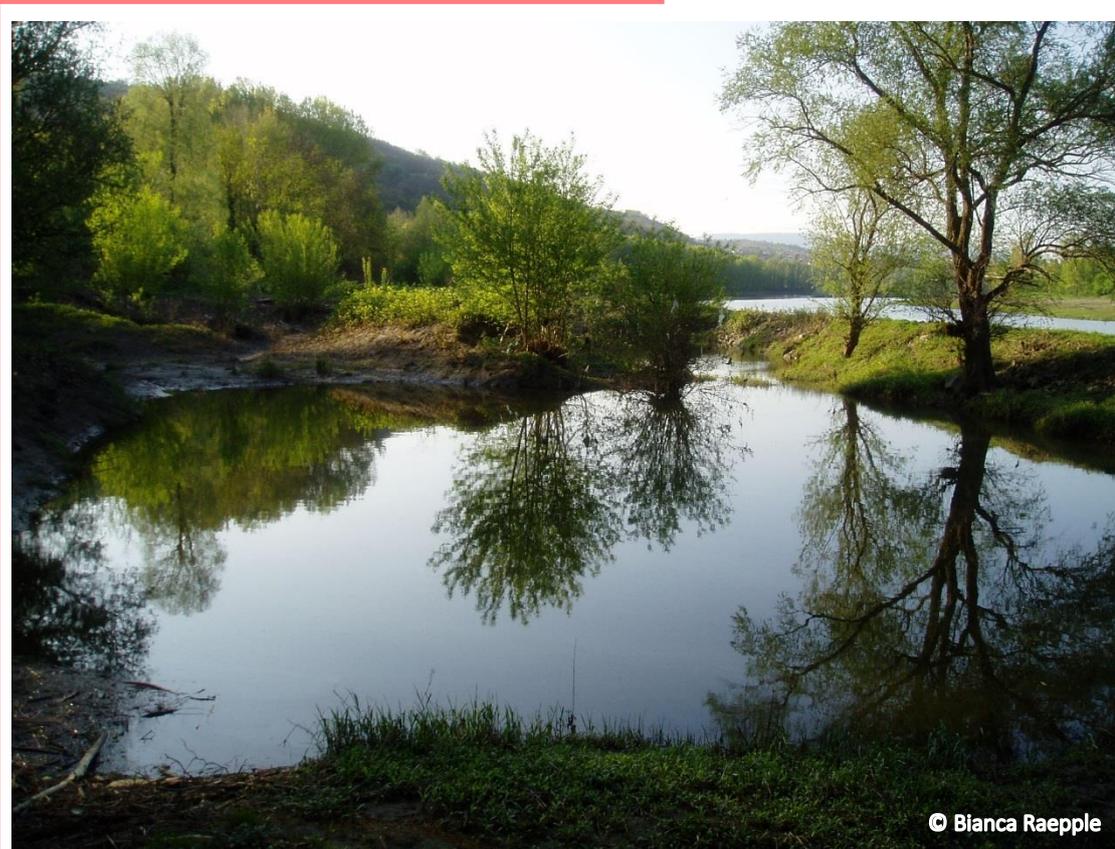


Observatoire
Sédiments
Rhône

Actions II.2, II.3 et II.4

RAPPORT N°1 - Stocks sédimentaires des
marges actives – Méthodologie générale et
application sur Péage-de-Roussillon

Version finale 2018



© Bianca Raeppe

Auteurs : Gabrielle Seignemartin, Alvaro Tena, Bianca Räßple, Fanny Arnaud, Adrien Barra, Jean-François Berger, Olivier Faure, Marina Launay, Jérôme Le Coz, Gwénaelle Roux, Hind Massor, Thierry Winiarski, Hervé Piégay

2015 - 2020



Donnons un avenir à notre fleuve

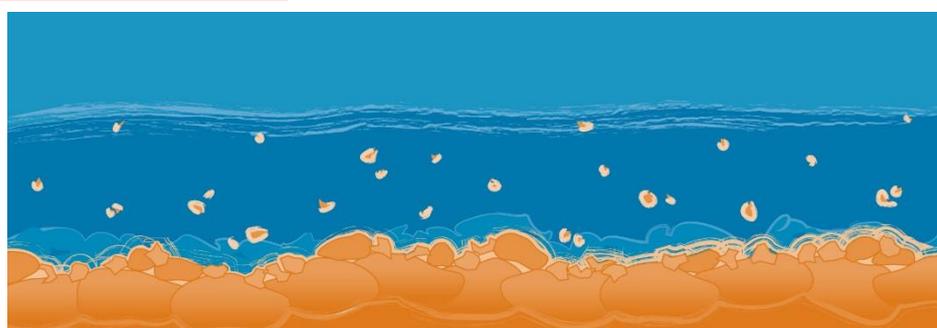


Table des matières

1.	CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	9
2.	PRESENTATION DU SITE : LE SECTEUR DE PEAGE-DE-ROUSSILLON	10
3.	MATERIEL ET METHODES	11
3.1.	Évolution planimétrique	11
3.1.1.	Présentation du jeu de données SIG	11
3.1.2.	Paramètres découlant des données planimétriques	13
3.2.	Sédimentation historique	13
3.2.1.	Sondage à la perche	14
3.2.2.	Radar géologique	15
3.2.3.	Carottage sédimentaire et analyses en laboratoire	16
3.3.	Concentrations en métaux des sédiments prélevés lors des sondages à la perche.....	18
3.3.1.	Echantillonnage des sédiments	18
3.3.2.	Techniques d'analyse chimique des sédiments	18
3.4.	Teneurs en métaux des végétaux.....	24
3.4.1.	Contexte de l'étude	24
3.4.2.	Présentation du site d'étude	24
3.4.4.	Techniques de prélèvements	25
3.4.5.	Protocoles de caractérisations chimique et temporelle	26
3.5.	Caractérisation du risque hydraulique associé à la sédimentation des marges.....	26
3.6.	Récapitulatifs des données disponibles sur Péage-de-Roussillon	27
4.	APPLICATION AU SITE DE PEAGE.....	29
4.1.	Évolution planimétrique	29
4.1.1.	Evolution planimétrique de la bande active	29
4.1.2.	Evolution planimétrique des casiers Girardon et des zones inter-épis	32
4.2.	Sédimentation historique	38
4.2.1.	Volumes et épaisseurs de sédiments	38
4.2.2.	Taux de sédimentation moyens des sédiments fins	39
4.2.3.	Analyses des profils GPR	41
4.2.4.	Granulométrie et teneurs en métaux lourds dans les carottes	42
4.3.	Concentrations en métaux dans les sédiments	44
4.3.1.	Sédiments de la plaine alluviale	44
4.3.2.	Cas spécifique des casiers	49
5.	RISQUES ASSOCIES	52
5.1.	Transferts de contaminants aux plantes	52

5.1.1.	Premiers résultats sur les sédiments de surface des casiers d'Arcoules	53
5.1.2.	Premiers résultats sur les profils sédimentaires des casiers d'Arcoules	56
5.1.3.	Premiers résultats sur les pools foliaires	57
5.1.4.	Liens entre les résultats des sédiments de surface, des profils et des pools foliaires	59
5.1.5.	Premiers résultats sur les carottes dendrologiques	60
5.1.6.	Discussion et perspectives	64
5.2.	Evaluation des effets hydrauliques de la sédimentation des marges	65
6.	CONCLUSION GENERALE	67
7.	ANNEXES	69

Table des figures, tableaux & annexes

Table des Figures

Figure 1. A) Localisation du site d'étude. B) Détails du RCC du Péage-de-Roussillon	10
Figure 2. Objectifs et méthodologie.....	11
Figure 3. Carte de la fréquence annuelle de submersion au niveau du pixel, sur le secteur de PDR	13
Figure 4. A. Sondage à la perche. B) Géolocalisation et mesure de l'épaisseur de sédiment au niveau d'un point d'observation. C) Localisation des sondages à la perche sur le site de Péage-de-Roussillon.	14
Figure 5. Le SIR-3000 au premier plan, et de gauche à droite les antennes de 100, 200 et 400 MHz.....	15
Figure 6. Localisation des 28 profils GPR réalisés sur PDR (tous les noms de profils ne sont pas présents). La Figure de droite représente les profils GPR positionnés sur la carte de Paléochenaux de J.P. Bravard (seuls les bras en tresses et les bancs du 19 ^{ème} siècle sont représentés en jaune et jaune/vert).	15
Figure 7. A) Localisation des carottes. B) Mise en place du carottier motorisé à percussion Cobra TT.	16
Figure 8. Granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000	16
Figure 9. Core-scanner Optical XRF Avaatech (Source : Avaatech)	17
Figure 10. Echantillon prélevé à la tarière pédologique	18
Figure 11. A. Résumé du protocole de préparation des échantillons avant analyse XRF B. Conditionnement C. Echantillon après le processus de préparation (<63µm), D. Disposition en capsules pour être analysé avec l'analyseur XRF portatif SPECTRO xSort en E.	19
Figure 12. Graphiques comparant les concentrations estimées par XRF, SAAF et ICP	22
Figure 13. Localisation des prélèvements de végétation à Péage-de-Roussillon, 2016.....	25
Figure 14. Résumé du plan d'échantillonnage et d'analyses	25
Figure 15. Représentation schématique du tronçon modélisé entre Ternay et la Cance.....	26
Figure 16. Evolution des tracés de la bande active (1860, 1905, 1938, 1949, 1974, 1986, 2008)	29
Figure 17. Série diachronique des tracés successifs de la bande active à Péage-de-Roussillon entre 1812-1830 et 2009	31
Figure 18. Périodes de sédimentation observées à Péage-de-Roussillon à partir de l'analyse des sources cartographiques et photographiques	31
Figure 19. Evolution de la superficie de la bande active à PDR entre 1860 et 2009.....	32
Figure 20. Évolution des surfaces émergées dans les ouvrages Girardon de Péage-de-Roussillon (avant et après la dérivation)	32
Figure 21. Evolution planimétrique à PDR	33
Figure 22. Occupation du sol dans les casiers du train n° 29 entre 1974 et 2009	35
Figure 23. Photographies du casier 12 en 1948 et en 2009	36
Figure 24. Occupation du sol (surfaces cumulées) dans le train de casiers 29 de PDR entre 1974 et 2009	36
Figure 25. Terrestrialisation et végétalisation du train de casiers 29 de 1948 à 2009.....	37
Figure 26. Bandes actives et sondages à la perche sur le secteur de Péage-de-Roussillon	38
Figure 27. Unités fluviales du secteur de Péage-de-Roussillon.....	38
Figure 28. Epaisseurs de sédiments fins et taux moyens de sédimentation des fines selon l'âge du dépôt (à gauche) ou l'unité (à droite) à Péage-de-Roussillon	40
Figure 29. Etude diachronique du site « GPR5 » à Péage de Roussillon (source : IGN)	41
Figure 30. Interprétation d'un radargramme effectué dans les casiers Girardon de Péage-de-Roussillon (GPR5 – Longueur 540 m) s'appuyant sur une série de sondages à la perche	41
Figure 31. A) Localisation des carottes à Péage-de-Roussillon et B) Granulométrie (D50, courbe grise) et résidus des teneurs en Zinc courbe noire) en fonction de la granulométrie. On utilise les résidus de la loi concentration en Zinc vs. Granulométrie, car les concentrations sont affectées par les granulométries et les résidus permettent de pondérer l'effet de cette granulométrie. Les paliers horizontaux de couleurs bleu, rouge, et orange représentent nos hypothèses de début de sédimentation et le taux de sédimentation moyen associé. Rouge représente un changement de dynamique de bras principal à bras secondaire, Bleu, l'effet Girardon et Orange, l'effet post-dérivation (RCC).	43
Figure 32. Concentration en Zinc (mg/kg) dans les sédiments superficiels à Péage-de-Roussillon.....	45

Figure 33. Concentrations des éléments métalliques dans les sédiments de surface en fonction des unités alluviales.....	46
Figure 34. Relation entre la concentration en Zinc et la fréquence annuelle de submersion	46
Figure 35. Évolution des teneurs moyennes en éléments métalliques de la surface en fonction des dates/périodes de début de sédimentation	47
Figure 36. Résultats des analyses pour différentes teneurs métalliques mesurées sur la carotte C10a –	48
Figure 37. Résultats des analyses pour différentes teneurs métalliques mesurées sur la carotte C10b – (ICP / fraction totale ; la ligne pointillée représente le seuil S1-S1)	49
Figure 38. Graphiques représentant les teneurs en métaux en fonction de la profondeur du prélèvement dans les profils verticaux de PDR. Cercles rouges : échantillons avec les teneurs les plus élevées en polluants	50
Figure 39. Concentrations en Zinc (mg/kg) à Péage-de-Roussillon, selon la profondeur de prélèvement.....	51
Figure 40. Exemple SIG de datation des dépôts sédimentaires.....	52
Figure 41. Concentrations des sédiments de surfaces en Arsenic (A) et Cadmium (B) par ICP-MS. Sources - photographies : IGN, données de chimie : Laboratoire SPIN, Ecole des Mines de St-Etienne - Prélèvements de surface Août 2016 – Analyses sur la fraction < 63 µm	53
Figure 42. Concentrations des sédiments de surfaces en Plomb (A) et Chrome (B) par ICP-MS. Sources - photographies : IGN, données de chimie : Laboratoire SPIN, Ecole des Mines de St-Etienne - Prélèvements de surface Août 2016 – Analyses sur la fraction < 63 µm	54
Figure 43. Concentrations des sédiments de surfaces en Plomb (A) et Chrome (B) par ICP-MS. Sources - photographies : IGN, données de chimie : Laboratoire SPIN, Ecole des Mines de St-Etienne - Prélèvements de surface Août 2016 – Analyses sur la fraction < 63 µm	55
Figure 44. Localisation des profils sédimentaires prélevés à la tarière pédologique et analysés au XRF portatif, en fonction de l'année d'exondation des surfaces	56
Figure 45. Concentrations en métaux dans les profils sédimentaires	57
Figure 45. Concentrations en métaux dans les profils sédimentaires	57
Figure 46. Concentrations foliaires en métaux	58
Figure 47. Localisation des carottes dendrologiques.....	60
Figure 48. Concentrations (en mg/kg) de 20 principaux éléments détectés à l'ICP-MS dans les 30 carottes dendrologiques, selon l'essence, le casier et la date de terrestrialisation des surfaces. Laboratoire SPIN, Ecole des Mines de St-Etienne, UMR5600	61
Figure 49. ACP réalisée à partir des teneurs des 20 principaux métaux détectés à l'ICP-MS dans les 30 carottes dendrologiques. AN = Acer negundo, PN = Populus nigra, SA = Salix alba	62
Figure 50. Profil en long du bief du Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon a) en 1897 et b) en 2015	66
Figure 51. Niveau d'eau pour différents débits et altitude du fond du lit entre les PK 52 et 58 en 1897 et 2015....	67

Table des tableaux

Tableau 1. Archives géographiques disponibles pour PDR	12
Tableau 2. Coefficients de corrélation, de détermination et significativité.....	21
Tableau 3. Statistiques sur les écarts des estimations entre XRF-ICP et XRF-SAAF	23
Tableau 4. Jeu de données "SIG"	27
Tableau 5. Jeu de données "Sédiments"	27
Tableau 6. Jeu de données "Relevés de terrain".....	28
Tableau 7. Jeu de données "Végétation"	28
Tableau 8. Caractéristiques des unités fluviales à Péage-de-Roussillon	39
Tableau 9. ANOVA sur les données ICP-MS, comparant les teneurs en fonction des essences ou de l'âge de dépôts	63

Table des annexes

<i>Annexe 1. Concentration en Plomb des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR</i>	<u>69</u>
<i>Annexe 2. Concentration en Nickel des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR</i>	<u>70</u>
<i>Annexe 3. Concentration en Cuivre des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR</i>	<u>71</u>
<i>Annexe 4. Concentration en Fer des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR</i>	<u>72</u>
<i>Annexe 5. Concentration en Fer des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR</i>	<u>73</u>

1. Contexte et objectifs

Les travaux de l’Axe II de l’OSR4 (2015-2017) viennent compléter l’Axe II de l’OSR3 (2013-2014) et les Actions 2, 4 et 5 de l’Axe « Stockage et déstockage » du programme triennal précédent (OSR2 ; 2009-2012). Ils visent à mieux comprendre la variabilité de la sédimentation fine contemporaine et de la contamination métallique potentielle dans le lit majeur et dans les annexes fluviales (lônes, marges) du Rhône. Ces recherches doivent fournir de nouvelles connaissances afin de mieux aborder les enjeux liés au stockage/déstockage des sédiments et des contaminants associés lors des opérations de ré-élargissement.

Les données obtenues dans le contexte des précédents programmes de recherche (RhônEco, OHM Vallée du Rhône) ainsi que des travaux réalisés par d’autres institutions ont permis de définir un protocole méthodologique de caractérisation de la sédimentation fine sur un tronçon test, le Rhône court-circuité (RCC) de Péage-de-Roussillon. Les premiers résultats obtenus sur ce site ont été complétés par de nouvelles campagnes d’acquisition et le traitement en laboratoire de toutes les données qui ont été acquises préalablement. Ce site est celui sur lequel on dispose du jeu de données le plus riche et le plus finalisé.

Le présent rapport synthétise la méthodologie mise en œuvre et les résultats acquis sur le site pilote de Péage-de-Roussillon des Actions II.2 et II.4. Il repose sur une analyse de la sédimentation et une évaluation de la contamination potentielle par les métaux. Il fournit une estimation des stocks sédimentaires, il permet de les spatialiser, de souligner leurs dynamiques actuelles (volumes et taux de sédimentation), et de localiser les zones potentiellement contaminées par les métaux. Il présente également les premières approches permettant de lier ces caractéristiques avec une évaluation des risques environnementaux associés, que ce soit en termes de transferts des contaminants aux plantes ou de risques hydrauliques. Ce travail sert ainsi de référentiel pour les suivis futurs des sites de ré-élargissement et de redynamisation des marges, et pour les actions à venir concernant la gestion sédimentaire, hydraulique et écologique du site.

*Un second rapport axé sur la comparaison inter-sites (incluant les secteurs de Pierre-Bénite et Donzère-Mondragon) vient compléter cette étude. Il s’agit du **RAPPORT N°2 - Stocks sédimentaires des marges actives – Approche comparée inter-sites DZM – PDR – PBN.***

2. Présentation du site : le secteur de Péage-de-Roussillon

Le secteur d'étude est situé dans la plaine alluviale du Rhône entre les PK 51 et 59. Il est composé d'un tronçon appelé Vieux-Rhône (le cours naturel du Rhône) qui a été court-circuité en 1977 par le canal d'aménée de l'usine hydro-électrique de Sablons (Figure 1, A et B).

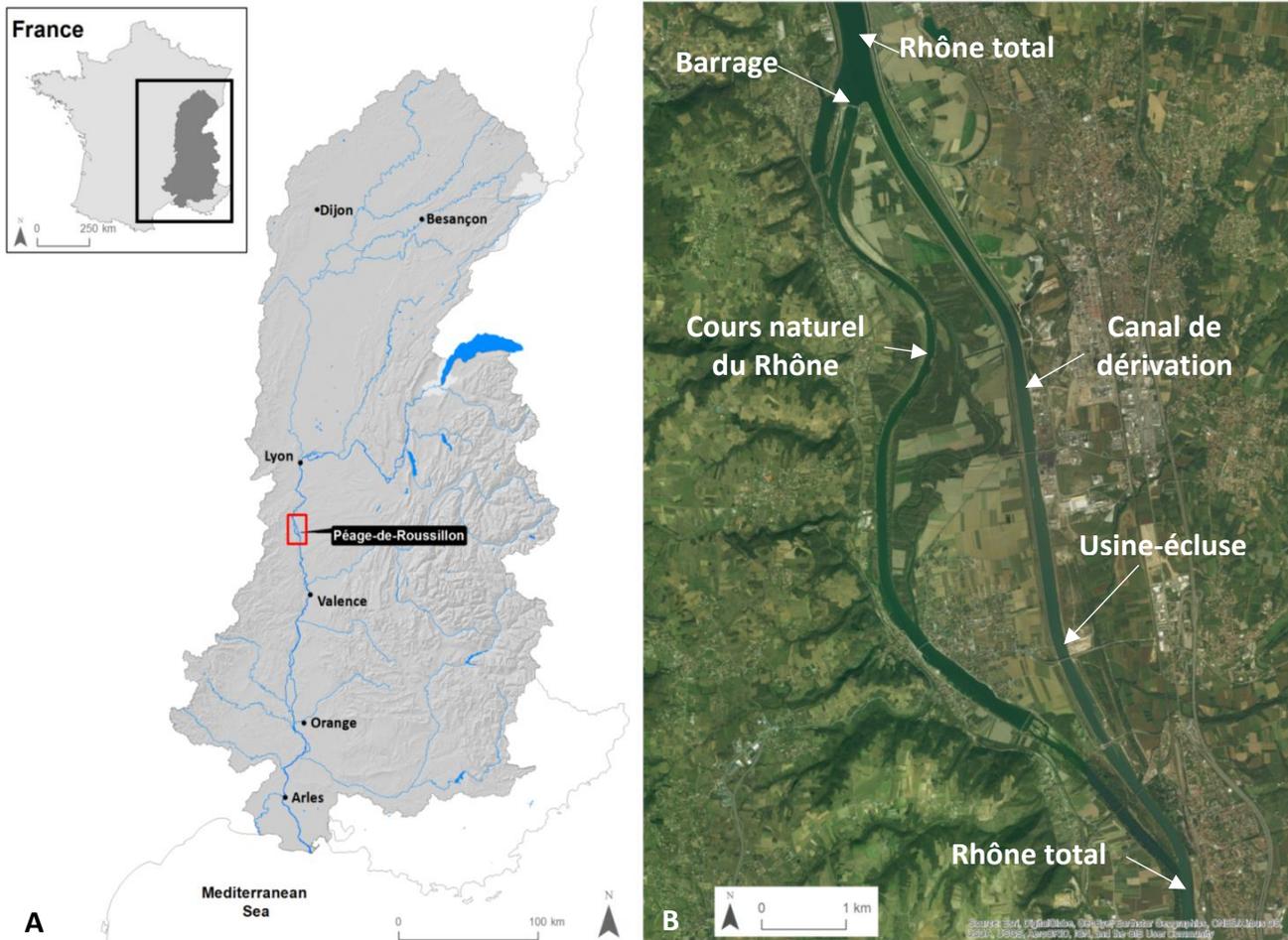


Figure 1. A) Localisation du site d'étude. B) Détails du RCC du Péage-de-Roussillon

3. Matériel et Méthodes

Le protocole a été établi en fonction des informations disponibles sur tous les RCC et appliqué à l'ensemble des tronçons étudiés. Toutefois, en tant que secteur pilote, Péage-de-Roussillon sert ici d'exemple pour illustrer l'approche méthodologique. Cette approche s'organise en quatre grands volets : évolution planimétrique, sédimentation historique, chimie élémentaire des sédiments et patrons métalliques dans les végétaux. Ces quatre grands volets s'ouvrent sur la thématique des risques chimique et hydraulique.

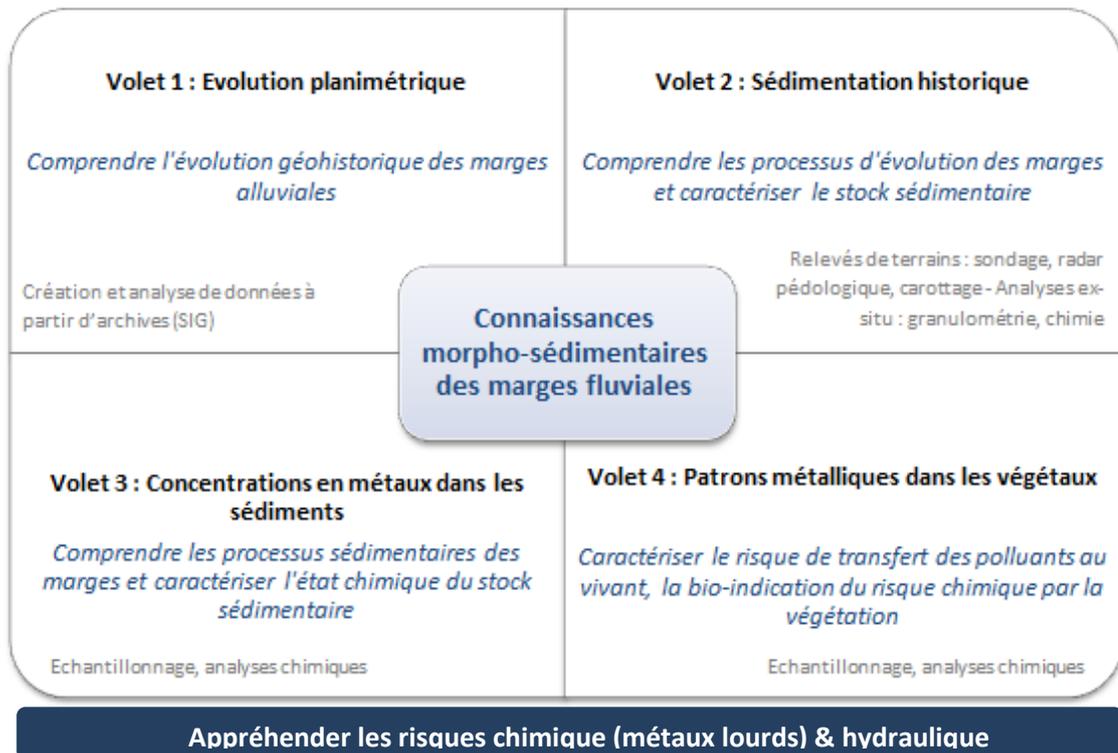


Figure 2. Objectifs et méthodologie

3.1. Évolution planimétrique

L'étude de l'**évolution planimétrique** a été réalisée sous SIG. Plusieurs couches géomatiques ont été créées selon des procédés de géoréférencement, de photo-interprétation et de digitalisation. On obtient alors une représentation vectorielle de la bande active à différentes dates au cours de la période contemporaine. Cela permet de connaître l'évolution paysagère du tronçon à la suite de la construction des différents aménagements hydrauliques. Pour plus de détails, le protocole est présenté dans le livrable II.1.

3.1.1. Présentation du jeu de données SIG

Péage de Roussillon

Bien que beaucoup d'analyses ont été menées sur le secteur du Péage-de-Roussillon dans le cadre de l'OSR3, nous avons effectué une digitalisation de nouvelles séries temporelles (1974, 1986) afin d'établir de nouveaux points de référence pour caractériser l'évolution de la bande active (Figure 3A).

Tableau 1. Archives géographiques disponibles pour PDR

Date	Documents	Caractéristiques & utilité	Acquisition
1810-1830	Cadastre napoléonien (Levé commune par commune).	Référence de l'état du tronçon avant le gros des aménagements. Seulement quelques digues ont été construites pour lutter contre les inondations. → <i>Etat de référence d'un Rhône très peu aménagé.</i>	OSR4
1860	Carte des Ponts et Chaussées de 1860	Référence de l'état du tronçon avant les aménagements Girardon → <i>Etat de référence d'un Rhône très peu aménagé.</i>	OSR3
1905	Plan Branciard (Levé juste après les aménagements Girardon.)	Plan technique → <i>Visualisation des structures d'endiguement.</i>	OSR3 & 4
1938 et 1949	Photographies aériennes	Premières prises de vue réelles du secteur, se délestent alors des inconvénients de l'abstraction cartographique des cadastres et cartes anciennes. → <i>Aperçu de l'état du cours d'eau quelques décennies (à t+50ans) après la construction des aménagements Girardon.</i>	OSR3
1974	Photographies aériennes	Référence de l'état du tronçon post-Girardon, pré-dérivation : mise en place des installations hydro-électriques de Saint-Pierre-de-Bœuf en 1977. → <i>Par comparaison avec 1938, aperçu de l'évolution de la dynamique de terrestrialisation des marges alluviales (à t+80ans) après la construction des aménagements Girardon.</i>	OSR4
1986	Photographies aériennes	Référence de l'état du tronçon post-Girardon, post-dérivation : premier aperçu de l'état du cours d'eau après les aménagements de dérivation. → <i>Aperçu de la réponse rapide du cours d'eau après la dérivation.</i>	OSR4
2009	Ortho-photographies	Etat actuel du fleuve aménagé. → <i>Aperçu de la réponse à t+30ans du cours d'eau après la dérivation.</i>	OSR3

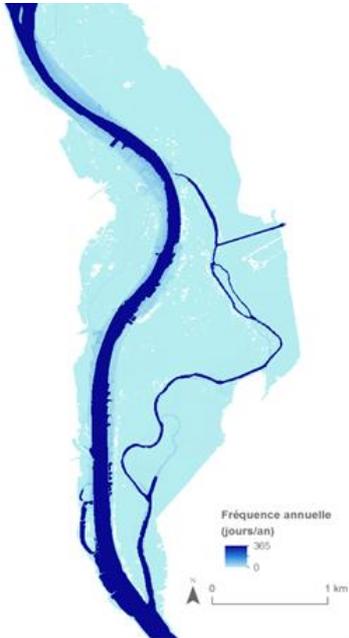
Le tableau 1 synthétise les différents documents utilisés et les raisons ayant conduit à leur sélection. Globalement, les dates sélectionnées permettent de caractériser l'état du cours d'eau entre chaque phase d'aménagement. L'intégration des nouvelles dates (1974 et 1986) permet d'effectuer un bilan temporellement très cadré des effets de la dérivation sur ce secteur.

L'analyse détaillée de ces dates permet de mieux comprendre les patrons spatiaux et temporels de terrestrialisation dans les différents compartiments fluviaux du lit majeur. Ces compartiments ont été déterminés selon des caractéristiques hydro-morphodynamiques. On retrouve alors :

- les **champs d'épis** qui sont installés au contact direct du chenal.
- les **casiers** sont eux aussi installés au contact du chenal mais séparés par une digue submersible.
- la **plaine jeune** qui présente sur les marges des anciens bras déconnectés.
- la **plaine ancienne** correspondant au reste du lit majeur, encore plus déconnecté du chenal.

L'hypothèse sous-jacente est qu'en fonction de leurs caractéristiques hydrauliques et morpho-sédimentaires, ces compartiments présentent des réponses potentiellement différentes aux phases d'aménagement.

3.1.2. Paramètres découlant des données planimétriques



Associées aux données physiques collectées lors des campagnes de terrains (présentées en détail dans la partie 3.2.), ces données SIG fournissent un ensemble de paramètres utiles à la caractérisation de l'évolution de la plaine alluviale (stock de sédiments grossiers, sédiments fins, taux de sédimentation, etc.), sur lesquels nous reviendrons en détail dans la suite de ce rapport.

Le couplage avec des données LiDAR de la BDT Rhône permet aussi de construire jeux de données de fréquence (Figure 3) et de durée d'inondation (Džubáková & al, 2015) : il est donc possible d'en extraire des paramètres de connectivité hydrologique pour les différents compartiments alluviaux et découpages historiques.

Figure 3. Carte de la fréquence annuelle de submersion au niveau du pixel, sur le secteur de PDR

3.2. Sédimentation historique

Afin d'analyser la sédimentation historique, plusieurs campagnes de terrains ont permis de renseigner 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.
- les **radargrammes** réalisés au radar géologique permettent d'identifier les caractéristiques morphologiques du remplissage sédimentaire des différents sites et de corroborer les résultats obtenus par les sondages à la perche. Couplés à l'analyse géomorphologique de la surface, ils fournissent un canevas des processus de sédimentation. Ceci permet de choisir des emplacements stratégiques pour les sites de carottage afin qu'ils soient représentatifs de milieux sédimentaires spécifiques (selon des gradients de connexion).
- les **carottes sédimentaires** permettent de reconstituer plus finement mais localement l'histoire hydrosédimentaire d'un site.

L'évolution de la **granulométrie** rend compte de l'évolution hydrodynamique d'un site. Une augmentation de la taille des grains ou de la part de la fraction sableuse dans la matrice sédimentaire indique localement l'enregistrement d'un épisode de crue. Une diminution drastique (et qui se maintient) de la granulométrie peut aussi refléter une réduction de la capacité de transport et/ou une déconnexion hydraulique du site. Dans nos postulats, la mise en débit réservé pourrait se refléter dans les archives sédimentaires par une diminution de la granulométrie.

Grâce à l'étude des isotopes artificiels (^{137}Cs , ^7Be , ^{60}Co), il est possible d'ajouter des repères chronologiques au sein de ces carottes afin d'effectuer des calages et de conforter les hypothèses hydro-sédimentaires.

Avec l'analyse des éléments métalliques (Plomb, Zinc, Nickel, etc.), il est intéressant de confronter les patrons chimiques et granulométriques dans un rapprochement de la chronologie sédimentaire et de celle des polluants.

3.2.1. Sondage à la perche

Le sondage à la perche consiste à enfoncer manuellement un train de tiges en acier dans le sol jusqu'à atteindre le toit des alluvions grossières (Figure 4A, B). Une fois le toit de graviers atteint, la perche bute sur une surface solide *pierreuse*. Le site de Péage-de-Roussillon a déjà fait l'objet de plusieurs études dans le but d'obtenir et/ou de caractériser les épaisseurs de sédiments fins déposés sur les alluvions grossières à l'intérieur des casiers Girardon et sur les marges alluviales. Ce sont au total plus de 1500 sondages qui ont été effectués sur ce site dans le cadre des différents projets (Réserve Naturelle de la Platière, CNR, RhônEco, OHM VR, OSR3). Ces données géoréférencées ont été compilées dans des bases de données (Figure 4-C) et étudiées sous SIG (Système d'Information Géographique).



Figure 4. A. Sondage à la perche. B) Géolocalisation et mesure de l'épaisseur de sédiment au niveau d'un point d'observation. C) Localisation des sondages à la perche sur le site de Péage-de-Roussillon.

3.2.2. Radar géologique

La technique du radar géologique (GPR) permet d'obtenir une image de la subsurface à haute résolution. Une impulsion électromagnétique est envoyée dans le sous-sol, via une antenne émettrice, à une fréquence déterminée. Cette impulsion se propage en s'atténuant dans les matériaux (ou les sols) et, à chaque interface entre des milieux différents, une partie de son énergie est réfléchie vers la surface. Les échos successifs sont enregistrés en fonction du temps par l'antenne réceptrice. La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet d'obtenir une coupe-temps, ou radargramme qui donne des informations géométriques sur la structure auscultée.

Visualisables sur les radargrammes (Figure 30), les réflecteurs sont des tracés correspondant aux lignes de réflexion du signal traduisant un changement de structure/texture dans le sol. Par l'étude des particularités de ces radargrammes et de ces réflecteurs, les profils GPR sont interprétés. Cela permet d'en extraire les structures sédimentaires sur une profondeur de 4 à 5 mètres. Au total, plus de 6400 mètres de profils GPR ont été réalisés sur l'ensemble du secteur de Péage-de-Roussillon (Figure 6).



Figure 5. Le SIR-3000 au premier plan, et de gauche à droite les antennes de 100, 200 et 400 MHz.

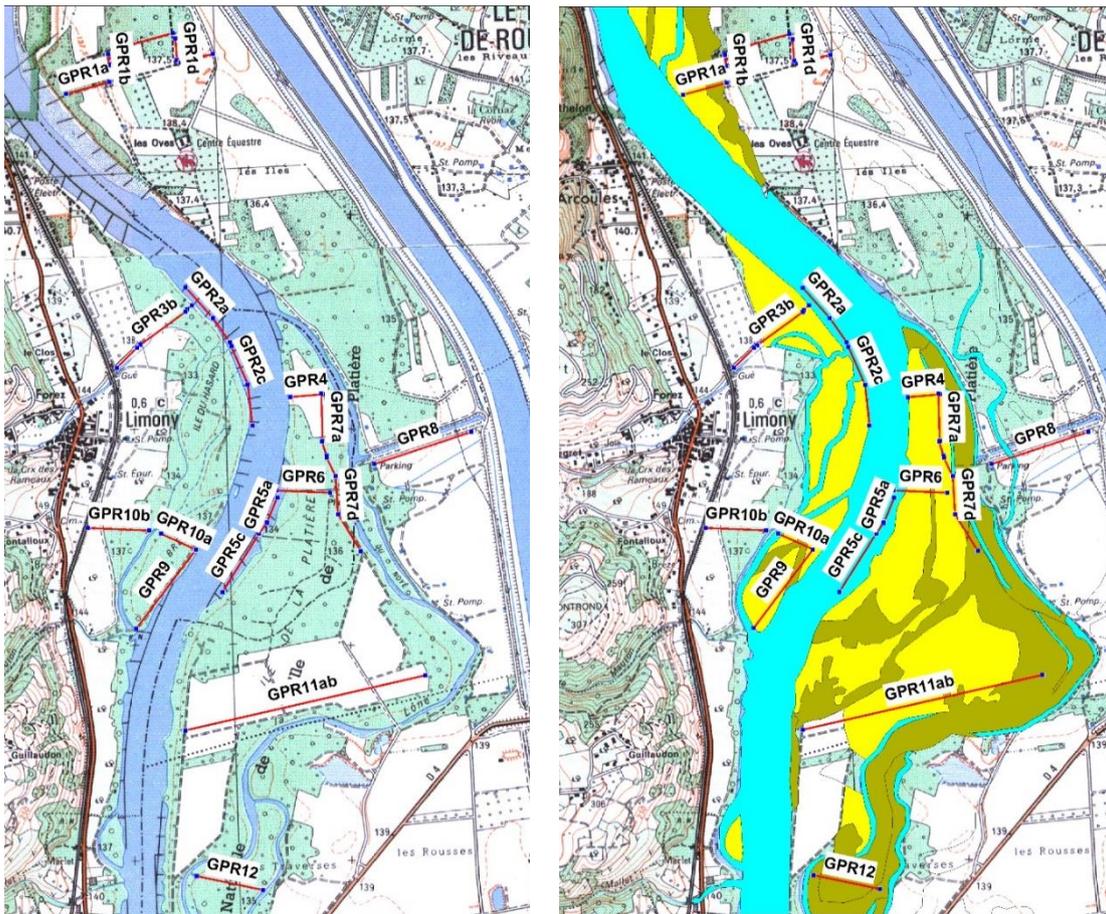


Figure 6. Localisation des 28 profils GPR réalisés sur PDR (tous les noms de profils ne sont pas présents). La Figure de droite représente les profils GPR positionnés sur la carte de Paléochenaux de J.P. Bravard (seuls les bras en tresses et les bancs du 19^{ème} siècle sont représentés en jaune et jaune/vert).

3.2.3. Carottage sédimentaire et analyses en laboratoire

L'emplacement de 6 sites de carottage a été choisi afin qu'ils soient représentatifs de milieux sédimentaires spécifiques (plus ou moins connectés au Rhône) et historiquement bien contextualisés (Figure 7A). Les carottes ont été effectuées à l'aide d'un carottier motorisé à percussion, modèle Cobra TT (Figure 7B). Elles ont été conditionnées et annotées (Figure 7C) avant d'être destinées à différentes analyses (granulométrie, chimie).

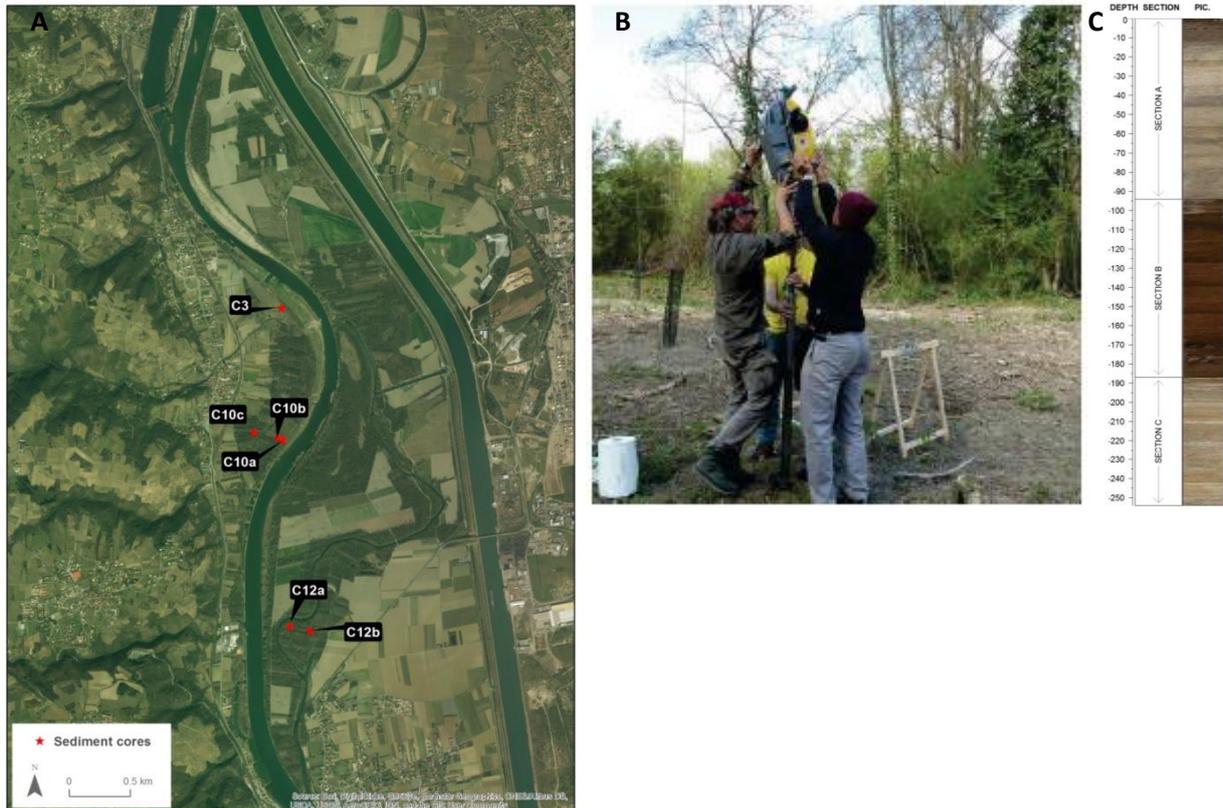


Figure 7. A) Localisation des carottes. B) Mise en place du carottier motorisé à percussion Cobra TT. C) Exemple d'une carotte

Analyses granulométriques des carottes

L'analyse granulométrique des carottes a été réalisée au laboratoire LEHNA-IPE avec un pas d'échantillonnage de 2cm, à l'aide d'un granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000 (Figure 8) équipé d'un préparateur d'échantillons hydro 2000G. Les données sont traitées avec le logiciel Gradistat qui fournit des paramètres granulométriques tels que le grain moyen, le mode, la médiane, le classement l'asymétrie de l'échantillon.



Figure 8. Granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000

Analyses chimiques des carottes (radionucléides, PCB, métaux lourds)

Sur deux carottes sédimentaires de PDR, les **radionucléides** ont été analysés au LSCE de Gif-Sur-Yvette. L'étude de la radioactivité fournit un moyen de dater les dépôts. Dans cette étude, une attention particulière a été portée à l'échelle séculaire grâce à l'étude du plomb 210 (^{210}Pb) et du Césium 137. Le Césium 137 retrouvé provient d'essais nucléaires atmosphériques (antérieurs au moratoire international de 1964) et de l'accident nucléaire de la centrale de Tchernobyl en 1986. Ceci permet de cadrer temporellement les carottes pour la seconde moitié du XX^{ème} siècle.

Des analyses sont également en cours afin de disposer de dates calculées à partir de l'activité du C14 mesurée sur des graines ou des fragments ligneux prélevés sur les parties anciennes des carottes (potentiellement le 19^{ème} siècle).

La **chimie élémentaire** a été analysée par Core scanner (Figure 9) par Anne-Lise DEVELLE, de la composante CISM du laboratoire EDYTEM de Chambéry. Les carottes pédologiques sont coupées longitudinalement afin de disposer d'une demi-section, que l'on recouvre d'un film d'ultralène. Cette analyse n'implique donc pas de transformation intrinsèque de l'échantillon. Sur l'ensemble des six archives sédimentaires prélevées sur le RCC du Péage-de-Roussillon, les analyses ont été réalisées avec un pas d'échantillonnage de 5 mm.

Pour l'**analyse chimique quantitative** par SAAF (Spectrophotométrie d'Absorption Atomique Flamme) réalisée à l'ENTPE (Winiarski, 2016), 160 échantillons ont été prélevés sur l'ensemble des 6 carottes environ tous les 2 cm à 5 cm. Chaque échantillon a subi une minéralisation par four à micro-onde CEM 1 Xpress. Cette minéralisation s'effectue avec 2 ml de HN03 ultrapure et de 6 ml de HCl ultrapure. La montée en température jusqu'à 180°C est réalisée en 15 min avec un palier de 30 min. Les échantillons sont ensuite filtrés sur des filtres Whatmann no 541 puis repris dans 25 ml. Toutes les mesures sont donc réalisées sur 25ml de minéralisat filtré. Après cette étape de minéralisation, les échantillons ont été analysés par SAAF (Spectrophotométrie d'Absorption Atomique Flamme).



Figure 9. Core-scanner Optical XRF Avaatech (Source : Avaatech)

3.3. Concentrations en métaux des sédiments prélevés lors des sondages à la perche

3.3.1. Echantillonnage des sédiments

Les sédiments analysés ont été récoltés sur le terrain lors des campagnes de sondage à la perche OSR3 et OSR4.

En fonction des objectifs d'étude, deux approches différentes ont été retenues pour l'échantillonnage des sédiments :

- un échantillonnage de surface à la tarière pédologique (Figure 10) afin de connaître la distribution spatiale des métaux dans les sédiments superficiels.
- un échantillonnage de profils verticaux (tous les 20 cm) dans les casiers Girardon, également avec une tarière pédologique (Figure 10). Ils renseignent de l'hétérogénéité spatiale et temporelle. Ils constituent le stock sédimentaire à même d'être remis à disposition du Rhône suite au démantèlement des ouvrages.



Figure 10. Echantillon prélevé à la tarière pédologique

La localisation des échantillons, tant pour l'échantillonnage superficiel que pour celui de profondeur, a été déterminée en fonction de la diversité des structures alluviales (casiers, lônes, épis, etc.), de la représentativité de leur dynamique sédimentaire, ainsi que de leur susceptibilité à archiver de manière représentative les métaux déposés sur les marges depuis le début des aménagements du Rhône.

Descriptif des échantillonnages

Echantillonnage de surface (Campagne OSR4)

La campagne de sondages à la perche, présentée antérieurement (partie 2.2.A), s'est accompagnée de prélèvements de sédiments superficiels à la tarière. Au total, 230 échantillons ont été collectés à Péage-de-Roussillon. Les prélèvements ont été réalisés à environ 25 cm de profondeur sur des placettes sur lesquelles la matière organique de surface a préalablement été retirée. Les échantillons de sédiments, d'une centaine de grammes, ont été conditionnés dans des sacs en plastique et identifiés (Figure 10). Le positionnement de chaque prélèvement a été relevé au GPS (Trimble GeoXH, précision décimétrique) pour un traitement géomatique ultérieur.

Profils verticaux (campagne OSR3)

Ces profils ont été levés à la tarière lors de la campagne de terrain de l'OSR3 (2014). Un profil vertical est découpé en segments de 20 cm, jusqu'au toit de galets. Au total, 17 profils comptant 208 échantillons ont été étudiés à Péage-de-Roussillon.

3.3.2. Techniques d'analyse chimique des sédiments

Contrairement aux carottes analysés au Core scanner, les échantillons prélevés à la tarière sont physiquement indépendants. Ils peuvent donc être analysés individuellement à l'aide d'un XRF portatif (Fluorescence X).

a. Présentation du XRF portatif

Les analyses chimiques des prélèvements 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.

Les performances du XRF sont connues pour être affectées par l'hétérogénéité des matrices. En effet, il existe un « effet matrice » relatif à toutes les techniques à fluorescence X : c'est-à-dire que la composition globale et les paramètres physico-chimiques de l'échantillon affectent les estimations individuelles par élément.

Des taux d'humidité, des granulométries et des teneurs en MO variés donnent des résultats très variables en termes de précision et de répétabilité (Lemiere & al, 2014¹, Laperche, 2005², RECORDS, 2008³). Les valeurs les plus extrêmes peuvent être représentatives d'une contamination de l'échantillon total mais peuvent aussi être le résultat d'une dérive expérimentale résultant d'une matrice atypique.

Nous avons donc travaillé ex-situ : les échantillons ont été séchés et tamisés (<63µm) selon le protocole présenté en Figure 11 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) provoquent des porosités dans les matrices, ce qui modifie la densité de l'échantillon et affecte le signal. La teneur en matière organique a été estimée par perte au feu et présente des taux très faibles et peu variables (données détaillées à venir dans OSR5).

b. Protocole pour les analyses au XRF portable

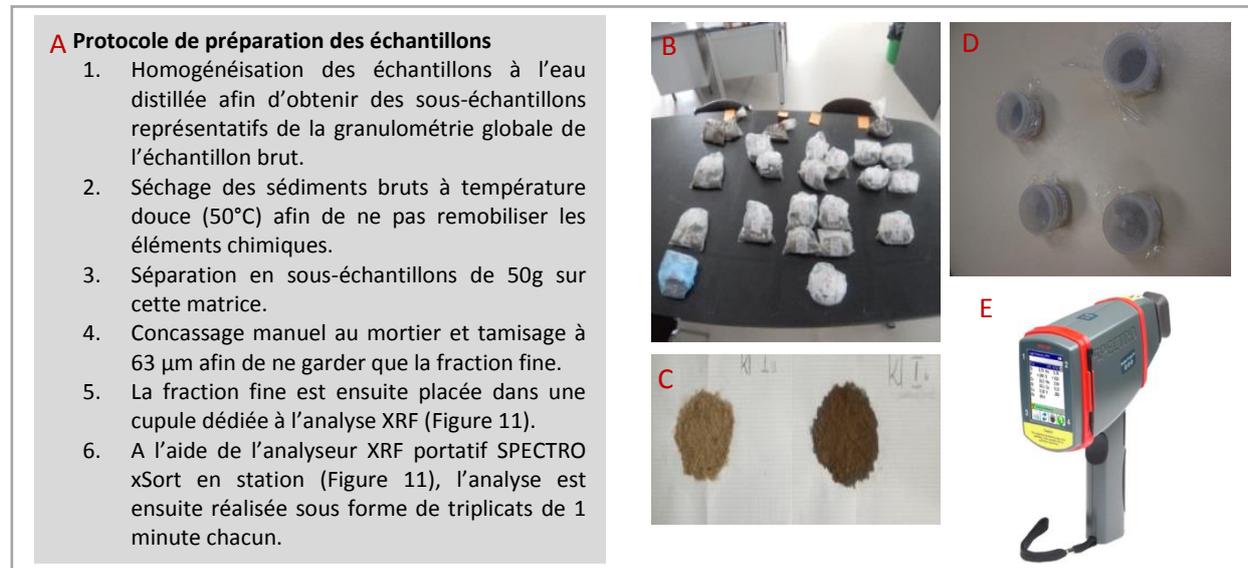


Figure 11. A. Résumé du protocole de préparation des échantillons avant analyse XRF B. Conditionnement C. Échantillon après le processus de préparation (<63µm), D. Disposition en capsules pour être analysé avec l'analyseur XRF portable SPECTRO xSort en E.

¹ Bruno Lemiere, Valérie Laperche, Laurence Haouche, Pascal Auger. 2014, Portable XRF and wet materials: application to dredged contaminated sediments from waterways. Geo-chemistry: Exploration, Environment, Analysis, Geological Society, 14, pp.257-264. <10.1144/geochem2012-179>. <hal-00872341>

² Laperche, 2005 – Evaluation des performances du spectromètre portable de fluorescence X Niton XL723S (au laboratoire et sur le terrain). RP-53377-FR, 72p, 41 ill., 2ann.

³ RECORD, Analyse rapide des métaux et autres minéraux dans des milieux solides pollués (déchets, sols) à l'aide de méthodes non destructives de terrain par fluorescence X, 2008, 150 p, n°06-0135/1A.

Ce protocole, qui a l'avantage de réduire la variabilité expérimentale, offre à la lecture des résultats d'analyses un signal qu'il faut interpréter en tant que tel. Néanmoins, la qualité d'analyse est liée aux paramètres des programmes intégrés qui varient selon les fabricants. Spectro présente une configuration intitulée "EnviroH" dédiée à l'analyse des contaminants dans le milieu naturel, i.e. les éléments Traces Métalliques (ETM) mais aussi les éléments Majeurs. Ses performances ont été évaluées par l'entreprise sur des matrices très spécifiques (100%SiO₂, basalte, dunite, granite réduit en poudre, ainsi qu'un échantillon de sol standard, GSS-08).

En outre, il est difficile d'appréhender l'impact des effets de matrice sur la qualité des analyses. C'est pour ces raisons que nous avons produit des jeux de données de contrôle.

c. Analyses de contrôle

Afin vérifier la teneur en ETM par XRF et de confirmer les concentrations obtenues, des analyses quantitatives par SAAF, ICP-MS et ICP-AES ont été effectuées.

Les analyses de contrôle ont été réalisées à partir de trois techniques :

- Par SAAF : Spectrophotométrie d'Absorption Atomique Flamme – analyses réalisées à l'ENTPE par T. Winiarski en 2017. *Une lampe à cathode creuse fournit de l'énergie aux atomes des différents éléments. Les atomes absorbent l'énergie lumineuse selon une longueur d'onde spécifique à chacun. La quantité de lumière absorbée est mesurée par un détecteur qui produit un signal électronique correspondant à l'intensité lumineuse. L'absorbance mesurée permet alors d'estimer la teneur de ces éléments.*
- Par ICP-MS : spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif – analyses réalisées à l'EM de Saint-Etienne par J.Moutte et G.Seignemartin en 2016. *Couplée à l'ICP, la spectrométrie de masse repose sur la séparation des ions générés par un plasma de gaz rare (gaz ionisé) en fonction de leur rapport [masse/charge]. Les ions sont séparés selon leur masse, comptabilisés, ce qui permet alors d'estimer la teneur de ces éléments.*
- Par ICP-AES : plasma à couplage inductif couplé à la spectrométrie d'émission atomique – analyses réalisées à l'EM Saint-Etienne par J.Moutte et G.Seignemartin en 2016. *Un système de détection optique produit des spectres d'émissions atomiques générées par les atomes excités par le plasma. La lecture de leur signal permet alors d'estimer la teneur de ces éléments.*

Dans le cas de la comparaison XRF-ICP, les analyses de contrôle ont été réalisées sur le lot sed11 (n=30) provenant de PDR tandis que pour la comparaison XRF-SAAF, elles ont été effectuées sur un sous-échantillon (n=30) des lots sed1 (PDR), sed2 (PBN) et sed3 (DZM). Pour plus de détails sur les échantillons, il est possible de se référer au tableau 5 de la section 3.6.

Les analyses ICP ont été réalisées sur des échantillons bien informés sur la chronologie des dépôts sédimentaires. Pour la comparaison XRF-SAAF, le choix des échantillons a été fait afin de cadrer les possibles variations dues à des effets de matrices. La batterie d'échantillons a été sélectionnée selon une méthode graphique. Et ce, pour les éléments d'intérêts et à partir d'ACP permettant de visualiser le jeu de données (n=821). Cette méthode a permis de choisir un ensemble d'échantillons représentatifs de différents degrés de contaminations.

Les analyses ICP et SAAF génèrent donc un jeu de données de comparaison aux analyses XRF.

Tableau 2. Coefficients de corrélation, de détermination et significativité

		ICP	SAAF
Zn	XRF	$r = 0.9718041$ $p\text{-value} < 2.2e-16$ $R^2 = 0.9444032$	$r = 0.9833096$ $p\text{-value} < 2.2e-16$ $R^2 = 0.9668978$
Pb	XRF	$r = 0.9606815$ $p\text{-value} < 2.2e-16$ $R^2 = 0.922909$	$r = 0.9823026$ $p\text{-value} < 2.2e-16$ $R^2 = 0.9649184$
Ni	XRF	$r = 0.8856176$ $p\text{-value} = 1.728e-10$ $R^2 = 0.7843186$	$r = 0.7610149$ $p\text{-value} = 1.646e-06$ $R^2 = 0.5791437$
Cu	XRF	$r = 0.9653987$ $p\text{-value} < 2.2e-16$ $R^2 = 0.9319946$	$r = 0.9884883$ $p\text{-value} < 2.2e-16$ $R^2 = 0.9771092$
Sr	XRF	$r = 0.9389672$ $p\text{-value} = 4.953e-14$ $R^2 = 0.8816594$	
Fe	XRF	$r = 0.9739895$ $p\text{-value} < 2.2e-16$ $R^2 = 0.9486555$	

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. Pour la technique SAAF, les contrôles ont été réalisés pour Zn, Pb, Ni et Cu et là encore il y a une bonne corrélation entre les estimations (tableau 2).

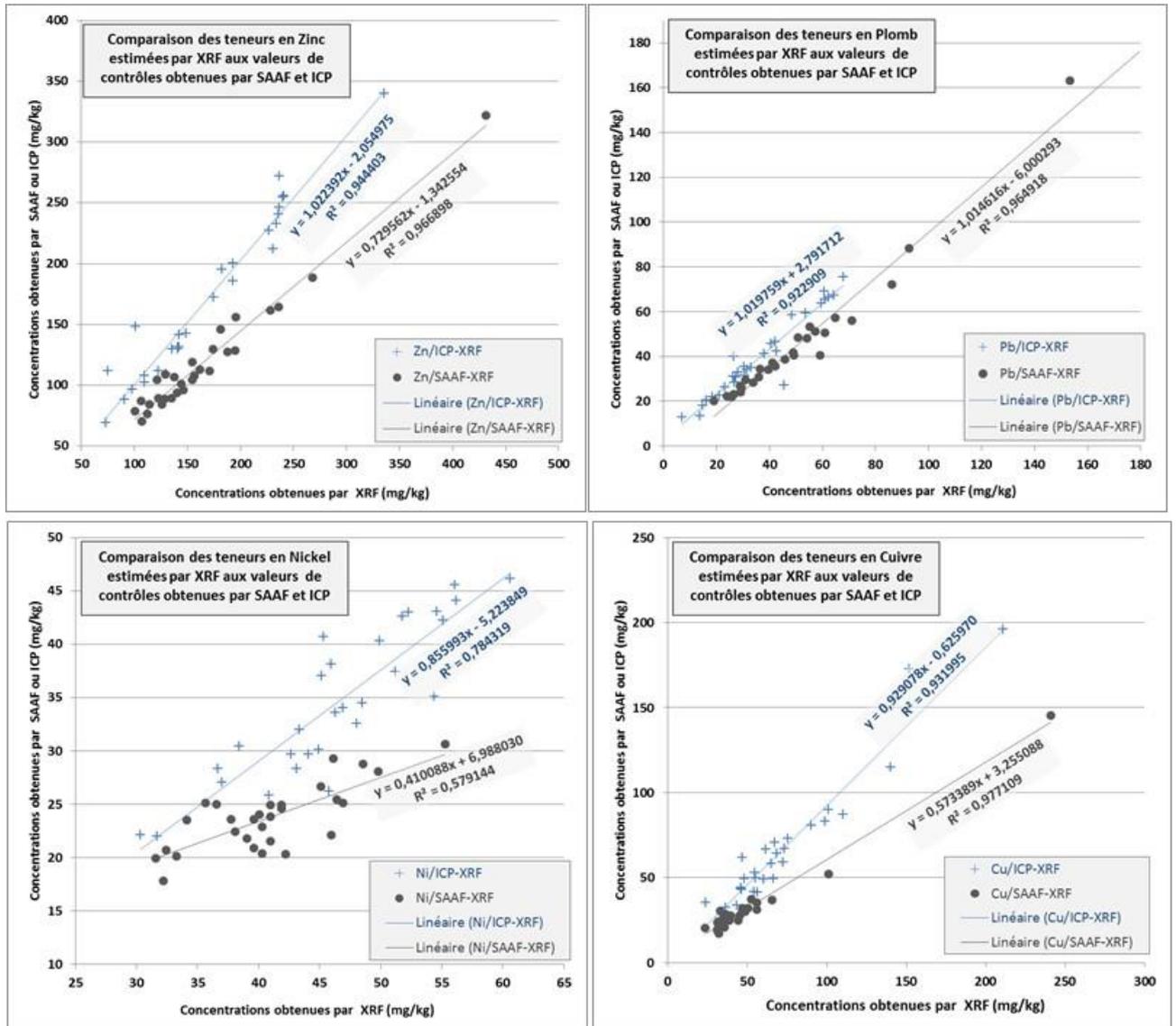


Figure 12. Graphiques comparant les concentrations estimées par XRF, SAAF et ICP (Droites de régression tracées, équation et coefficient de détermination associés)

Les concentrations mesurées s'étalent sur une large étendue (Figure 11). Cette batterie de contrôle recouvre donc bien la gamme de valeur du jeu de données global. En effet, la visualisation des données XRF à partir d'une ACP exploratoire a permis de choisir les échantillons de validation de sorte qu'ils couvrent une large gamme de valeurs (les minimum et les maximums) et de montrer la régularité du signal sans effet de seuil supérieur (les valeurs élevées sont bien estimées). L'effet de seuil inférieur n'est pas apparent car les 6 éléments étudiés sont présents dans le milieu bien au-delà de leur seuil de détection. Ce qui, par exemple, n'est pas le cas du mercure, jamais « détecté » par XRF.

Tableau 3. Statistiques sur les écarts des estimations entre XRF-ICP et XRF-SAAF

	Zn	Pb	Ni	Cu	Sr	Fe
XRF-ICP - Jeu de données 1 (n=29)						
Moyenne XRF	167,80	36,58	46,46	72,51	250,03	23569,59
Ecart-type XRF (Pearson)	62,78	16,93	7,19	39,12	24,46	4445,95
Moyenne ICP	169,50	40,09	34,55	66,74	208,59	19803,45
Ecart-type ICP (Pearson)	66,04	17,97	6,95	37,65	36,57	3925,00
Nombre de valeurs sous-estimées par XRF par rapport à l'ICP	11	27	0	0	0	0
Nombre de valeurs surestimées par XRF par rapport à l'ICP	18	2	29	29	29	29
Moyenne de l'écart des valeurs sous-estimées	-16,91	-3,62125	x	x	x	x
Moyenne de l'écart des valeurs surestimées	7,59	0,375	11,91	5,77	41,44	3766,14
Moyenne de l'écart XRF-ICP	-1,70	-3,51	11,91	5,77	41,44	3766,14
Ecart-type (Pearson) de l'écart XRF-ICP	15,64	5,00	3,39	10,20	16,00	1085,89
XRF-SAAF - Jeu de données 2 (n=30)						
Moyenne XRF	164,42	55,87	40,82	49,83	x	x
Ecart-type XRF (Pearson)	64,50	41,90	5,56	38,85	x	x
Moyenne SAAF	118,61	44,43	23,73	31,83	x	x
Ecart-type SAAF (Pearson)	47,86	27,67	2,99	22,54	x	x
Nombre de valeurs sous-estimées par XRF par rapport au SAAF	2	0	0	0	x	x
Nombre de valeurs surestimées par XRF par rapport à l'ICP	27	30	30	30	x	x
Moyenne de l'écart des valeurs sous-estimées	-5,57	x	x	x	x	x
Moyenne de l'écart des valeurs surestimées	6,11	x	x	x	x	x
Moyenne de l'écart XRF-SAAF	45,81	5,27	17,09	18,00	x	x
Ecart-type (Pearson) de l'écart XRF-SAAF	19,50	5,20	3,81	16,92	x	x

Les comparaisons ICP/XRF (valeurs issues de la Figure 12 et du tableau 2) montrent :

- des bonnes corrélations entre les deux jeux de données XRF et ICP pour Zn, Pb, Ni, Cu, Fe et Sr.
- que le Zinc et le Plomb sont globalement très bien estimés, avec un biais plutôt faible. Les teneurs en Zinc sont plus fortement sous-estimées (moyenne de l'écart des valeurs sous-estimées : -16,91) que surestimées par le XRF (moyenne de l'écart des valeurs surestimées : 7,59).
- que le Nickel, le Cuivre, le Strontium et le Fer sont globalement surestimés par le XRF (100% des valeurs surestimées).
- des mauvaises corrélations sont observées pour les autres éléments *détectés par XRF* (analyse réalisée sur le jeu de données étendu).

Les comparaisons SAAF/XRF montrent :

- des bonnes corrélations entre les deux jeux de données XRF et ICP pour Zn, Pb, Ni et Cu.
- une tendance générale à la surestimation des valeurs par XRF (entre 93 et 100% des valeurs surestimées).

Les différentes tendances entre SAAF et ICP peuvent être rattachées :

- aux performances des appareils d'analyses au regard du type d'échantillons.
- au fait que les 2 jeux de 30 échantillons sont différents (impact de la granulométrie à l'intérieur de la fraction fine, teneur en MO, etc...).
- à des biais d'expérimentation : les minéralisations nécessaires avant analyses par SAAF et ICP peuvent être plus ou moins performantes.
- à d'autres paramètres en cours d'identification.

La transformation des jeux de données XRF à partir des équations produites lors de la comparaison ICP/XRF permet une estimation des teneurs au regard des biais de surestimation/sous-estimation de l'appareil. Nous avons choisi le jeu d'équations ICP-XRF car l'analyse couvre plus d'éléments. Les teneurs des 6 éléments (Zn, Pb, Ni, Cu, Sr, Fe), une fois corrigées, servent pour la suite de l'étude.

En outre, le rapport de performance de la société Spectro (©Spectro 2012) mentionne des seuils de détection dans une matrice 100% SiO₂ de 2 µg/g pour le Zinc et le Strontium, de 3 mg/kg pour le Cuivre, le Nickel et le Plomb, de 10 mg/kg pour le Fer. Notre jeu de données présente des teneurs bien plus élevées, ce qui rejoint nos conclusions préalables par rapport à un effet de seuil de détection pour ces éléments. A noter que le mercure (Hg) et l'Arsenic (As), pourtant décrits comme détectables pour des concentrations de 2 et 1 mg/kg respectivement, sont pour le premier jamais détecté et le second très mal estimé ($R^2 = 0,1845$ pour la comparaison XRF/ICP).

3.4. Teneurs en métaux des végétaux

3.4.1. Contexte de l'étude

La dynamique de la végétation se développant sur les casiers est marquée par l'évolution des espaces alluviaux modifiés lors des phases successives d'aménagement. L'un des objectifs de l'Axe II est de déterminer si la végétation riparienne qui se développe sur le compartiment sédimentaire enregistre les tendances chimiques de son milieu. Ainsi, la question de fond est de savoir si la végétation peut être utilisée en tant que bioindicateur d'une contamination du compartiment sédimentaire mais aussi en tant qu'archive spatio-temporelle renseignant sur les flux de polluants.

3.4.2. Présentation du site d'étude

Au cours de la campagne de terrain de l'été 2016, des prélèvements de végétation ont été réalisés en rive droite du Rhône au nord de Péage-de-Roussillon (Secteur d'Arcoules).

Le choix des casiers repose sur les études préliminaires qui ont permis de caractériser les patrons chimiques sédimentaires. Deux groupes de trois casiers (n°1, 3, 4, 6, 7 et 9) ont été sélectionnés parmi un échantillon initial de 18 groupes. Le premier groupe comprend les casiers caractérisés par les plus fortes teneurs en métaux d'un train de casiers, et le second les moins fortes. Les prélèvements de végétation ont été réalisés sur trois essences ligneuses présentes dans les boisements riverains : *Acer negundo*, une espèce considérée comme invasive qui se développe de manière conséquente et récente sur les marges alluviales, ainsi que *Salix alba* et *Populus nigra*, deux essences emblématiques de la ripisylve rhodanienne.

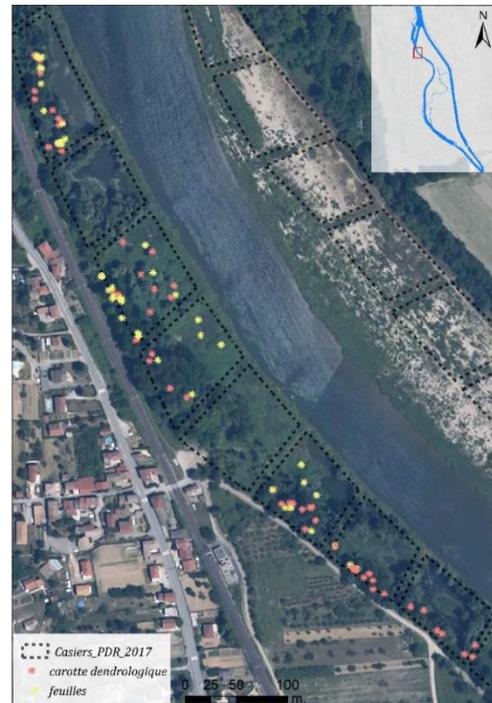


Figure 13. Localisation des prélèvements de végétation à Péage-de-Roussillon, 2016

3.4.3. Plan d'échantillonnage

Nous avons prélevé deux types d'échantillons : des pools foliaires (monospécifiques pour *Acer negundo* ou plurispécifiques) et des carottes dendrologiques de chacune des essences. Des échantillons de sédiments ont aussi été récoltés afin de faire le lien entre le compartiment sédimentaire et végétal.

Plan d'échantillonnage
<p><u>Echantillons sédimentaires</u> 30 échantillons de sédiment de surface composites de 6 sous-échantillons ont été prélevés dans le périmètre (emprise de la canopée) de 30 individus (<i>Acer negundo</i>). Les analyses présentées sont réalisées à l'ICP-MS, sur fraction fine.</p>
<p><u>Echantillons foliaires</u> 30 échantillons foliaires ont été analysés à l'ICP-MS :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 20 pools plurispécifiques - 10 pools monospécifiques (<i>Acer negundo</i>)
<p><u>Echantillons dendrologiques</u> Sur les 52 carottes prélevées, 30 ont été sélectionnées pour les analyses afin de maximiser la représentativité spécifique et temporelle. <i>Pour des raisons logistiques, seuls 6 casiers ont été échantillonnés pour les matrices sédimentaires contre 4 pour les matrices végétales (n°1, 3, 4, 6).</i></p>

Figure 14. Résumé du plan d'échantillonnage et d'analyses

3.4.4. Techniques de prélèvements

Les pools foliaires ont été récoltés selon une méthode de détermination à vue des espèces les plus représentées. Ils sont composés de 4 à 5 essences (strates herbacée, arbustive et arborée). Prélevées à l'aide d'une tarière de Pressler à environ 1,30 m de hauteur, les carottes dendrologiques sont toutes d'un diamètre de 5mm pour une longueur allant de 10 à 30 cm.

3.4.5. Protocoles de caractérisations chimique et temporelle

Caractérisation chimique

Dans un premier temps, les carottes sont découpées au scalpel en fins copeaux sur toute leur longueur de manière à constituer des échantillons composites. Chaque échantillon est ensuite analysé à l'aide d'un spectromètre de masse (ICP-MS) puis d'un spectromètre à émission atomique (ICP-AES), deux techniques reconnues pour leur précision dans l'analyse des matrices biologiques⁴. Des tests au XRF ont été réalisés mais la variabilité expérimentale est encore mal cernée et les données qui en résultent ne sont pas utilisables en l'état.

Caractérisation temporelle

Parallèlement à cela, une mesure des cernes de croissance (logiciel Dendrolab) a été effectuée sur les mêmes carottes afin de lier les analyses chimiques avec la chronologie de la croissance des individus et potentiellement identifier des changements de signature au cours du temps.

3.5. Caractérisation du risque hydraulique associé à la sédimentation des marges

L'objectif de cette partie est d'étudier l'impact de la modification de géométrie du Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon sur la ligne d'eau en comparant 1897 et l'état actuel, afin d'évaluer rétrospectivement l'effet hydraulique des casiers Girardon et de la sédimentation des marges. La modélisation a été réalisée avec le logiciel de simulation hydraulique 1D MAGE.

Le tronçon modélisé couvre le Rhône de Ternay à la Cance (le premier nœud sur le Rhône total en aval de l'aménagement de Péage-de-Roussillon). Entre ces deux nœuds du modèle, le seul tributaire considéré est le Gier. Pour ce travail, le débit du Gier a été considéré comme négligeable devant le débit du Rhône. Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon se situe entre les nœuds SPB et SRA (Figure 46).



Figure 15. Représentation schématique du tronçon modélisé entre Ternay et la Cance

Le modèle hydrosédimentaire actuel s'appuie sur la géométrie de 2015. Des planches cartographiques géoréférencées au 1/10000^e, détaillant la géométrie du lit en 1897 par des isolignes d'altitude et de profondeur (Figure 48), ont été utilisées pour reconstituer les profils en travers du Rhône à cette époque. Ces profils ont été placés à la même position que les profils actuels équidistants de 500 m. Ces profils ont été intégrés dans le modèle. Ils se situent entre les PK 53000 et 58000. Le travail est en cours pour étendre les profils de 1897 entre les PK 48000 à 66000.

⁴ Rodushkin, I., Ruth, T. & Huhtasaari, Å. (1999). *Comparison of two digestion methods for elemental determinations in plant material by ICP techniques*, Analytica Chimica Acta, 378(1), 191-200

3.6. Récapitulatifs des données disponibles sur Péage-de-Roussillon

Les tableaux suivants récapitulent l'ensemble des données utilisées pour les travaux de l'axe II.2.

Tableau 4. Jeu de données "SIG"

	Dates	Formats
Archives cartographiques/ géographiques géoréférencées et digitalisées	1810-1929, 1860, 1949, 1974, 1986, 2009	Images : Tiff, Jpeg Digitalisation : Shape
LiDAR de la BDT Rhône	2013	Raster
Modèle de submersion : -nombre de jour de submersion du pixel/an, -nombre d'événement de submersion du pixel/an Etc. Par Džubáková & al, 2015	Modélisation sur les chroniques de débit 1986-2010	Raster

Tableau 5. Jeu de données "Sédiments"

ID	Nom de l'échantillonnage	Type de prélèvements	Types d'analyses effectuées	Nombre d'analyses	Matrice étudiée	Campagne – Référent	Localisation GPS
Sed1	Sédiments de surface à PDR	Tarière pédologique – 20 premiers cm	Chimie élémentaire - XRF portatif : <i>Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	229 échantillons	63µm	OSR4 A.Tena	x
Sed4	Sédiments de profils verticaux à PDR	Tarière pédologique – tous les 20 cm	Chimie élémentaire - XRF portatif : <i>Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	19 profils 209 échantillons	63µm	OSR3 & 4 G.Seignemartin	x
Sed8	Carottes PDR	Carottage (percussion)	- Granulométrie Chimie élémentaire au Core-Scanner - Analyse quantitative des ETM par SAAF -PCB (2 carottes) -Cesium ²¹⁰Pb (2 carottes)	-6 carottes (2,54m, 1,09m, 1,58m, 2,84m, 1,85m, 2,72m) - pas de 1cm à 3cm	Totale	OSR 4 T.Winiarski	x
Sed11	Sédiments de surface- PDR - Casiers d'Arcoules (OHM)	Tarière pédologique – 20 premiers cm	-Granulométrie -Chimie élémentaire au XRF + ICP : <i>teneurs validées pour Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i> -Matière Organique	30 échantillons	30n à 63µm et 10n totaux	OHM 2016-17 G.Seignemartin	x
Sed12	Série de contrôle ICP-XRF = sed11	cf Sed 11	cf Sed 11	cf Sed 11	cf Sed 11	cf Sed 11	cf Sed 11
Sed13	Série de contrôle SAAF-XRF	Echantillons de surface issus de <i>Sed1, Sed2 et Sed3 et Sed 11</i>	-Granulométrie -Chimie élémentaire au XRF + SAAF <i>(Teneurs validées pour Zn, Pb, Cu, Ni)</i> -MO	33 échantillons	63µm	OSR4 G.Seignemartin T.Winiarski	x
Sed14	Série de contrôle carottes SAAF-XRF	Echantillons issu de Sed8	- SAAF (Teneurs validées pour Zn, Pb, Cu, Ni, Hg, Cd)	147 échantillons	Totale	T.Winiarski	x
ILON 3 & 5	Carotte d'un bras mort à PDR	Carottage (percussion)	-Granulométrie -Chimie élémentaire au XRF	x	Totale	A. Barra, J.F. Berger	EVS
Carottes du Casier BRGM	Carottes du Casier BRGM	Carottage (percussion)	-Granulométrie - ETM, PCB -Radargramme	Casier 117 2 carottes C29 & C27	Totale		Rapport BRGM/RC-60367-FR 2013

Tableau 6. Jeu de données "Relevés de terrain"

ID	Nom de l'échantillonnage	Secteur	Type	Nombre de prélèvements	Types d'analyses effectuées	Campagne – Référent	Localisation GPS
Rel1	Sondage à la perche à PDR	PDR	Sondage à la perche	333	Mesure épaisseur sédiment fin	OSR3 Geopeka	X
Rel4	Campagne géophysique à PDR	PDR	Géophysique	GPR : 20 profils, 6,5 km sur 5 m de profondeur ERT : 4 profils, 952 m, 25 m profondeur	GPR : radar géologique ERT : résistivité électrique	OSR4 T.Winiarski	X

Tableau 7. Jeu de données "Végétation"

ID	Nom de l'échantillonnage	Secteur - Emplacement	Type de prélèvements	Nombre de prélèvements	Types d'analyses effectuées	Campagne – Référent	Localisation GPS
Veg1	Pools foliaires plurispécifiques à Arcoules	PDR - 4 casiers à Arcoules	Parties foliaires sur les 4 à 5 espèces les plus représentées	21 pools	ICP	OSR4 et OHM 2016-17 G.Seigne martin	x
Veg2	Pools foliaires monospécifiques à Arcoules	PDR - 3 casiers à Arcoules <i>Relié à Sed11</i>	Parties foliaires sur Acer Negundo	10 pools	ICP	OSR4 et OHM 2016-17 G.Seigne martin	x
Veg3	Carottes dendrologiques à Arcoules	PDR - 6 casiers à Arcoules	Carottier dendrologique sur <i>Acer Negundo</i> , <i>Populus Nigra</i> et <i>Salix Alba</i>	30 carottes	Dendrochronologie (Scanner) ICP : -30 carottes en pool par carotte -6 carottes en détail selon des fenêtres temporelles	OSR4 et OHM 2016-17 G.Seigne martin	x
Veg4	Tranches d'arbres à Platière	PDR - 6 casiers à la platière	Tranches d'arbres à la tronçonneuse	14 tranches	Dendrochronologie (Scanner) XRF - ICP : -2 tranches en pool par tranche -Tranches selon des fenêtres temporelles	OSR4 et OHM 2016-17 G.Seigne martin	x

4. Application au site de Péage

Cette partie présente dans le détail les résultats des analyses effectuées sur le tronçon de Péage de Roussillon. En effet, c'est le secteur avec le jeu de données le plus complet : analyses SIG enrichies, campagnes de terrains multiples (sondages à la perche, profils GPR, carottes pédologiques analysées pour la granulométrie, les ETM, PCB et les radioéléments, carottes dendrologiques, etc.). Les résultats inter-sites sont présentés dans le second rapport de l'Action II.2 et Action II.4 intitulé *Stocks sédimentaires des marges actives – Approche comparée inter-sites DZM – PDR – PBN*.

4.1. Évolution planimétrique

4.1.1. Evolution planimétrique de la bande active

L'enrichissement de la base de données cartographique et photographique aboutit à l'obtention d'une diachronie détaillée de l'évolution de la bande active (Figure 13).

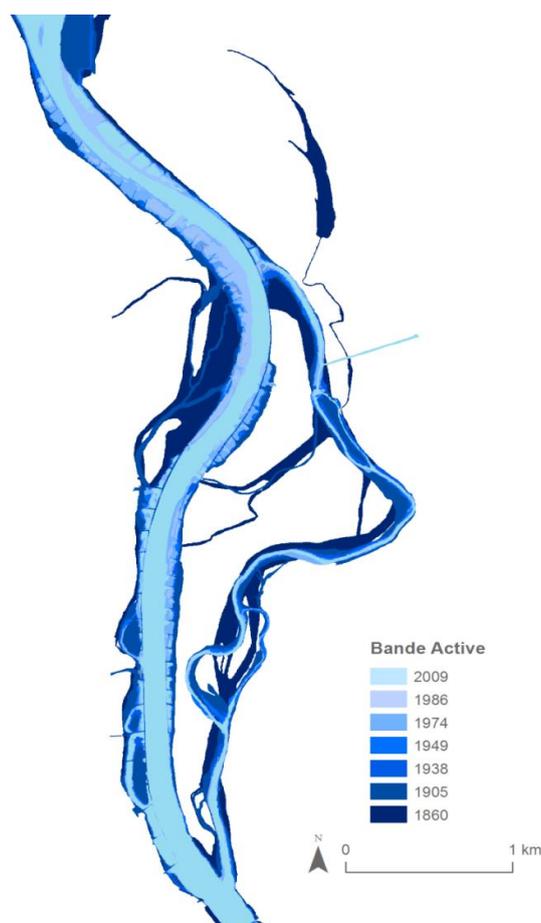


Figure 16. Evolution des tracés de la bande active (1860, 1905, 1938, 1949, 1974, 1986, 2008)

Les changements les plus contrastés s'observent entre les bandes actives de 1860 (bleu très foncé) et 1938 (bleu foncé moyen) où l'on note une rétraction de la bande active et des bras secondaires (voire leur disparition dans certains cas), ainsi qu'entre 1974 et 1986 avec une accentuation de ce phénomène de rétraction.

De ce fait, grâce aux archives photographiques, les changements observés sur la bande active témoignent du fait que les phases d'aménagement influencent significativement cette évolution (Figure 13). Les dates intermédiaires aux phases aménagements attestent, par contraste, de l'impact des endiguements et de la dérivation mais aussi de la décélération plus ou moins progressive des phénomènes d'atterrissement à mesure que le Rhône commence à retrouver un équilibre.

De cette manière, les phénomènes d'atterrissement et de sédimentation ont été spatialisés et ont pu être quantifiés. Grâce à l'étude de l'évolution planimétrique de la bande active, nous avons donc pu déterminer de manière précise les changements morphologiques associés aux différentes périodes de sédimentation. Nous avons alors différencié quatre périodes de sédimentation :

- **Période « pré-aménagements Girardon »** (avant 1860) : la rivière est peu aménagée même si quelques infrastructures de protection contre les crues ont déjà été installées. Entre le cadastre napoléonien (1812-1830) et 1860, la bande active enregistre une première phase de rétraction (12 % environ, soit 0,3 %/an) (Figure 15).
- **Période « post-aménagements Girardon »** (à partir de 1900) : la mobilité latérale de la bande active du Rhône est limitée. La Figure 16 montre la rétraction du Rhône : alors que l'on observe des chenaux multiples en 1860, un lit unique s'est formé suite à la multiplication des ouvrages Girardon.
- **Période « pré-dérivation »** (années 1930 aux années 1970) : les endiguements sont présents, mais le niveau d'eau est encore élevé. On observe quelques nouvelles zones de sédimentation autour des aménagements. La période renseignée par les archives photographiques de 1939 jusqu'à 1974 montre des changements plus modérés par rapport à la période précédente.
- **Période « post-dérivation »** (après 1977) : durant cette période, on observe une nouvelle phase de rétraction, très visible entre les photographies de 1974 et celles de 1986. La réduction des débits cause l'exondation de surfaces antérieurement sous l'eau. De 1986 à 2009, une forte végétalisation des surfaces émergées est enregistrée.

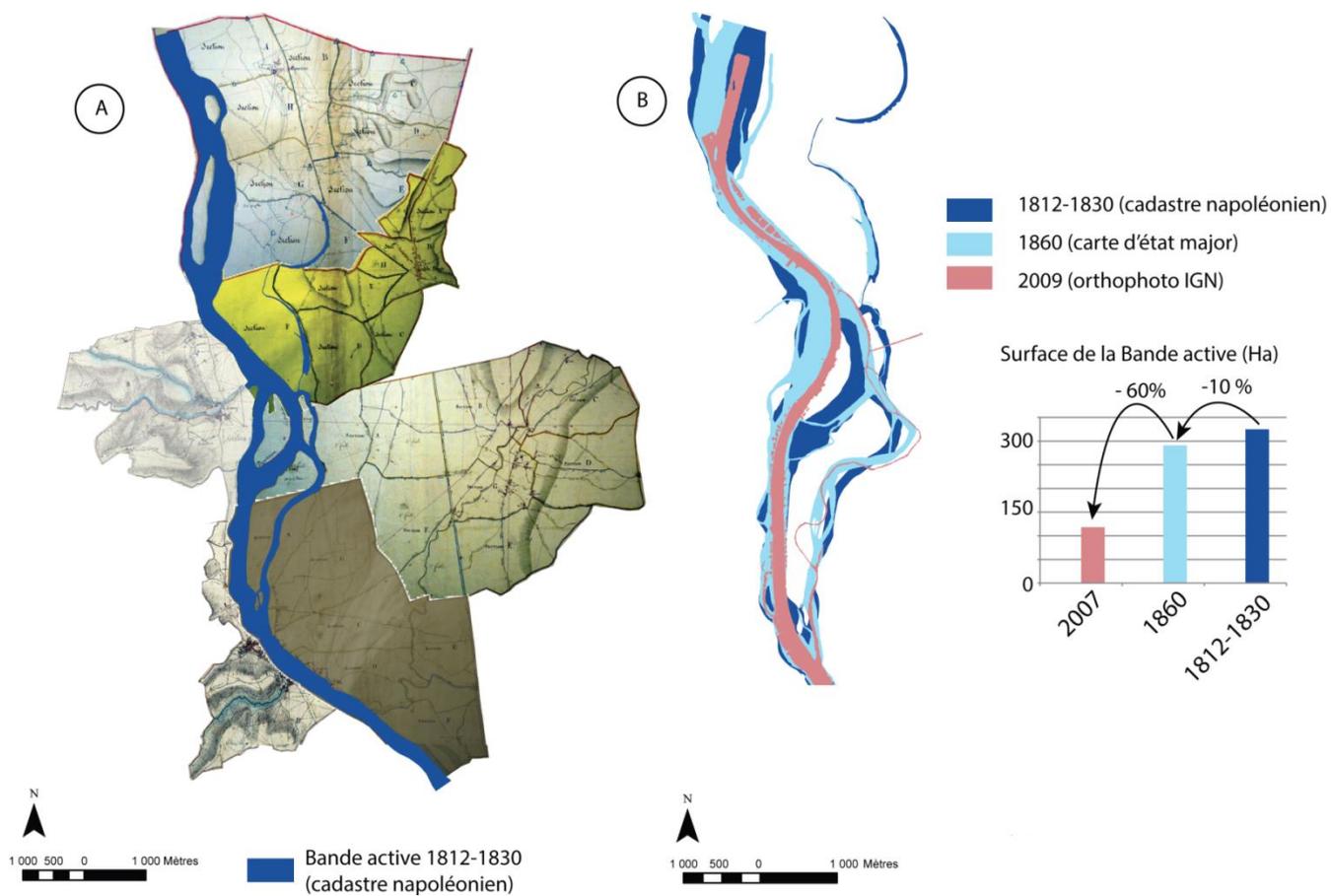


Figure 17. Série diachronique des tracés successifs de la bande active à Péage-de-Roussillon entre 1812-1830 et 2009

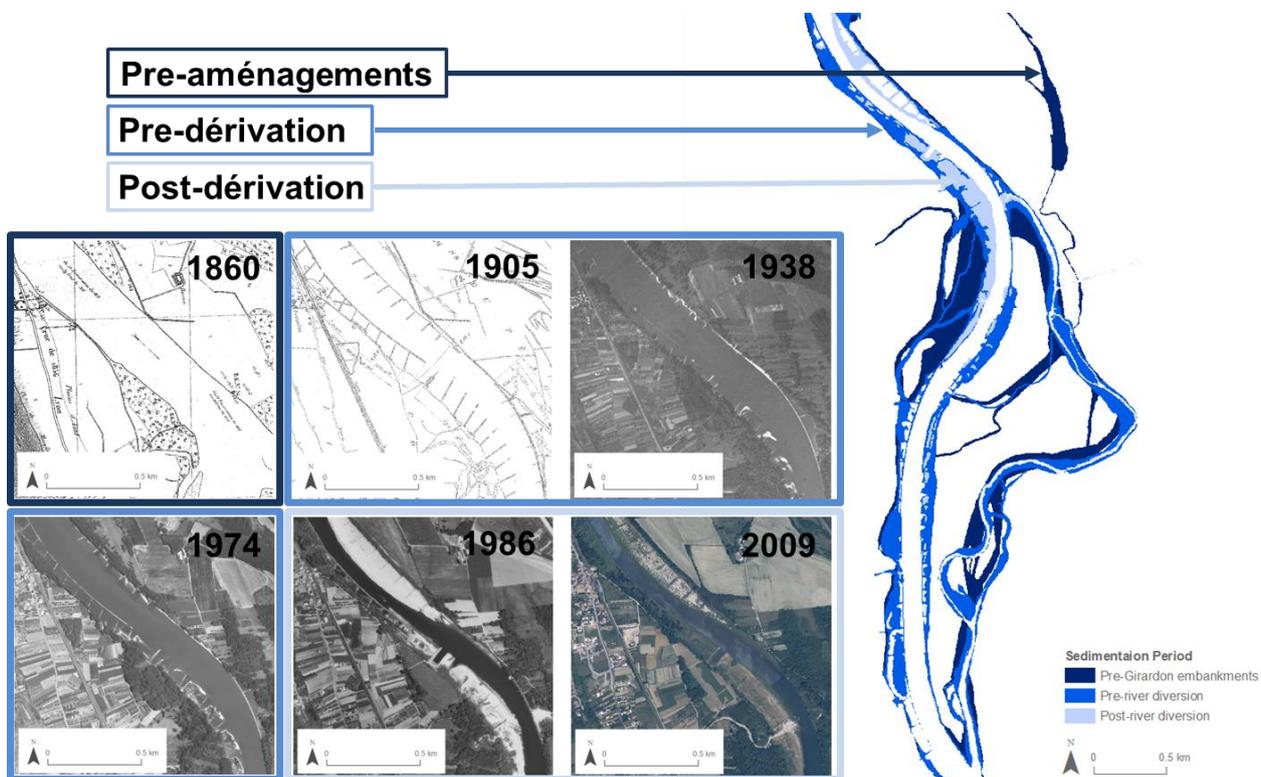


Figure 18. Périodes de sédimentation observées à Péage-de-Roussillon à partir de l'analyse des sources cartographiques et photographiques

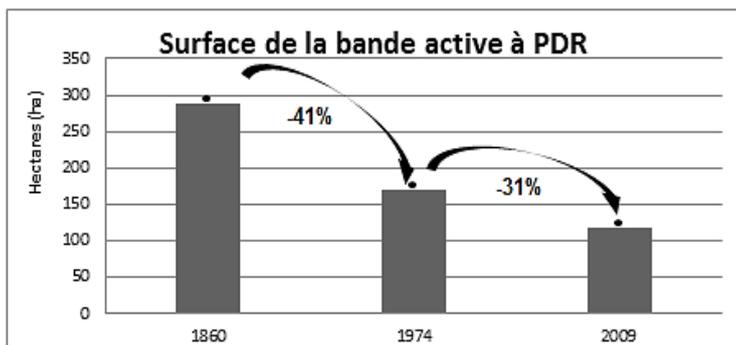


Figure 19. Evolution de la superficie de la bande active à PDR entre 1860 et 2009

Les changements morphologiques à Péage-de-Roussillon correspondent à une rétraction du lit du Rhône (Figure 17 et 18) consécutive à une forte sédimentation favorisée par les aménagements Girardon. La superficie de bande active passe ainsi de 289 ha en 1860 à 170 ha en 1974 (Figure 19). Entre ces deux dates, la bande active se réduit de 41 %, soit 0,36 %/an (si on considère une période de 114 ans depuis 1860) à 0,55 %/an (si on considère une période de 74 ans depuis 1900).

La période 1974-2009 montre, elle aussi, une rétraction significative de la surface en eau (31 %), qui s'explique cette fois par la création de la dérivation en 1977 et l'instauration d'un débit réservé. Au total, de 1860 à 2009, la superficie de la bande active à Péage-de-Roussillon a diminué de 59 %.

4.1.2. Evolution planimétrique des casiers Girardon et des zones inter-épis

a. Tendances planimétriques (casiers et champs d'épis)

L'étude de l'évolution planimétrique a également été réalisée au sein des ouvrages Girardon. Ces casiers et champs d'épis sont en place dans la bande active depuis le début du 20^{ème} siècle. Etant proches du Rhône, ils évoluent selon une dynamique qui est conditionnée par leur connectivité hydrologique.

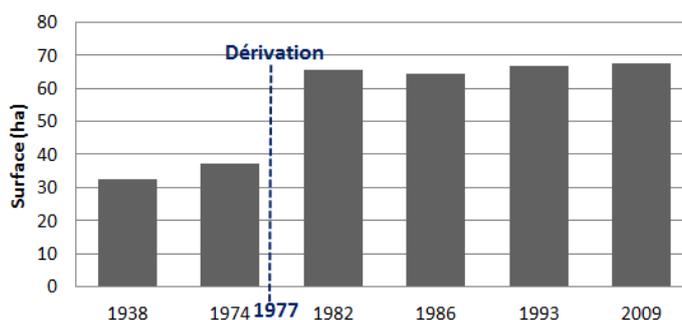


Figure 20. Évolution des surfaces émergées dans les ouvrages Girardon de Péage-de-Roussillon (avant et après la dérivation)

La Figure 21 rend compte du processus global de terrestrialisation au sein des ouvrages Girardon. Totalement en eau (105ha) à la fin de leur construction (début XIX^{ème} siècle), 33 ha sont atterris dès 1938. Les surfaces atterries passent de 38 ha à près de 65 ha entre 1974 et 1982. Après une phase de stabilisation, une très légère augmentation est observée entre 1986 et 2009. En 2009, 68ha sont atterris et 37ha (35% des surfaces) sont encore en eau dans les ouvrages Girardon. Après dérivation, les surfaces anciennement sous l'eau deviennent alors des surfaces « émergées », c'est le cas des surfaces en rouge sur la Figure 21. Après cette phase de changement rapide, le système semble enregistrer une dynamique sédimentaire plus progressive (surfaces orangées et jaunes, Figure 18). Cette sédimentation en deux phases se caractérise par une géographie complexe qu'il est encore difficile de bien expliquer. Durant la phase impactée uniquement par les ouvrages Girardon (1900s-1974), 36% des surfaces se terrestrialisent au niveau des champs de casiers. Durant la seconde phase (1974-2009), cumulant les impacts des ouvrages Girardon et la mise en dérivation, ce sont encore 29% des surfaces qui émergent. Les contributions relatives des phases d'aménagement sur l'évolution des superficies atterries des champs de casiers sont donc du même ordre de grandeur qu'au niveau de la bande active totale.

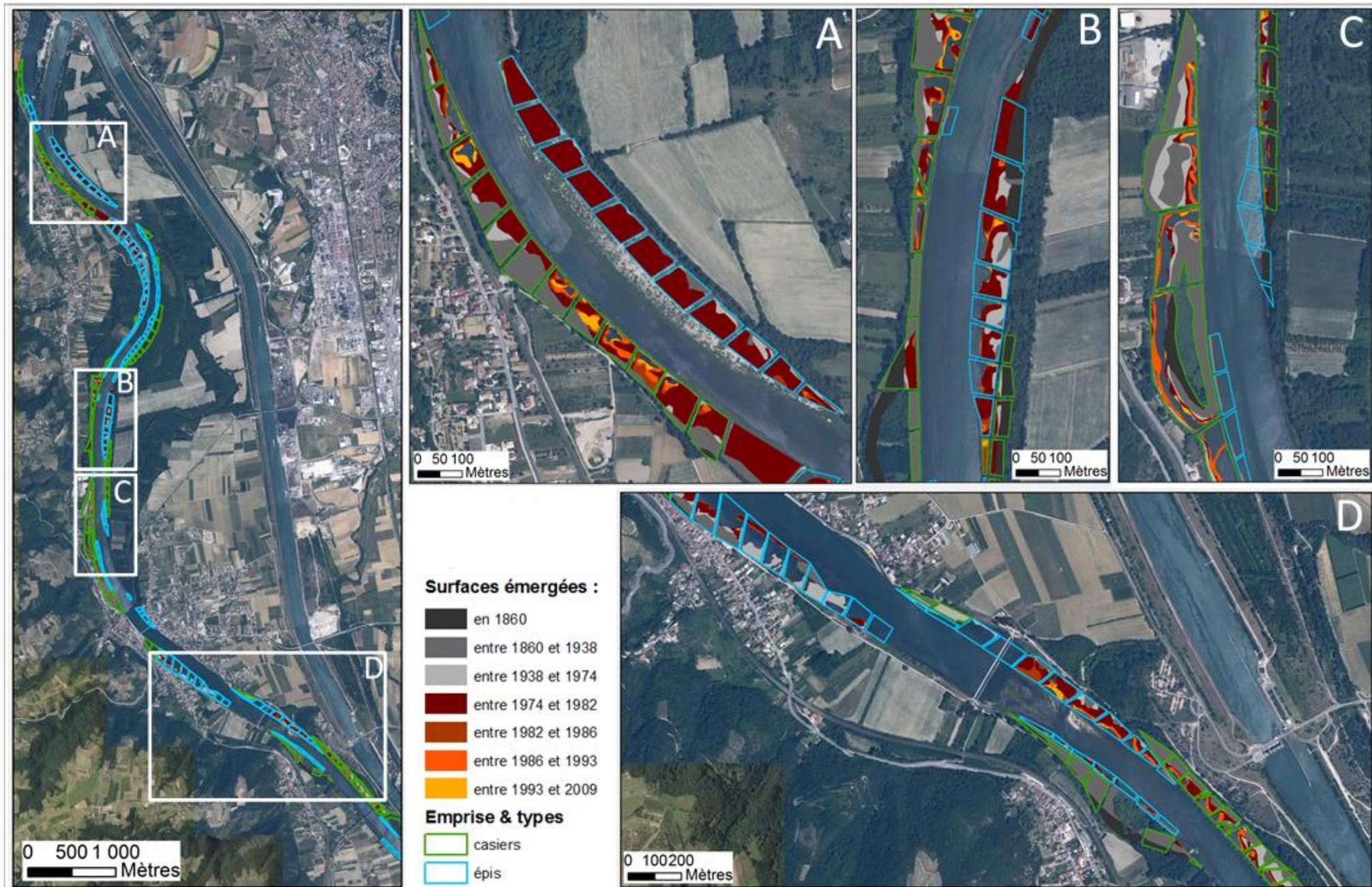


Figure 21. Evolution planimétrique à PDR

b. Patrons planimétriques d'atterrissement des casiers (structures fermées)

Sur la Figure 21, les casiers se distinguent par leur contour de couleur verte. Les casiers semblent se déconnecter du chenal principal suivant deux rythmes : une première phase rapide, ceci s'illustrant par des patrons simples, formant des bandes sédimentaires parallèles au chenal, une seconde phase plus progressive, avec des patrons sédimentaires à fermeture concentrique. Les deux cas sont observables sur la Figure 18A.

Certains casiers, parmi les moins connectés au chenal, sont totalement atterris dès 1938 alors que d'autres, plus connectés émergent principalement après l'abaissement de la ligne d'eau en 1977.

C'est généralement le « fond » du casier (la partie la plus éloignée du chenal) qui enregistre la sédimentation la plus ancienne. Les zones d'atterrissement résultant de la seconde phase d'aménagement s'ajoutent aux zones atterries précédemment, fermant totalement ou partiellement les casiers, laissant des zones en eau résiduelles qui forment localement des mares. Les patrons d'atterrissement présentent des trajectoires d'évolution semblables sur plusieurs casiers successifs dès lors que ces casiers présentent une géométrie et une relation (connectivité et positionnement) au chenal qui sont assez semblables.

c. Patrons planimétriques d'atterrissement des zones inter-épis (structures ouvertes)

Sur la Figure 21, les champs d'épis se distinguent par leur contour de couleur bleue. Il est intéressant de noter qu'au niveau des champs d'épis, la couleur rouge domine. Elle correspond à la période d'exondation résultant principalement de l'abaissement de la ligne d'eau consécutif à la dérivation. Une sédimentation sur ces zones exondées accentue le phénomène de terrestrialisation. Ces champs d'épis, ouverts sur le chenal restent cependant très dynamiques, ce qui se traduit notamment par des surfaces qui se végétalisent peu (végétation basse, pionnière). Ils sont aussi soumis à des interventions mécaniques périodiques limitant le développement végétal.

d. Evolution de l'occupation du sol dans un train de casiers

Afin de comprendre comment les structures Girardon co-évoluent en termes de sédimentation et de végétalisation, nous avons étudié l'évolution planimétrique détaillée d'un train de casiers. Situé à l'amont du RCC en rive droite concave au niveau du PK 52,5, le train de casiers 29 constitue la zone d'étude (Figure 21A, Figure 25). Les douze casiers qui le composent ont été digitalisés et catégorisés selon le type d'occupation du sol : les strates arbustive, herbacée, les surfaces minérales (i.e. les bancs de graviers, sables et les enrochements) et les surfaces en eau.

L'approche planimétrique de l'étude diachronique de ces casiers (Figure 22) permet d'observer une forte diminution des surfaces immergées au profit des surfaces minérale, herbacée et arbustive. Cette évolution concerne tous les individus du train de casiers.

Au sein du casier n°12 par exemple, la dynamique de terrestrialisation se met en place dans un premier temps entre 1974 et 1986 au profit des surfaces en eau. La surface minérale est 6 fois plus vaste en 1986 qu'en 1974, et les surfaces immergées qui représentaient 83 % du casier en 1974 ne

recouvrent plus que 2,4 % en 1986. Par la suite, entre 1986 et 1993, un processus de végétalisation s’amorce avec un recouvrement du minéral par des espèces herbacées. La part de la strate herbacée passe en effet de 33 % à 98 % entre ces deux dates. Enfin, entre 1993 et 2009, la végétalisation se poursuit et les essences arbustives deviennent plus prégnantes, passant de 2 % à 7 % de la superficie du casier.

Toutefois, ce casier est particulier dans son évolution car il est très connecté au Rhône : la digue submersible n’est pas complète et le casier s’ouvre directement sur le chenal en eau (Figure 23 : ce n’est pas visible en 2009 mais la photographie de 1948 en témoigne). Ceci expliquerait une végétation pionnière, herbacée évoluant peu vers la strate arbustive.

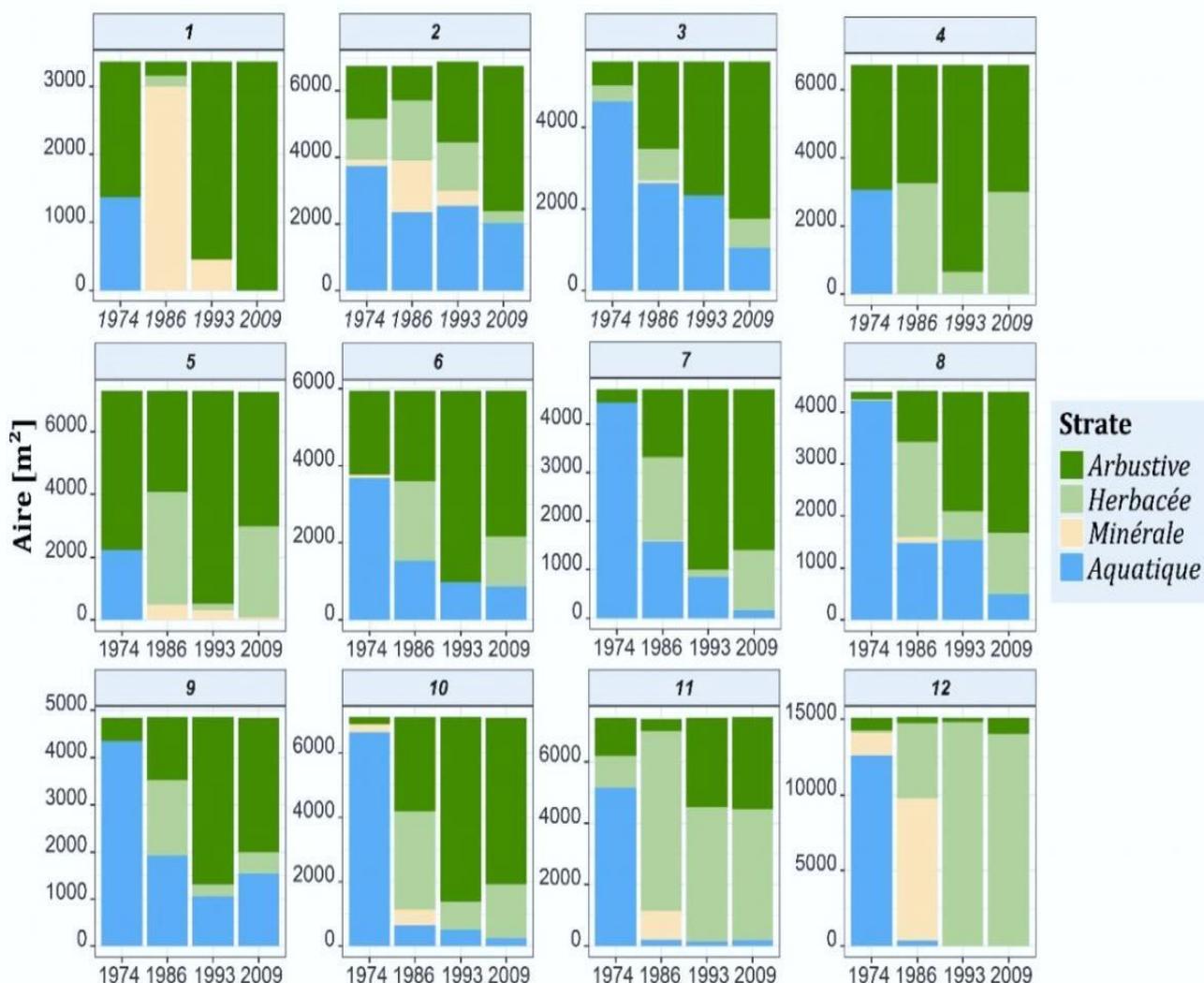


Figure 22. Occupation du sol dans les casiers du train n° 29 entre 1974 et 2009



Figure 23. Photographies du casier 12 en 1948 et en 2009

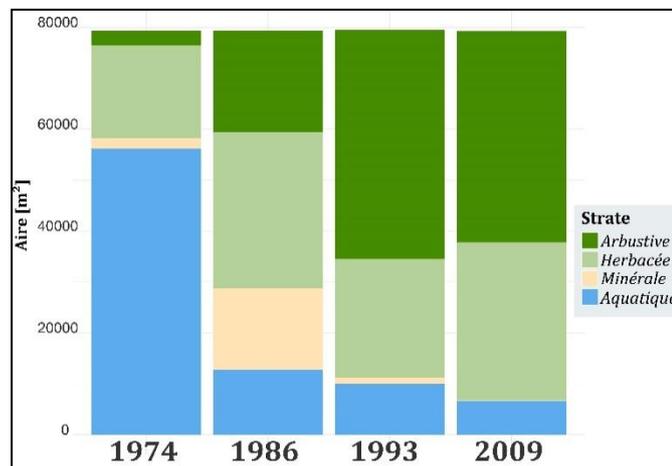
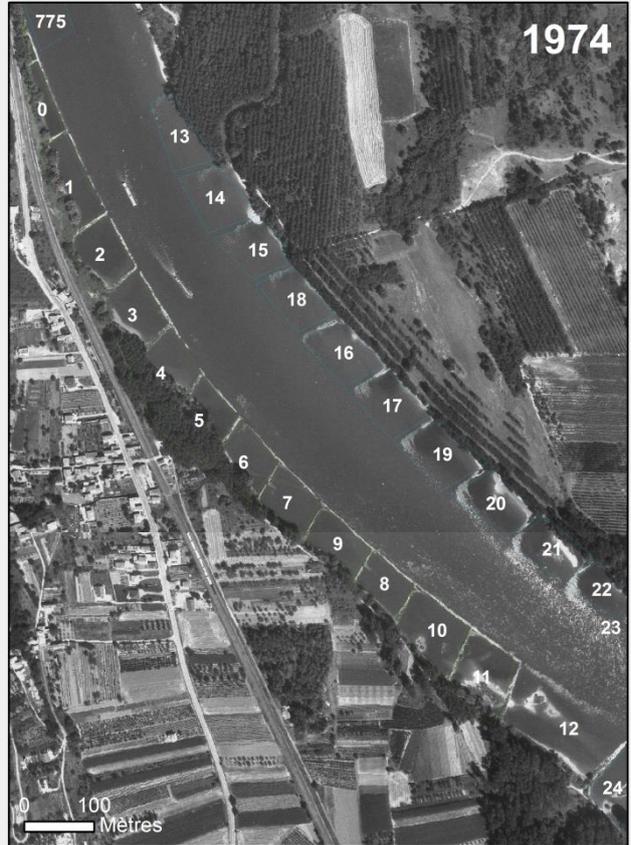


Figure 24. Occupation du sol (surfaces cumulées) dans le train de casiers 29 de PDR entre 1974 et 2009

Il est également possible d'identifier des trajectoires plus globales. En effet, sur ce train de casiers (surfaces cumulées sur la Figure 24), le phénomène d'atterrissement consécutif à la dérivation de 1977 est très marqué. Le phénomène de dérivation entraîne l'exondation de nouvelles surfaces « minérales » (très visibles au niveau des photographies de 1986) dans des casiers qui étaient auparavant globalement aquatiques. En 1986, le milieu est en train de s'ajuster et les surfaces minérales sont colonisées par la végétation pionnière, notamment herbacée (Figure 22 – 1986). La bordure de la ripisylve progresse alors en direction du chenal tandis que les surfaces minérales continuent de se couvrir d'une strate herbacée typique des milieux régulièrement inondés. Il est intéressant de noter la stabilisation des ratios d'occupation du sol entre 1993 et 2009 (Figure 19 & 21) : les proportions des strates herbacées et arbustives sont similaires entre les deux dates. La strate arbustive n'est plus dans une dynamique d'expansion comme entre 1986 et 1993. De ce fait, les strates herbacées restent en place sur les bordures souvent inondées (Figure 22 – 2009).



Les casiers sont numérotés afin de faire la correspondance avec la Figure 22

Figure 25. Terrestrialisation et végétalisation du train de casiers 29 de 1948 à 2009

4.2. Sédimentation historique

4.2.1. Volumes et épaisseurs de sédiments

L'analyse diachronique de l'évolution de la bande active 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.

Nous avons calculé les épaisseurs moyennes et des volumes moyens de sédiments à partir des sondages localisés sur la Figure 26 pour les unités fluviales suivantes : casiers, champs d'épis, plaine jeune et plaine âgée (Figure 27). Le produit des épaisseurs moyennes et de la surface de chaque unité fluviale (tableau 8) a permis également d'estimer les stocks de sédiments fins et de graviers associés à ces unités.

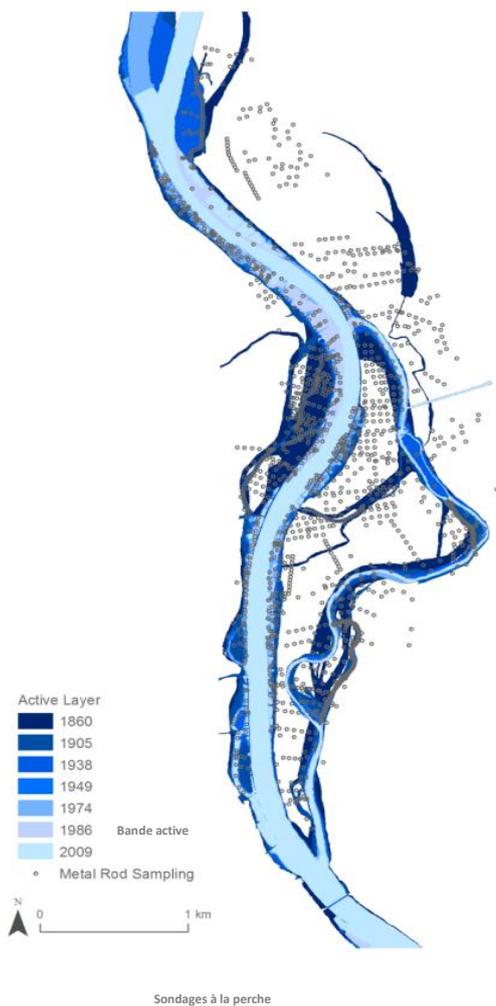


Figure 26. Bandes actives et sondages à la perche sur le secteur de Péage-de-Roussillon

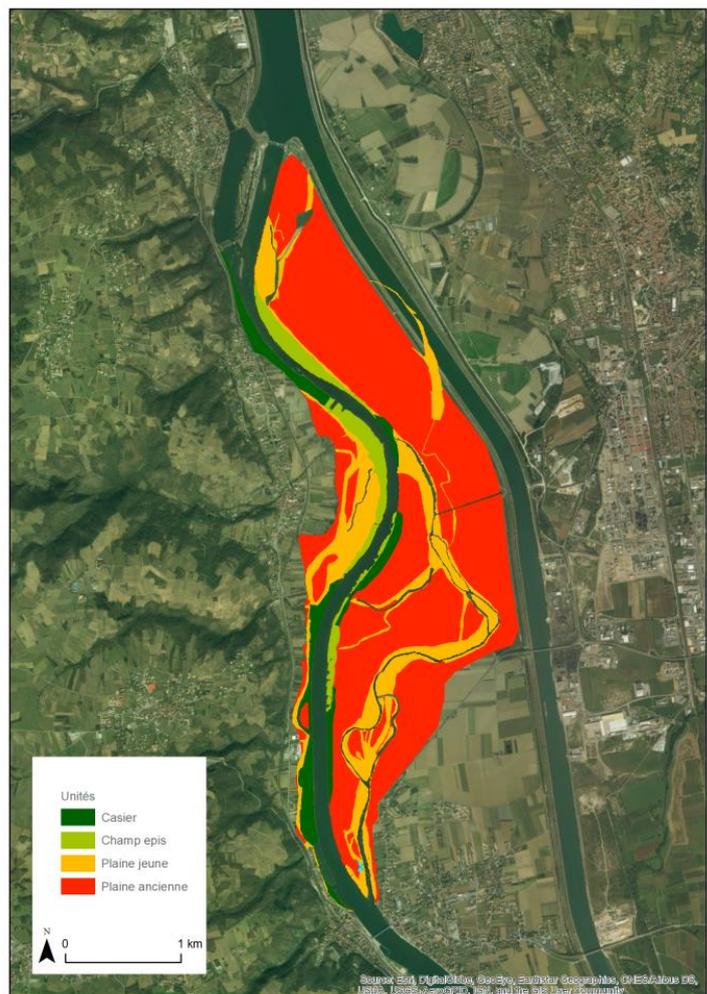


Figure 27. Unités fluviales du secteur de Péage-de-Roussillon

Tableau 8. Caractéristiques des unités fluviales à Péage-de-Roussillon

Unité	Surface (km ²)	Ép. sédiment fin (m)	Ép. gravier (m)	Vol. sédiment fin (10 ⁶ m ³)	Vol. grav (10 ⁶ m ³)
Champ d'épis	0,34	0,45	3,33	0,15	1,13
Casier	0,44	1,44	3,22	0,63	1,42
Plaine jeune	1,35	2,49	3,53	3,35	4,75
Plaine ancienne	4,45	2,16	4,96	9,58	22,03

La plaine ancienne (antérieure à 1860) présente en moyenne une **épaisseur de sédiments fins** de 2,16 m avec un maximum de 4,85 m. L'épaisseur de sédiments fins est plus importante dans la plaine jeune (postérieure à 1860) avec une moyenne de 2,49 m. L'épaisseur moyenne observée dans les casiers n'est que de 1,44 m. L'épaisseur observée dans les champs d'épis n'atteint que 0,45 m.

Le **volume de sédiments fins** estimé dans la plaine ancienne est légèrement inférieur à 10 millions de mètres cubes, soit 70 % du stock total. Il s'agit de la première unité fluviale en termes de volume du fait de l'importante surface qu'elle recouvre. Vient ensuite la plaine jeune qui stocke un volume de sédiments fins de 3,3 millions de mètres cubes. Les casiers piègent quant à eux environ 650 000 m³ et les champs d'épis environ 150 000 m³. Ce sont des volumes plus faibles mais plus facilement remobilisables et qui sont de fait les plus concernés par les préconisations futures en matière de redynamisation des marges.

A partir de la surface du toit du gravier et de la pente du fond du lit tirée de la BDT Rhône, nous avons déterminé les **stocks de graviers**. Les **épaisseurs moyennes de graviers** sont du même ordre de grandeur pour les casiers, les épis et la plaine jeune : entre 3,22 et 3,53 m. L'épaisseur de gravier pour la plaine ancienne est plus importante avec une moyenne de 4,96 m.

Le **volume de graviers** estimé dans la plaine ancienne est légèrement supérieur à 22 millions de mètres cubes. Ce volume impressionnant est imputable aux caractéristiques de l'unité « plaine ancienne » : une grande surface (zone en rouge sur la Figure 24) et des épaisseurs moyennes en graviers plus importantes. Le volume estimé au niveau de la plaine jeune est de presque 5 millions de mètres cubes, et les volumes estimés pour les casiers et les champs d'épis sont de 1,4 et 1,1 millions de mètres cubes, respectivement. Ce sont ces volumes plus faibles de graviers, mais néanmoins plus facilement remobilisables qui sont importants pour les préconisations futures en matière de redynamisation des marges.

4.2.2. Taux de sédimentation moyens des sédiments fins

Les taux de sédimentation moyens des sédiments fins ont été déterminés grâce au rapport entre l'épaisseur des sédiments fins et la période de temps durant laquelle la station observée est atterrie. Ils ont été calculés en fonction des différentes phases de construction du lit majeur et des unités fluviales.

Les taux de sédimentation les plus élevés correspondent à ceux de la plaine jeune, proches de 2 cm/an avec des maxima supérieurs à 4 cm/an (Figure 24). La plaine ancienne établie depuis 1860 enregistre un taux de sédimentation de 1,5 cm/an, et les casiers et champs d'épis enregistrent des taux inférieurs à 1 cm/an.

Les périodes où les taux de sédimentation sont les plus forts correspondent à celles précédant la mise en place des aménagements de correction (période 1860-1905). Au niveau des dépôts plus récents, les taux de sédimentation décroissent et notamment au niveau de ceux émergés après la dérivation (taux de sédimentation inférieurs à 1 cm/an). Cette tendance est surprenante car les taux de sédimentation des unités les plus anciennes et les moins connectées sont généralement plus faibles que ceux des unités plus jeunes et les plus connectées. Cette tendance peut s'expliquer par une réduction très significative du flux de sédiments transitant dans la section au cours du XX^{ème} siècle et de la connectivité spécifique des marges susceptibles de piéger les sédiments fins en transit. Avant les aménagements Girardon, les milieux riverains étaient soumis à une sédimentation plus importante que celle que l'on connaît au 20^{ème} siècle. Cette sédimentation était également plus sableuse, ce qui souligne que les marges étaient aussi plus actives hydrauliquement que celles que l'on observe aujourd'hui. Les aménagements successifs ont favorisé une déconnexion progressive du système qui se traduit par une réduction de la sédimentation et de la taille des particules qui se déposent.

Ces chiffres sont cohérents avec les estimations de la sédimentation à partir des profils de radioactivité du Cs137 et du Pb210 dans le casier étudié par le BRGM (ID OSR : Casier 117, Pk 55,8). Le casier étudié enregistre un taux de sédimentation parmi les plus élevés de notre jeu de données, ce qui pourrait s'expliquer par des conditions hydro-sédimentaires particulièrement favorables à la sédimentation des fines.

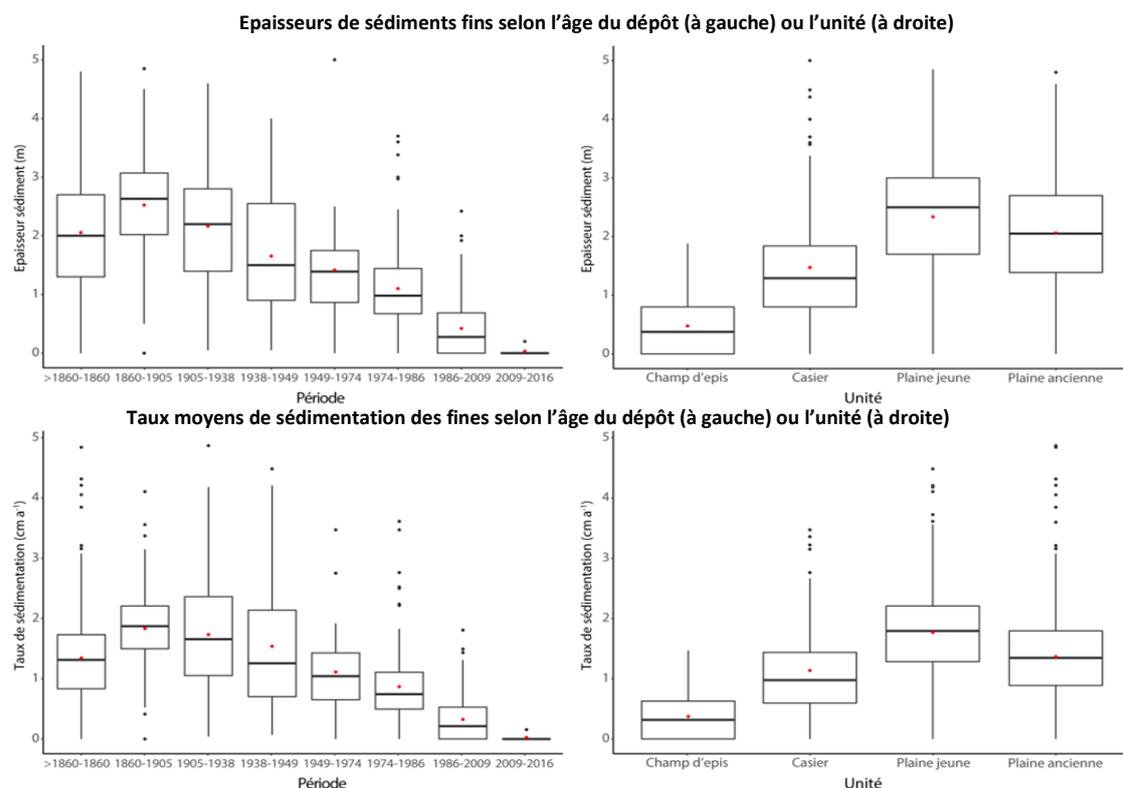


Figure 28. Epaisseurs de sédiments fins et taux moyens de sédimentation des fines selon l'âge du dépôt (à gauche) ou l'unité (à droite) à Péage-de-Roussillon

4.2.3. Analyses des profils GPR

Les profils stratigraphiques réalisés au GPR permettent de compléter les analyses effectuées à la perche pour étudier les taux de sédimentation (Figure 30)

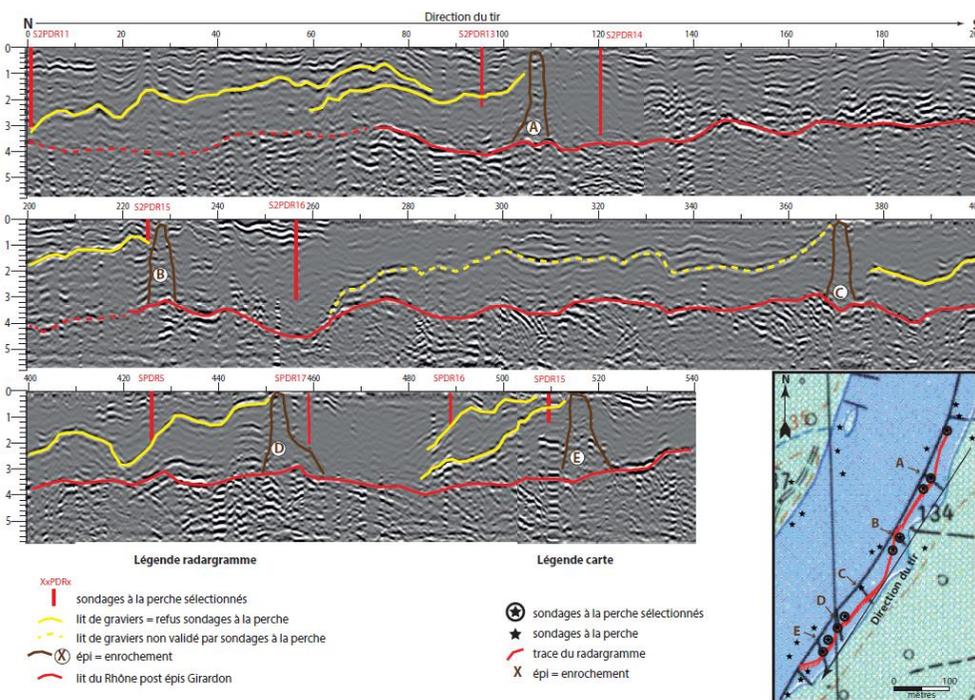


Figure 29. Etude diachronique du site « GPR5 » à Péage de Roussillon (source : IGN)

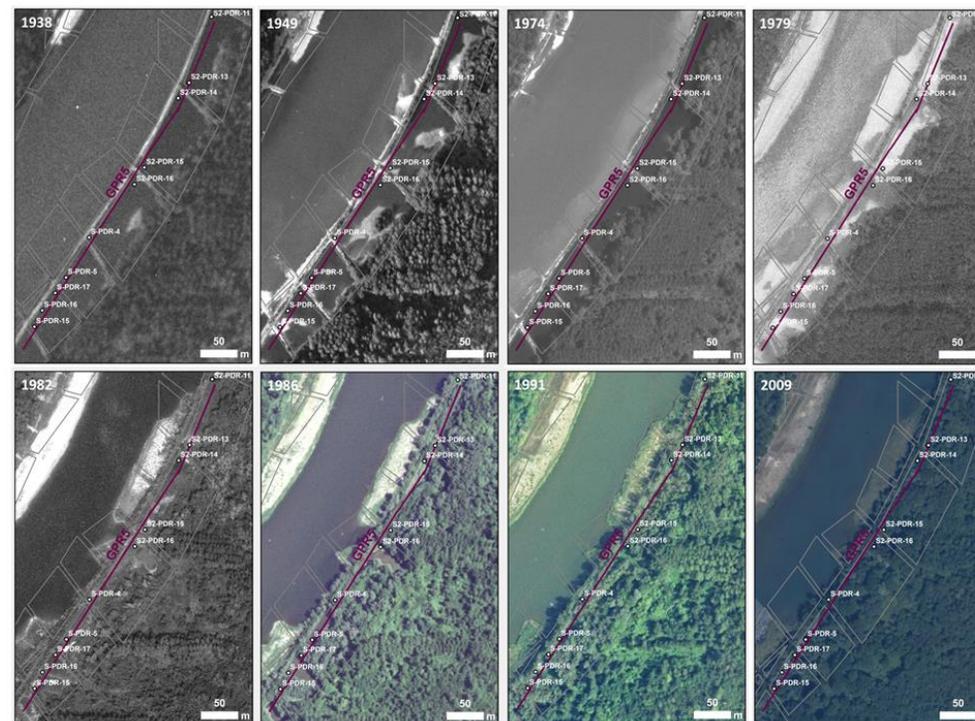


Figure 30. Interprétation d'un radargramme effectué dans les casiers Girardon de Péage-de-Roussillon (GPR5 – Longueur 540 m) s'appuyant sur une série de sondages à la perche

Les profils GPR sont annotés en s'appuyant sur les sondages à la perche réalisés au plus près de leur localisation. Une première analyse a été effectuée sur le profil GPR5 (Figure 25) qui recoupe un train de casiers (Figure 26). Ce travail permet de bien identifier les épis, le fond des casiers et les structures internes de sédimentation de ces casiers qui soulignent la complexité de la sédimentation. Une interpénétration de couches sablo-limoneuses et de couches graveleuses est souvent observée. La base de cette sédimentation complexe semble s'établir de manière plus ou moins uniforme autour de 3,5 à 4m de profondeur. L'aval immédiat de chacun des tenons semble généralement composé de sédiments fins (peu de réflecteurs, peu marqués). Ces zones, sur la diachronie 30 correspondent à des zones comblées tardivement par fines (après la dérivation).

Ce type de structure pourrait correspondre à une ancienne fosse de dissipation, active lorsque le débit n'était pas réduit qui s'est remplie de sédiments fins après la mise en dérivation. Par exemple, la zone entre SPDR17 (Figure 30, à 400m) et SPRD16 (Figure 30, 475m) encore en eau en 1986 (Figure 29) présente ce type de configuration. On observe que la partie la plus aval de ces couches semble être plus graveleuse (réflecteurs plus épais surlignés en jaune, Figure 25, à 500m), ce qui pourrait être un reliquat de l'ancienne fosse de dissipation.

4.2.4. Granulométrie et teneurs en métaux lourds dans les carottes

La granulométrie et les teneurs en métaux lourds des carottes (Figure 31) permettent de mieux interpréter les phases de remplissage sédimentaire. Ces informations créent un cadre théorique permettant de proposer différents scénarios de sédimentation au sein des différents compartiments alluviaux. Nous observons des changements granulométriques très contrastés au niveau des profils sédimentaires de la plupart des carottes (Figure 31B). La partie la plus basse est très souvent sableuse, rendant compte de stations morphologiquement actives, très connectées au fleuve. C'est le cas par exemple de C10A ou C10C.

Une rupture (traits bleus, Figure 31B) très marquée est souvent observée, soulignant une modification brutale des conditions hydrauliques dans la plaine. Cette première rupture, lorsqu'elle est visible, est interprétée comme étant liée à une déconnection par les ouvrages Girardon. Lorsque nous calculons les taux de sédimentation moyens sur la base de ces hypothèses, les valeurs sont similaires à celles indiquées précédemment, entre 0,5 et 0,8 cm/an (Figure 28). Cette interprétation ne peut pas être confortée par les résultats de la datation au Césium 137 et au Plomb 210, leur signal n'ayant pas été détecté sur les carottes d'étude. Ainsi, nous avons été amenés à réaliser de nouveaux prélèvements pour une datation au C14 des parties basses des carottes. Il est donc encore nécessaire de caler une date dans le 19^{ème} siècle pour confirmer cette interprétation.

Sur certaines carottes, une seconde rupture (traits orange, Figure 31B) est observée avec diminution de la granulométrie, symbolisant une nouvelle réduction, encore plus drastique, de la capacité de transport des particules jusqu'au point de prélèvement. C'est les cas notamment de C12a et de C12b. Il est possible que cette rupture soit associable à la mise en débit réservé de 1977 et au laminage des crues associé. Cette seconde phase est également détectée avec les signatures en Zinc dans les carottes qui présentent des tendances singulières. En effet, la plupart des carottes enregistrent une diminution des teneurs en Zinc dans les derniers centimètres, après un pic de Zinc ou parfois un plateau maximal qui pourrait correspondre aux années 1970. Cette phase de diminution déjà observée par B. Mourier et l'équipe de l'ENTPE pourrait alors caractériser la période 1980-2016. Elle présente parfois une épaisseur conséquente (C10C) ou est seulement présente en surface (C10a, C10, C12a). Ceci permet de détecter les stations qui enregistrent actuellement une certaine sédimentation de celles qui sont déconnectées (ILON 3 et ILO 5, Figure 31A). Ces éléments renforcent l'hypothèse selon laquelle certaines stations enregistrent un ralentissement de la sédimentation à la suite de la mise en RCC. Selon cette hypothèse, on enregistrerait des taux de sédimentation entre 0,4 et 0,6 cm/an pour cette période.

La carotte C10C était sans doute déjà très déconnectée en 1977 (trait bleu, Figure 31B). En effet, elle enregistre un changement granulométrique très important dès la première rupture (trait orange, Figure 31B), passant d'une granulométrie sableuse à limoneuse. La seconde rupture, plus progressive,

est atténuée de ce fait par la typologie génétique des sédiments qui, à ce point de prélèvement déjà déconnecté, sont caractérisés par une granulométrie plus fine.

La carotte C3, à la localisation très perchée, est sableuse sur toute sa verticale. Il est donc possible qu'elle n'enregistre plus de sédimentation depuis longtemps car cette typologie granulométrique témoigne d'une dynamique sédimentaire plus énergétique, que l'on associe grâce à l'analyse des autres carottes, à la période pré-Girardon. Elle n'a donc sans doute enregistré aucune sédimentation au 20^{ème} siècle, tout comme ILON 3 et ILON 5. En outre, elle présente une anomalie en termes de Zinc qu'il convient encore d'interpréter.

Enfin, il est également possible que certaines stations aient enregistré un ralentissement significatif de la sédimentation du fait de la déconnexion du bras secondaire (situé dans la convexité – Figure 31A) antérieurement aux aménagements. C'est le cas de C10B et C10C il y a 167 ans. Ceci constitue des hypothèses encore à confirmer grâce aux méthodes de datation C14 en cours.

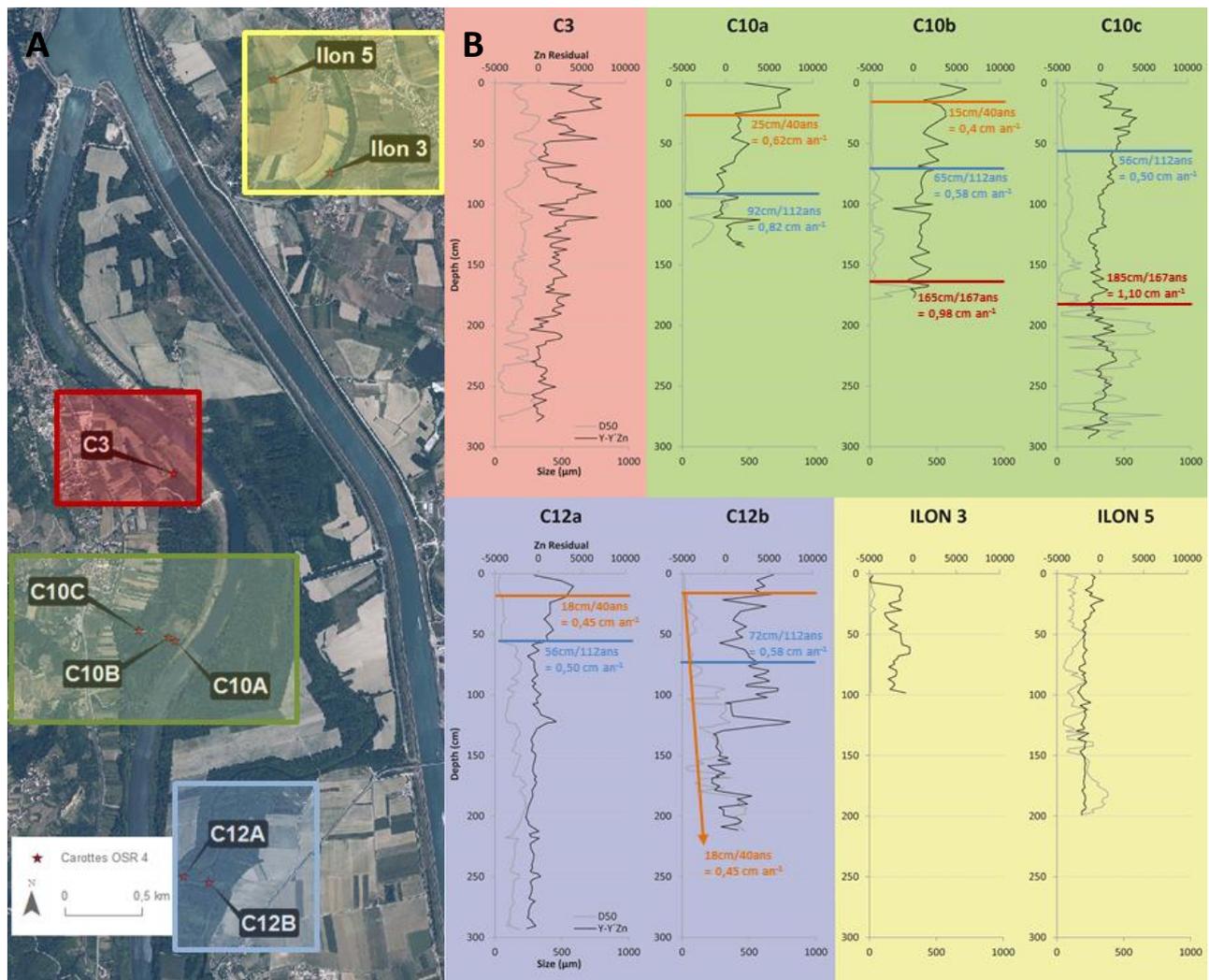


Figure 31. A) Localisation des carottes à Péage-de-Roussillon et B) Granulométrie (D50, courbe grise) et résidus des teneurs en Zinc (courbe noire) en fonction de la granulométrie. On utilise les résidus de la loi concentration en Zinc vs. Granulométrie, car les concentrations sont affectées par les granulométries et les résidus permettent de pondérer l'effet de cette granulométrie. Les paliers horizontaux de couleurs bleu, rouge, et orange représentent nos hypothèses de début de sédimentation et le taux de sédimentation moyen associé. Rouge représente un changement de dynamique de bras principal à bras secondaire, Bleu, l'effet Girardon et Orange, l'effet post-dérivation (RCC).

4.3. Concentrations en métaux dans les sédiments

La notion de pollution est complexe et se transcrit différemment selon le référentiel étudié. Afin de contextualiser les teneurs présentées, nous avons indiqué trois seuils de référence.

- le **TEC (Threshold Effect Concentration)** correspond à la concentration en-dessous de laquelle il ne devrait pas y avoir d'impacts écotoxicologiques (issu de McDonald, 2000),
- le **PEC (Probable Effect Concentration)** est la concentration au-dessus de laquelle des effets écotoxicologiques sont le plus souvent attendus (issu de McDonald, 2000),
- le **seuil S1** correspond à la réglementation pour la qualité des sédiments issus de cours d'eau et de canaux de navigation définie en France dans l'article 1^{er} de l'arrêté du 09 août 2006.

Ces seuils de qualité intègrent des aspects éco-toxicologiques mais aussi réglementaires : par exemple, le S1 conditionne le régime des opérations de dragage (autorisation ou déclaration) ou de remise des sédiments dans les cours d'eau.

Ces seuils s'appliquent à 8 métaux lourds, ainsi qu'aux HAP et PCB totaux. Il est important de noter que l'application de ces indicateurs n'est pas toujours claire dans la littérature scientifique. Ils sont souvent appliqués à des analyses chimiques sur la fraction totale des sédiments. Ayant souvent travaillé sur la fraction fine, nous ne pouvons donc pas interpréter nos valeurs d'indicateurs de manière comparable aux TEC et PEC officiels (sur la fraction totale), mais leur usage offre toutefois la possibilité de déterminer un seuil pour caractériser une contamination. En effet, étant donné que c'est la fraction fine qui est ici étudiée, le signal est concentré. Par conséquent, si les seuils présentés ici ne sont pas dépassés, nous pouvons considérer que les TEC et PEC réels ne sont pas dépassés dans l'échantillon total.

4.3.1. Sédiments de la plaine alluviale

a. *Sédiments de surface*

Les éléments métalliques sélectionnés pour notre étude sont le Fe, Cu, Zn, Pb, Ni. Ces cinq éléments sont d'une part, bien estimés par XRF, et d'autre part, de bons indicateurs de pollution (Zn, Pb, Ni et Cu) ou des éléments de référence (Fe). Le positionnement GPS de chaque prélèvement à la tarière (i.e. 230 échantillons) permet de spatialiser les teneurs en métaux dans les sédiments superficiels.

A titre d'exemple, la Figure 32 présente les concentrations en Zinc (mg/kg) sur l'ensemble du secteur de Péage-de-Roussillon. On observe que les teneurs les plus élevées en Zinc dans les sédiments de surface se situent au niveau de bras secondaires rarement connectés. Il semble donc pertinent d'étudier ces teneurs en fonctions de variables structurantes de la dynamique alluviale.

Nous avons étudié le comportement des concentrations métalliques en fonction des variables suivantes :

- la **typologie des unités alluviales** au niveau des points de prélèvement.
- la **date/période de début d'atterrissement** au niveau des points de prélèvement (par photo-interprétation).
- la **fréquence de submersion** associée à la localisation GPS des prélèvements (modèle issu de Džubáková et al., 2015).

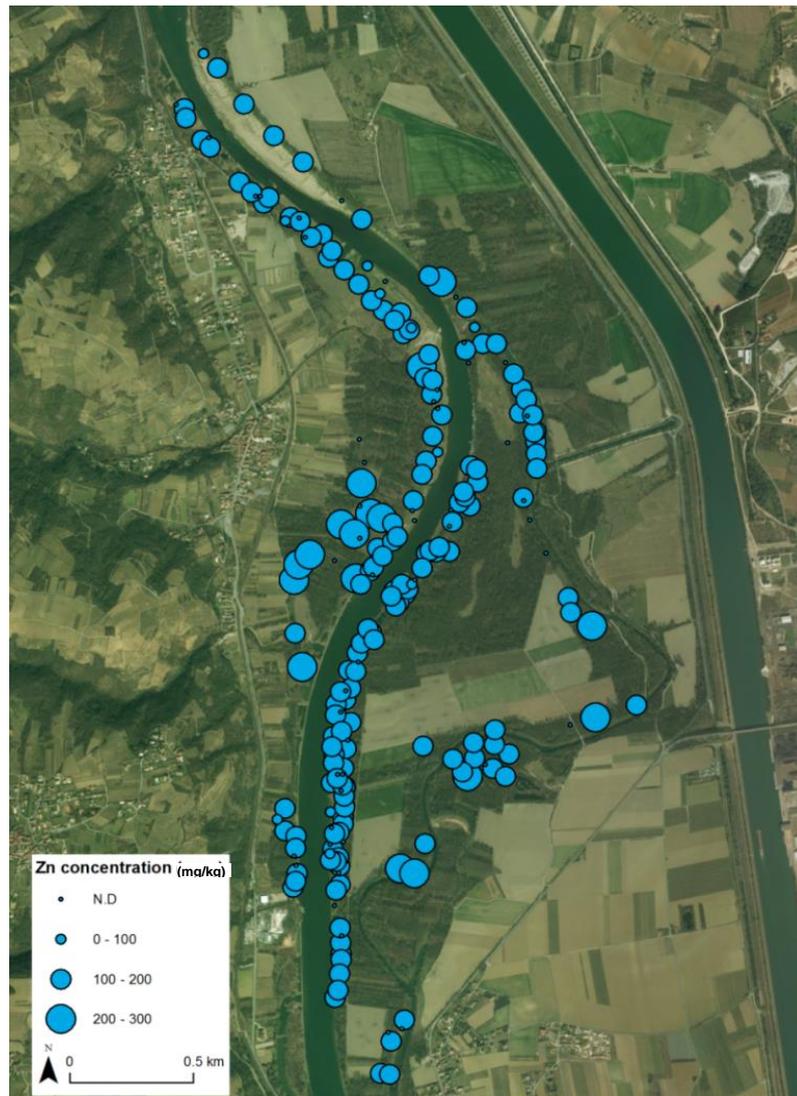


Figure 32. Concentration en Zinc (mg/kg) dans les sédiments superficiels à Péage-de-Roussillon

La Figure 33 présente les teneurs moyennes en éléments métalliques contenus dans les sédiments des différentes unités alluviales.

Dans les sédiments de surface de Péage-de-Roussillon, les seuils S1 et les PEC ne sont que rarement dépassés. Le TEC est souvent dépassé quelle que soit l'unité alluviale pour le Zinc, le Nickel et le cuivre. Il est aussi dépassé pour le Plomb et le Cuivre au niveau de la plaine ancienne et de la plaine jeune. De manière générale, les teneurs en contaminants sont plus élevées dans ces unités alluviales plus éloignées du chenal et plus rarement connectées.

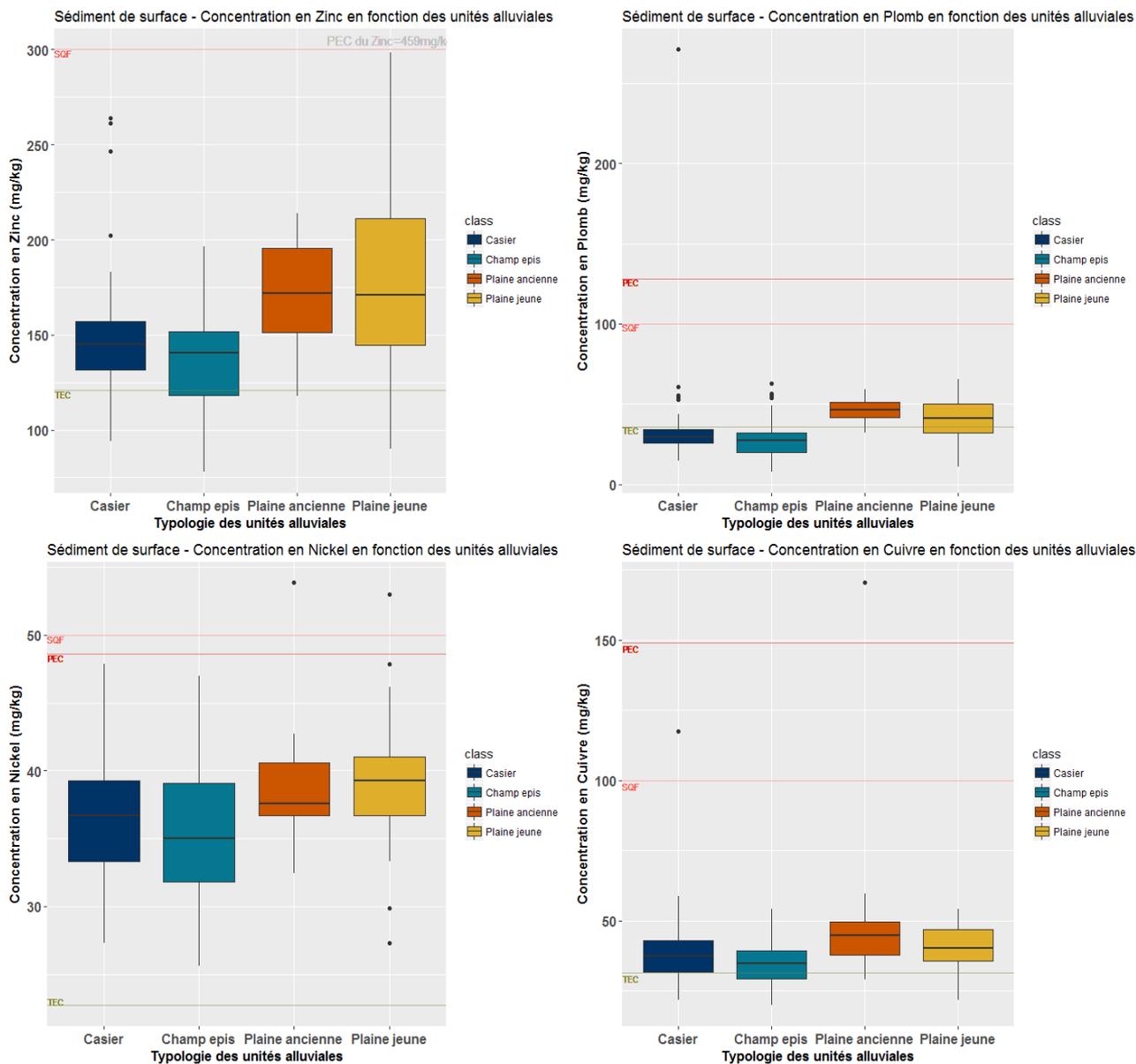


Figure 33. Concentrations des éléments métalliques dans les sédiments de surface en fonction des unités alluviales

Nous avons observé que les teneurs en Zinc les plus élevées se situent au niveau de bras secondaires rarement connectés (Figure 32). Le recouplement des données permet de montrer qu'il existe bien une relation statistique entre la teneur en Zinc et la fréquence de connexion (Džubáková, 2015) (Figure 34).

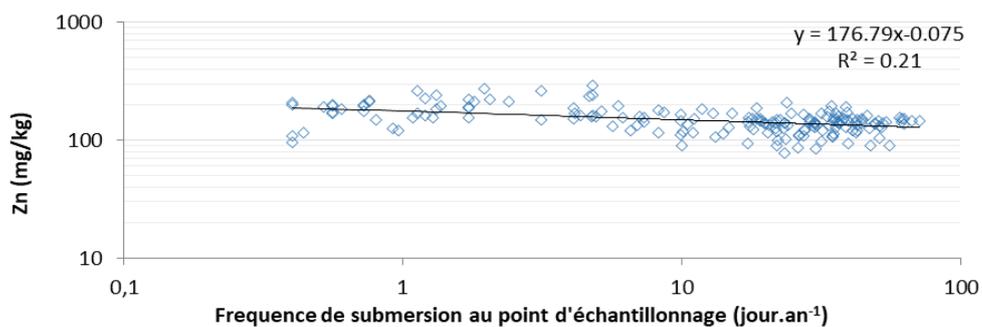


Figure 34. Relation entre la concentration en Zinc et la fréquence annuelle de submersion

Cette analyse montre une corrélation négative (significative à 0.05) entre la concentration en Zinc et la fréquence annuelle de connexion. Cela signifie que les concentrations en Zn les plus élevées sont associées à une faible fréquence de connexion et vice versa. L'hypothèse sous-jacente est que ces bras sont peu connectés et sédimentent peu, ce qui impliquerait qu'ils gardent en mémoire les flux de contaminants des années 1970 dans les 20 premiers centimètres des dépôts.

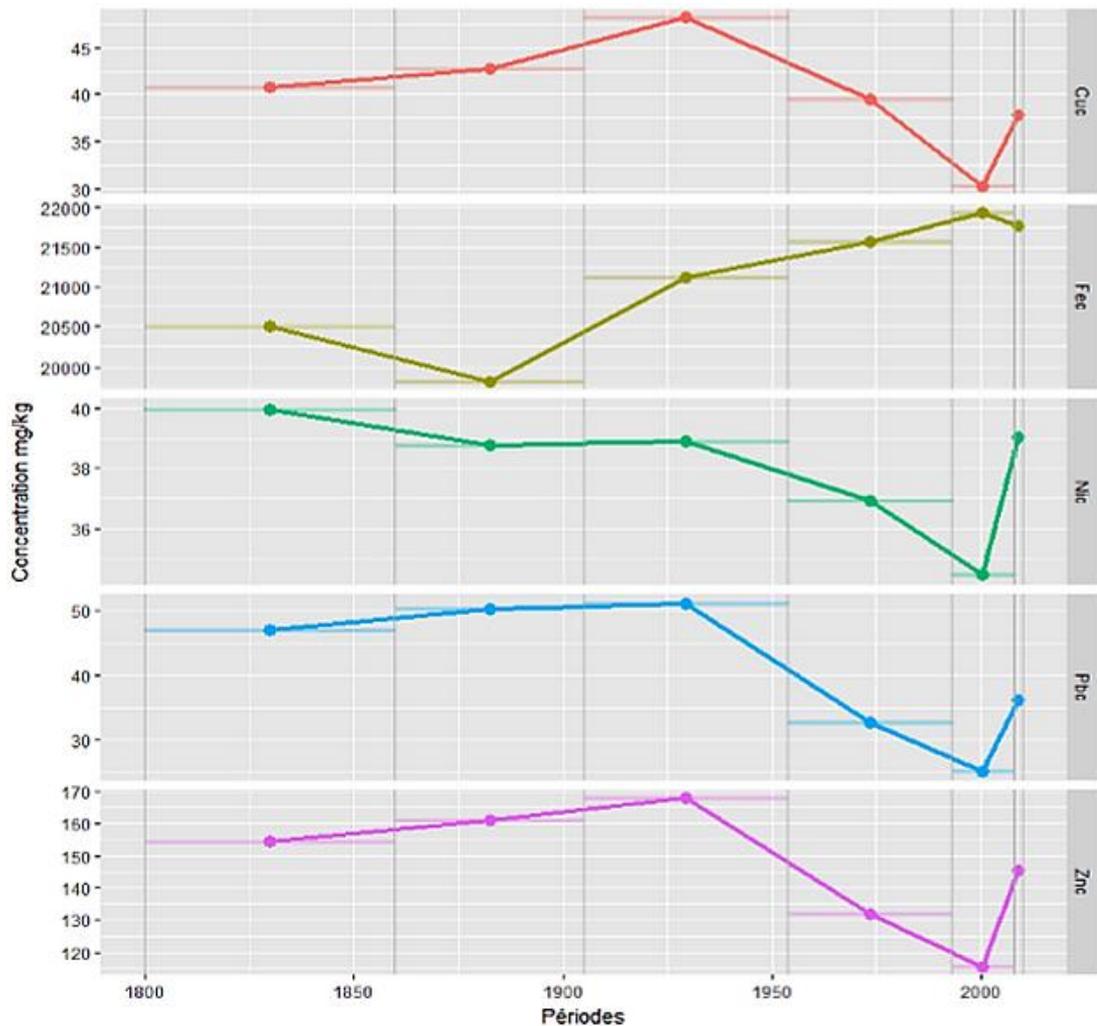


Figure 35. Évolution des teneurs moyennes en éléments métalliques de la surface en fonction des dates/périodes de début de sédimentation

L'analyse des concentrations en Zinc, Nickel et Plomb en fonction des dates/périodes de début de sédimentation (Figure 35) confirme les tendances observées par grandes unités morphologiques fluviales et selon la fréquence de connexion. Les concentrations sont relativement élevées sur les surfaces de lit majeur qui ont commencé à sédimenter entre 1860 et 1955. Ces concentrations sont plus faibles au niveau des unités qui ont commencé à s'atterrir entre 1955 et 2009. Le Cuivre enregistre des concentrations élevées sur les unités qui ont commencé à s'atterrir sur la période 1800-1860 avec un pic sur les surfaces atterries entre 1905 et 1955, puis il enregistre une diminution progressive jusqu'aux années 2000. Les concentrations en Fer ont quant à elles plutôt augmenté sur les surfaces qui ont commencé à s'atterrir plus récemment.

La typologie des unités alluviales et la fréquence de submersion semblent confirmer l'idée que les zones les plus connectées voient passer des flux de sédiments récents peu chargés en contaminants qui se déposent en surface alors que les zones plus anciennes, qui sédimentent peu ont gardé en mémoire en surface les flux de contaminants des années 70. La colonne de sédimentation de ces milieux, très épaisse, est ainsi très peu contaminée. Il est probable que les zones plus récemment atterries et moins contaminées en surface aient enregistré en profondeur des valeurs de contamination plus élevées, si ces zones ont connu une sédimentation avant la mise en RCC. En revanche, il y a peu de risque qu'elles soient contaminées si elles sont plus récentes. Cette analyse permet de pré-identifier les zones qui sont susceptibles de contenir des poches de sédiments potentiellement contaminées.

b. Profils verticaux à partir des carottes de la plaine alluviale

Les carottes sédimentaires permettent d'observer l'évolution détaillée des teneurs en métaux dans toute la tranche de sédimentation. Elles confirment l'existence de poches de contamination sur des milieux bien identifiés. Dans ces carottes, les métaux ont été analysés par SAAS sur échantillon total (section 3.2.3).

Pour ces échantillons, nous pouvons interpréter classiquement les seuils TEC et PEC. Sur la Figure 36, les concentrations de cinq ETM sont présentées : celle du Zinc, du Plomb, du Nickel et du Cuivre mais aussi du Mercure (Hg). Les lignes en pointillés noirs représentent le TEC. Le PEC ne peut quant à lui pas être dessiné sur cette même figure car ses valeurs sont supérieures à l'échelle utilisée.

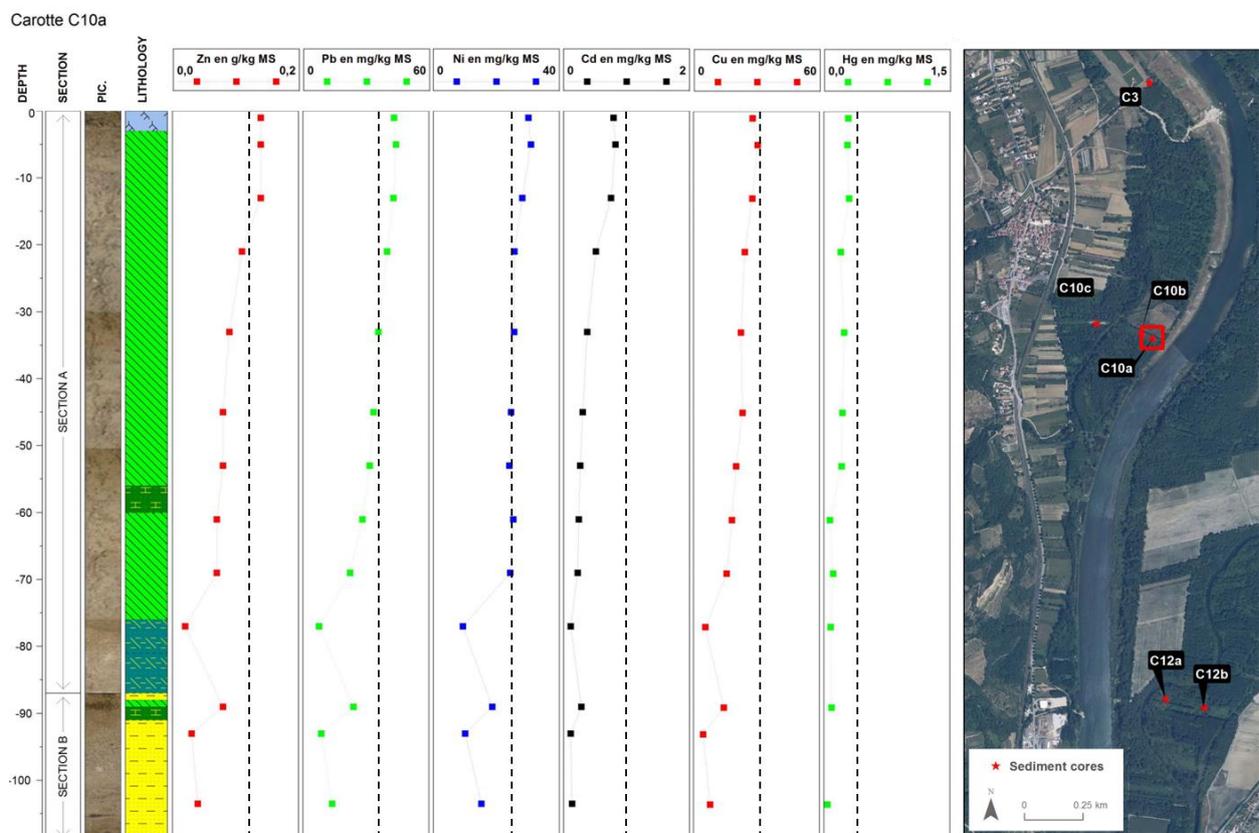


Figure 36. Résultats des analyses pour différentes teneurs métalliques mesurées sur la carotte C10a – (ICP / fraction totale ; la ligne pointillée représente le TEC)

Au niveau de la carotte C10a, la plus surélevée par rapport au chenal, et donc la plus déconnectée, la couche de surface (normalement la plus récente) présente des valeurs de pollution plus élevées. Dans cette couche de 25cm de profondeur, les seuils TEC du Zinc, du Plomb et du Nickel sont légèrement dépassés. Jusqu'à 90cm de profondeur, les valeurs sont relativement stables. Un pic de contamination se dessine aux alentours de 90cm de profondeur, puis plus loin, les teneurs en ETM redeviennent plus faibles (Figure 36).

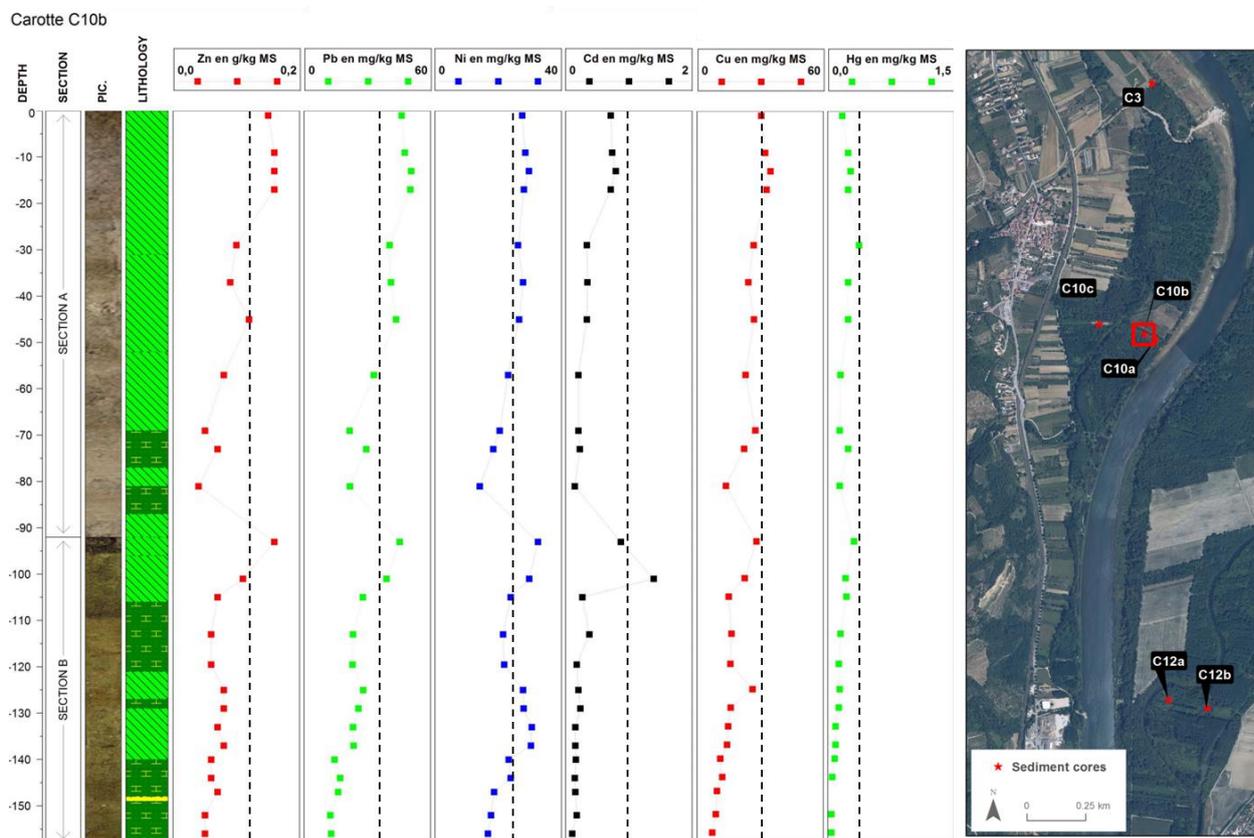


Figure 37. Résultats des analyses pour différentes teneurs métalliques mesurées sur la carotte C10b – (ICP / fraction totale ; la ligne pointillée représente le seuil S1-S1)

Pour la carotte C10b (Figure 37), davantage connectée au chenal, les patrons sont assez similaires, avec localement un pic de pollution autour de 90 cm de profondeur, un peu plus marqué que sur la carotte C10a (dépassant le TEC aussi à cette profondeur). Il semble que les teneurs en métaux soient légèrement plus élevées dans l'ensemble de cette carotte.

Ces carottes seront plus finement analysées et interprétées dans l'OSR5 car nous attendons des résultats d'analyse C14 permettant de caler la chronologie des patrons sédimentaires et des contaminations potentielles.

4.3.2. Cas spécifique des casiers

Lors de la campagne de terrain de l'OSR3, des prélèvements de sédiments ont été réalisés à la tarière pédologique (Sed4 dans le tableau 5, section 3.6.). Au final, ce sont 17 stations qui sont renseignées par des profils verticaux (Figure 38).

Afin d'explorer la variabilité intra-profil relative à la chronologie de la sédimentation, nous avons réalisé des graphiques représentant les teneurs en métaux en fonction de la profondeur du prélèvement sur le profil vertical.

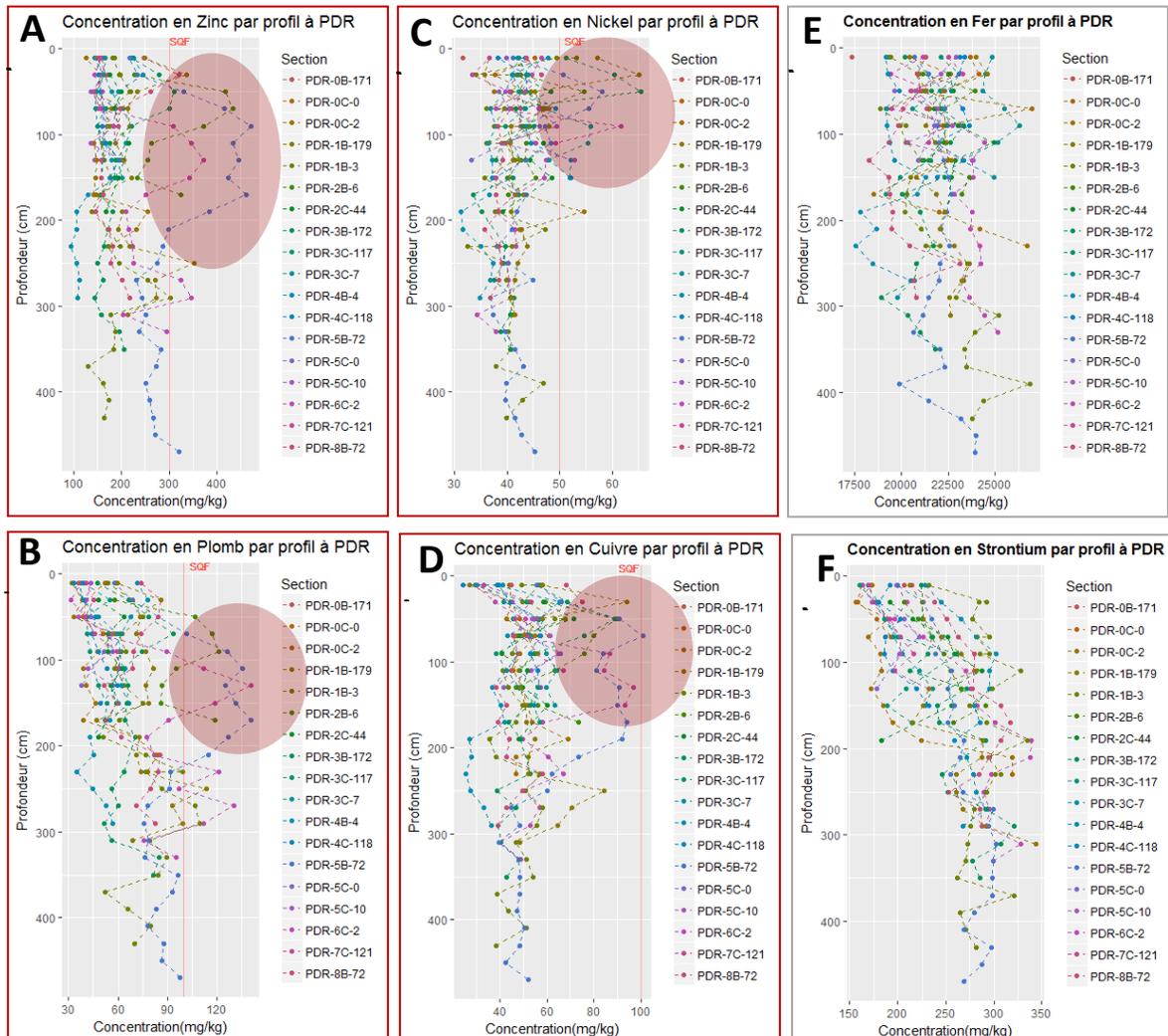


Figure 38. Graphiques représentant les teneurs en métaux en fonction de la profondeur du prélèvement dans les profils verticaux de PDR. Cercles rouges : échantillons avec les teneurs les plus élevées en polluants

Les cercles rouges (Figure 38) témoignent d'une contamination stationnelle, fonction de la chronologie de la sédimentation. En effet, trois profils semblent sortir du lot avec un seuil S1 dépassé pour le Zn, Pb, Ni et Cu. Il s'agit de « PDR-5B-72 », de « PDR-2B-6 » et de « PDR-6C-2 ».

Afin de mieux cerner l'histoire de ces profils, des graphiques individuels offrent une vue de détail (Figures 39 et annexes 1 à 5).

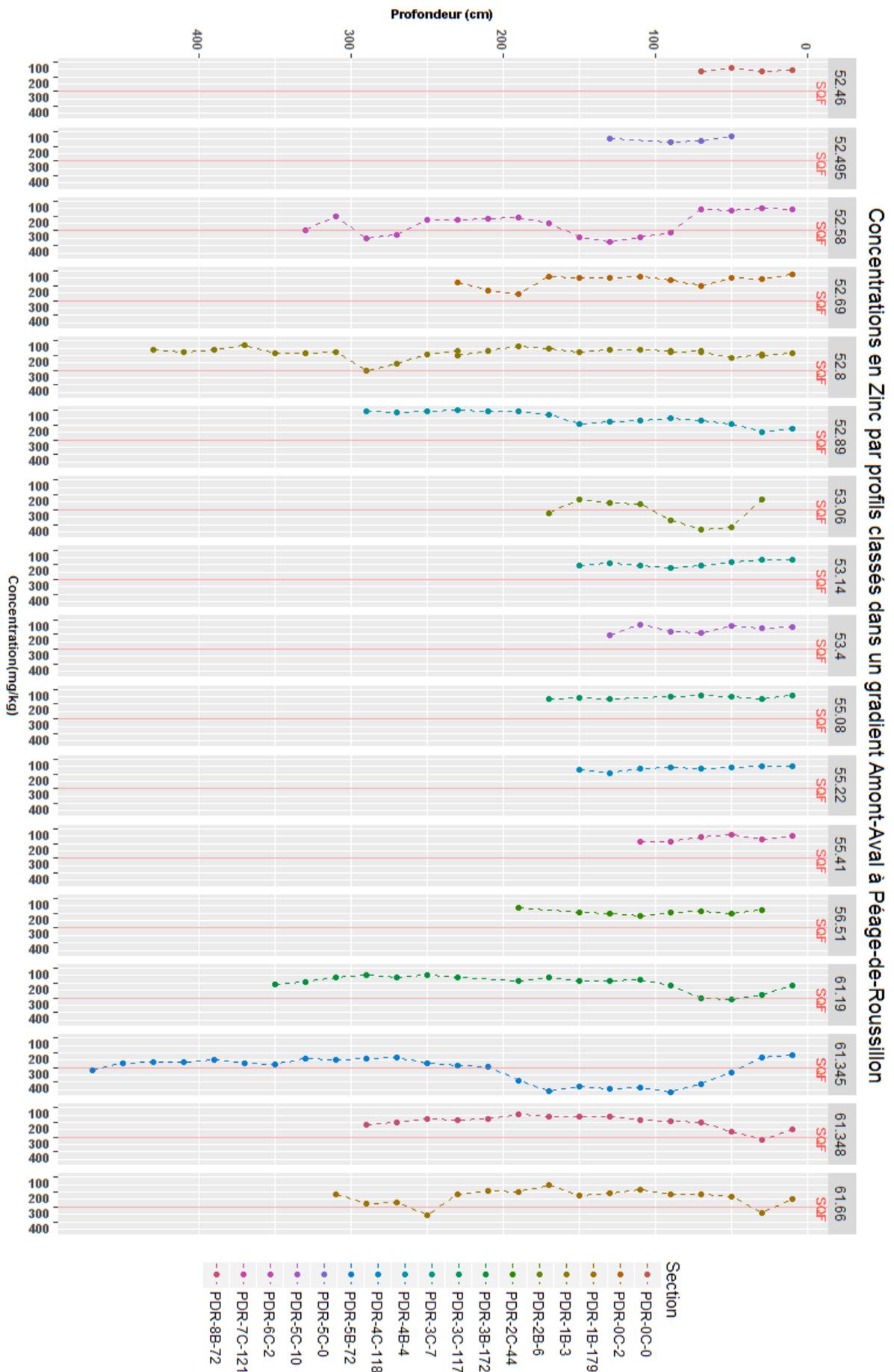


Figure 39. Concentrations en Zinc (mg/kg) à Péage-de-Roussillon, selon la profondeur de prélèvement

Les teneurs dépassant les seuils S1 correspondent à des prélèvements situés entre 40 et 200 cm de profondeur. Cela sous-entend des sédiments déposés relativement récemment au vu des taux de sédimentation présentés en partie 4.2.2.

Le travail d'interprétation de la dynamique des dépôts et de leur chronologie est en cours. Il s'appuie sur la comparaison des profils de concentration en métaux en lien avec les données GPR et l'analyse planimétrique sous SIG des phases d'atterrissement (Figure 40) et des fréquences de submersion.

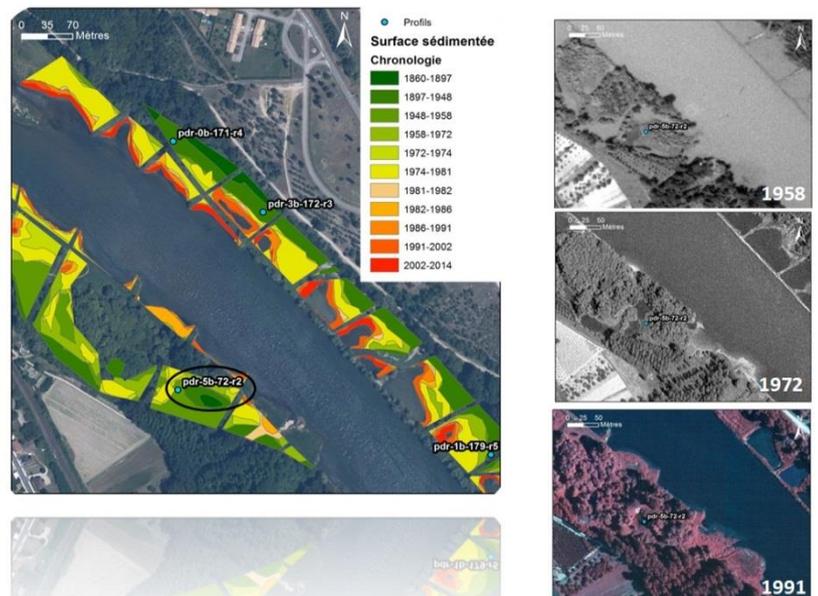


Figure 40. Exemple SIG de datation des dépôts sédimentaires

Les observations faites sur les casiers confirment les interprétations faites sur les dépôts observés en plaine alluviale. Les sédiments des surfaces atterries après la mise en RCC n'ont *a priori* pas ou peu de métaux alors que les sédiments des surfaces sédimentées antérieurement à la mise en RCC présentent des teneurs en métaux pouvant dépasser les seuils de contamination. Ces dépassements se situent généralement plusieurs dizaines de centimètres sous la surface, montrant que la sédimentation a continué après, étant alors marquée par des teneurs métalliques moins élevées. Comme le montre la Figure 40, les deux phases d'atterrissement sont bien identifiées au niveau des casiers et il convient maintenant de les lier avec les profils des concentrations en métaux et d'identifier les processus qui régissent cette dynamique de sédimentation et la répartition spatiale des dépôts potentiellement pollués. Une première analyse est proposée dans le rapport N°2 (inter-sites).

5. Risques associés

5.1. Transferts de contaminants aux plantes

Le transfert des métaux lourds à la végétation constitue un sujet de recherche important. La question de la tolérance des espèces conduit aux notions de bioaccumulation, bio-stabilisation et ouvre le champ de la bio-indication de milieux potentiellement contaminés. Afin de savoir si les communautés de la ripisylve rhodanienne sont potentiellement des bio-indicateurs et renseignent l'état de leurs milieux, différentes approches ont été mises en place.

Nous rappelons que deux groupes de trois casiers ont été sélectionnés à partir des résultats d'un échantillonnage préalable. Le premier groupe comprend les casiers caractérisés par les plus fortes teneurs en métaux d'un train de casiers et le second les moins fortes. Nous rappelons que les trois essences ligneuses prélevées sont : *Salix alba* et *Populus nigra* (espèces emblématiques) et *Acer negundo* (invasive) et que ces prélèvements correspondent soit à des pools foliaires (monospécifiques pour *Acer negundo* ou plurispécifiques), soit à des carottes dendrologiques de chacune des essences.

5.1.1. Premiers résultats sur les sédiments de surface des casiers d'Arcoules

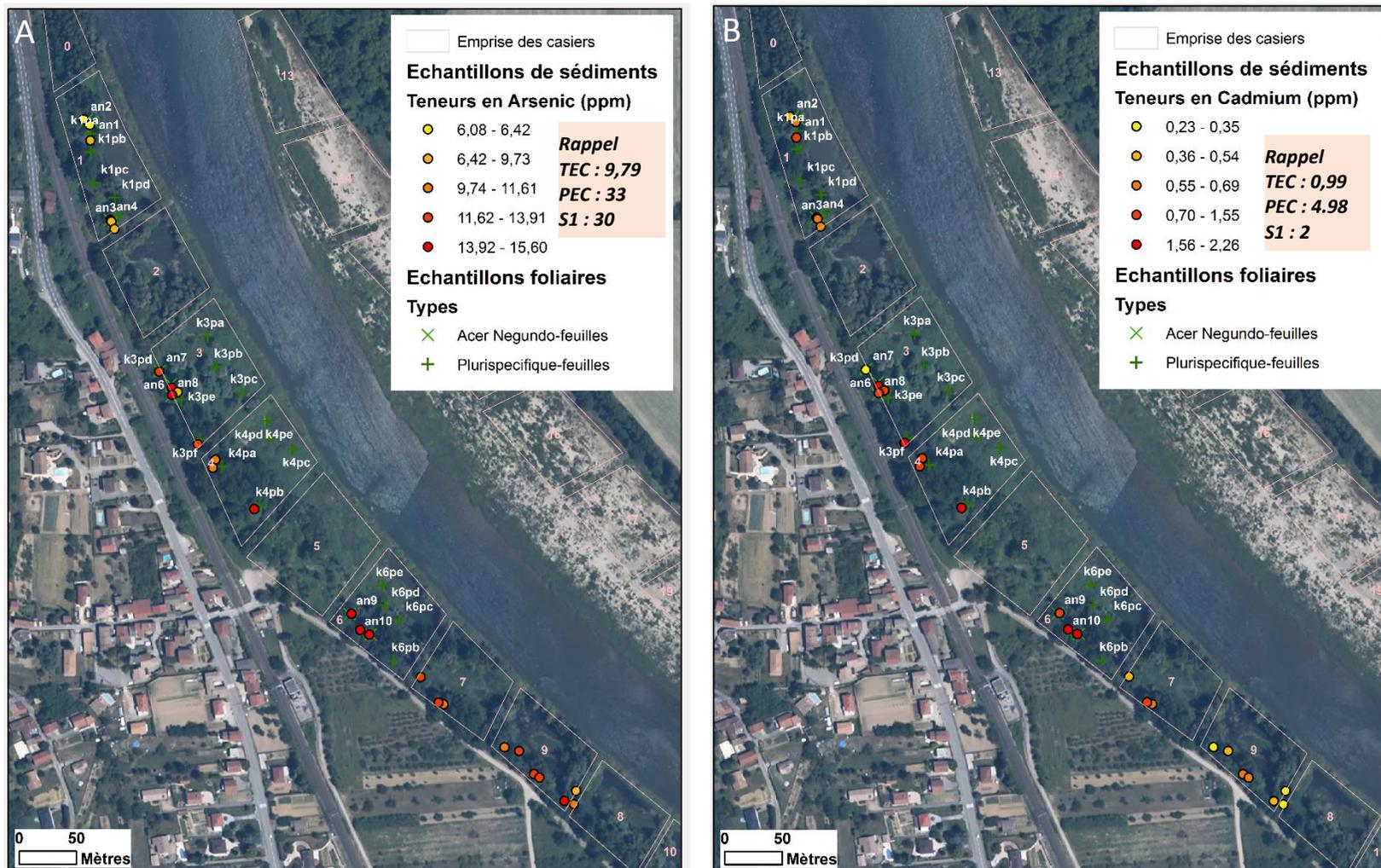


Figure 41. Concentrations des sédiments de surfaces en Arsenic (A) et Cadmium (B) par ICP-MS. Sources - photographies : IGN, données de chimie : Laboratoire SPIN, Ecole des Mines de St-Etienne - Prélèvements de surface Août 2016 – Analyses sur la fraction < 63 µm

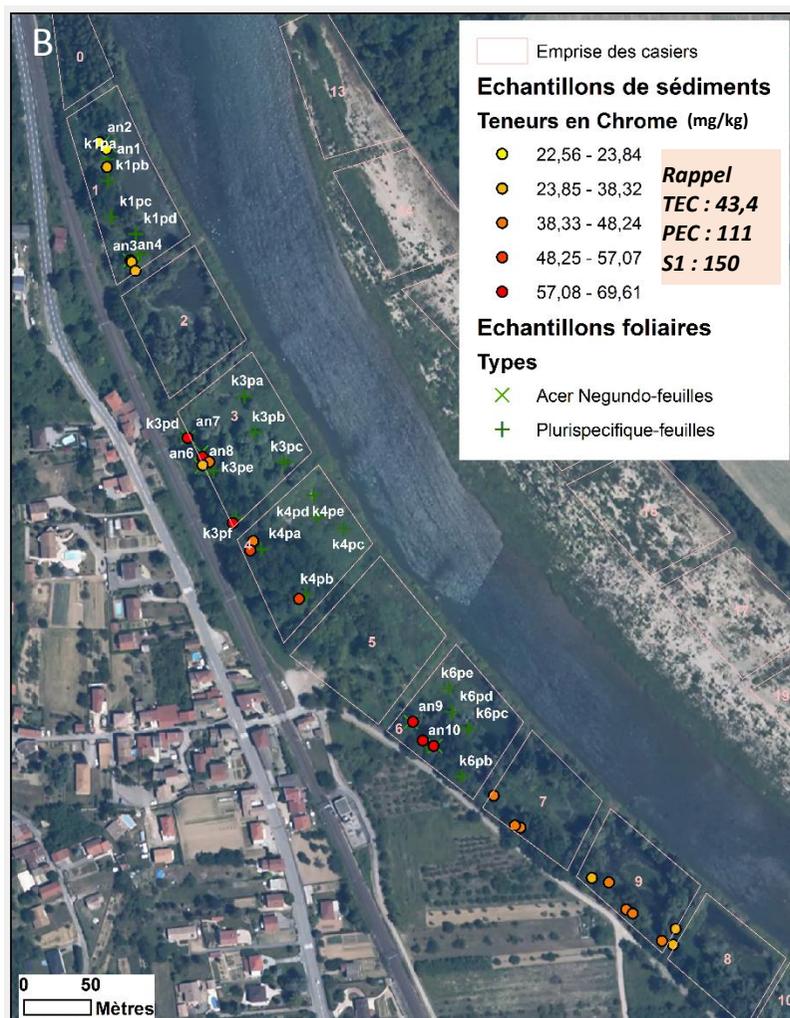
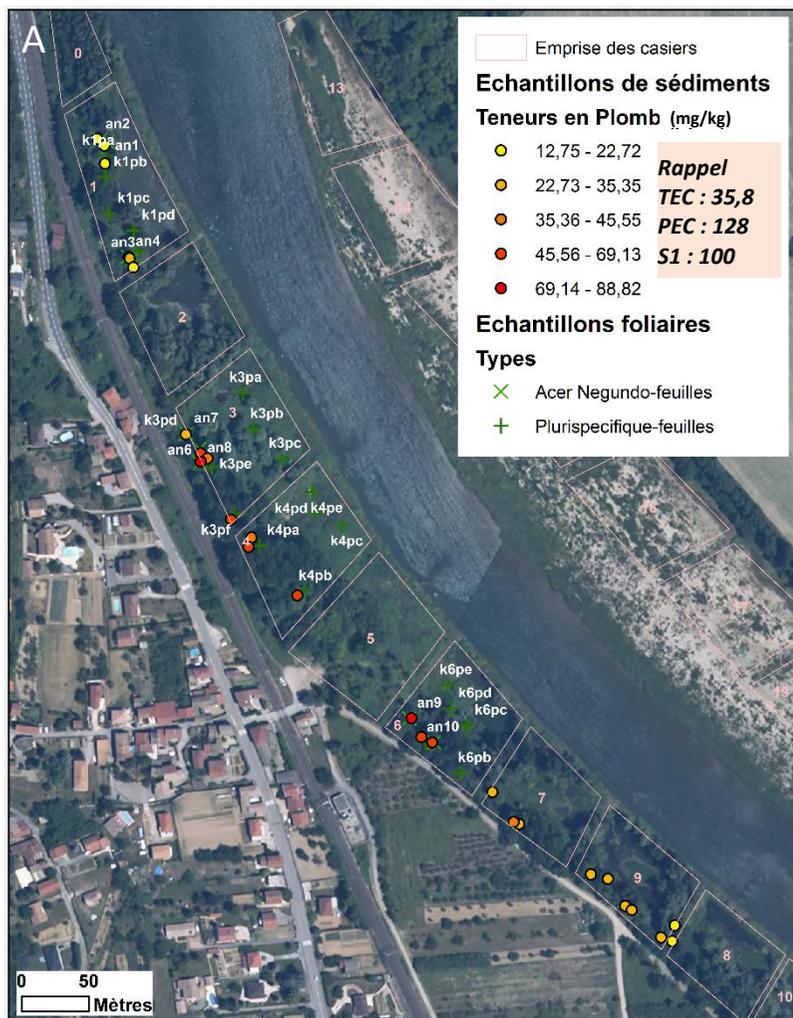


Figure 42. Concentrations des sédiments de surfaces en Plomb (A) et Chrome (B) par ICP-MS. Sources - photographies : IGN, données de chimie : Laboratoire SPIN, Ecole des Mines de St-Etienne - Prélèvements de surface Août 2016 – Analyses sur la fraction <math>< 63 \mu\text{m}</math>

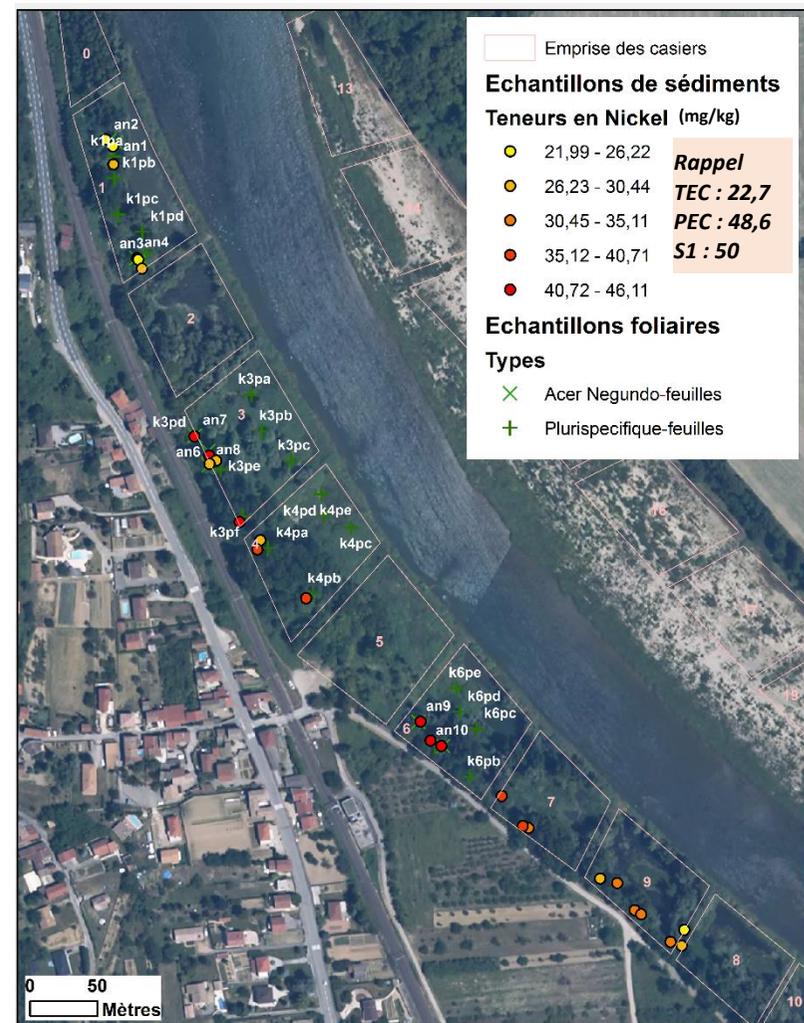
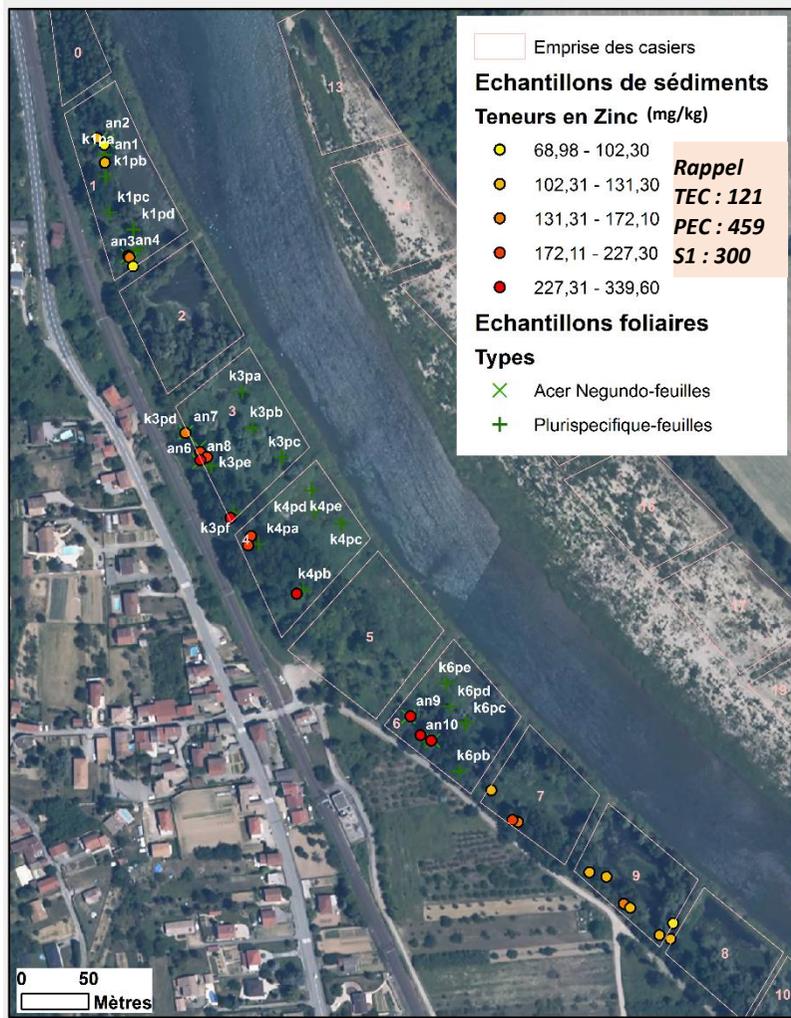
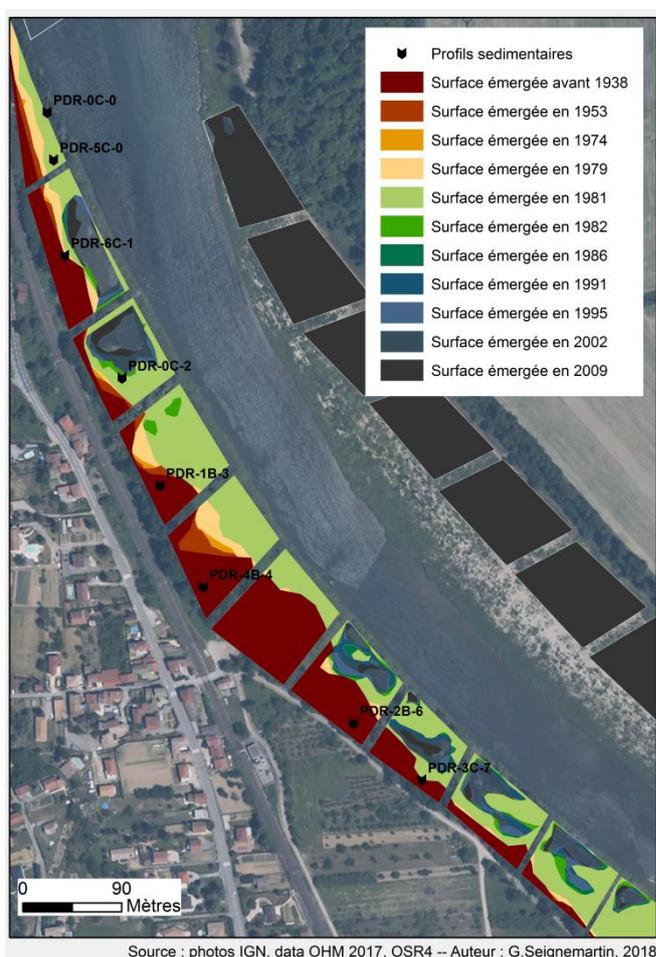


Figure 43. Concentrations des sédiments de surfaces en Plomb (A) et Chrome (B) par ICP-MS. Sources - photographies : IGN, données de chimie : Laboratoire SPIN, Ecole des Mines de St-Etienne - Prélèvements de surface Août 2016 – Analyses sur la fraction < 63 µm

Dans les casiers d'Arcoules, les teneurs en Arsenic, Chrome, Nickel et Plomb ne dépassent jamais les seuils PEC et S1 (Figure 41, 42 et 43). Les teneurs en Cadmium et en Zinc ne dépassent pas le PEC. Les teneurs en Arsenic dépassent le TEC sur les casiers 3, 4, 6, 7 et 9, celles du Plomb et du Chrome sur les casiers 3, 4, 6. Celles du Cadmium dépassent le TEC et/ou le S1 sur les casiers 1, 3, 4 et 6. Les concentrations en Zinc dépassent le TEC et/ou le S1 sur les casiers 3, 4, 6. Concernant le Nickel, les teneurs dépassent le TEC sur les casiers 3, 4, 6, 7.

Les casiers 3, 4, 6 sont marqués par des teneurs relativement élevées en Arsenic, Cadmium, Plomb, Chrome, Zinc, Nickel dans les sédiments de surface. Les casiers 7 et 9 sont aussi caractérisés par des teneurs relativement élevées en Arsenic. Les teneurs en Nickel dépassent aussi le TEC sur le casier 7.

5.1.2. Premiers résultats sur les profils sédimentaires des casiers d'Arcoules



Les profils sédimentaires sur ce train de casiers (Figure 44) proviennent de Sed 4 (tableau 5, section 3.6). Ils rendent compte des teneurs en métaux de sédiments prélevés en surface et en profondeur jusqu'au toit de galet. Certains sont localisés sur des dépôts post-dérivation (en vert) tandis que d'autres se situent sur des dépôts plus anciens (en rouge foncé). Les profils des casiers 1 et 6 présentent les sédiments les plus chargés en Zinc et en Plomb (Figure 45). On trouve des anomalies chimiques en Nickel dans les casiers 1, 2, 3, 4, 6 (outliers) et 7 (seuils dépassés plusieurs fois). Il n'y a pas de dépassement des seuils en ce qui concerne le Cuivre.

Figure 44. Localisation des profils sédimentaires prélevés à la tarière pédologique et analysés au XRF portatif, en fonction de l'année d'exondation des surfaces

5.1.3. Premiers résultats sur les pools foliaires

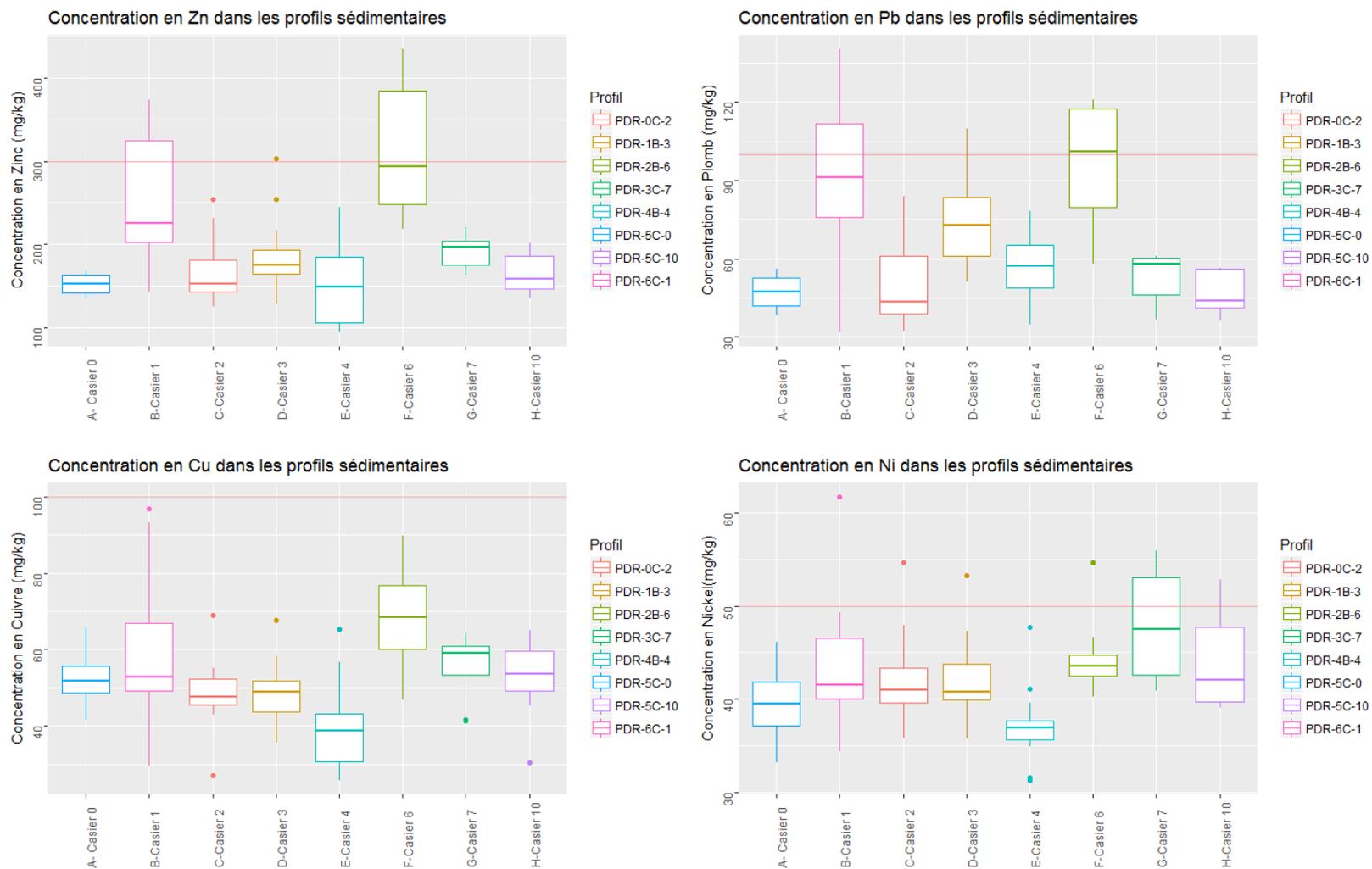
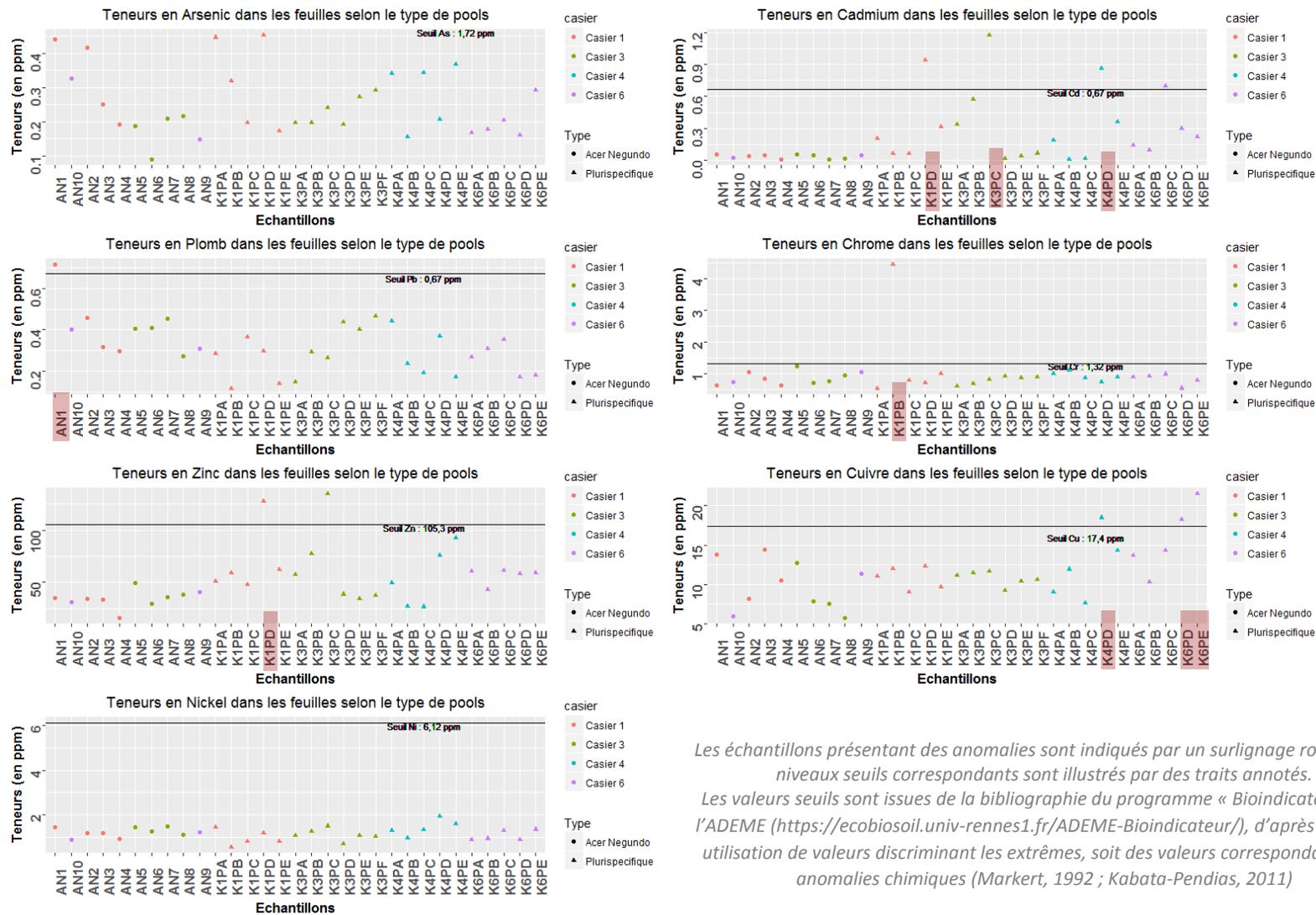


Figure 46. Concentrations en métaux dans les profils sédimentaires



Les échantillons présentant des anomalies sont indiqués par un surlignage rouge et les niveaux seuils correspondants sont illustrés par des traits annotés. Les valeurs seuils sont issues de la bibliographie du programme « Bioindicateurs » de l'ADEME (<https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/>), d'après O. Faure, utilisation de valeurs discriminant les extrêmes, soit des valeurs correspondant à des anomalies chimiques (Markert, 1992 ; Kabata-Pendias, 2011)

Figure 47. Concentrations foliaires en métaux

Les graphiques de la Figure 46 présentent les teneurs en métaux des pools foliaires provenant de différents casiers. En abscisse, la mention « AN » désigne des pools foliaires mono-spécifiques d'*Acer Negundo*. La mention « P » désigne des pools foliaires plurispécifiques. Pour des raisons logistiques, nous rappelons que seuls les casiers 1, 3, 4 et 6 ont été échantillonnés.

Les analyses montrent qu'il n'y a pas d'anomalie chimique en Arsenic dans les échantillons, quel que soit le casier ou le type de pool. Quatre échantillons plurispécifiques présentent des anomalies chimiques en Cadmium dans chacun des quatre casiers échantillonnés. Dans le casier 1, un échantillon plurispécifique dépasse fortement la valeur seuil en Plomb et un autre échantillon la dépasse pour le Chrome. Deux échantillons plurispécifiques dépassent fortement la valeur seuil en Zinc dans les casiers 1 et 3, et trois autres échantillons dans les casiers 4 et 6. Les premiers résultats montrent des anomalies chimiques au niveau foliaire. C'est le cas d'un site dans le casier 1 pour lequel les végétaux enregistrent des anomalies en Plomb, Chrome, Cadmium et Zinc (Figure 42).

5.1.4. Liens entre les résultats des sédiments de surface, des profils et des pools foliaires

Les casiers 3, 4 et 6, où les échantillons de surface sont caractérisés par des teneurs en contaminants les plus élevées, ne sont pas particulièrement associés à une végétation riveraine plus chargée en contaminants au niveau foliaire. Il est néanmoins important de considérer ces résultats comme exploratoires. En effet, le sédiment de surface n'a été prélevé que de manière locale et ne traduit pas les teneurs de toute la masse sédimentaire du casier.

En revanche, les échantillons de sédiments provenant des profils sédimentaires montrent diverses anomalies (notamment Zinc et Plomb) dans les casiers 1 et 6, illustrant une hétérogénéité des teneurs en contaminants dans la masse sédimentaire.

Les végétaux, selon leurs caractéristiques physiques et métaboliques (capacité d'absorption, volume du sol exploré par la plante) ne puissent pas les mêmes ressources (sélectivité) aux mêmes profondeurs (phénomène dépendant aussi des caractéristiques physico-chimiques du sol). De plus, les éléments doivent être sous forme « bio-disponible » pour pouvoir potentiellement être absorbés par la plante. Les conditions du milieu, comme le potentiel redox ou le pH par exemple, influencent cette biodisponibilité⁵. L'analyse élémentaire par ICP-MS fournit un bilan total sans tenir compte de la forme (par exemple, une forme adsorbée par un colloïde ne sera pas forcément disponible pour la plante).

Une analyse plus exhaustive de la répartition verticale des contaminants dans le sédiment semble nécessaire afin de mieux comprendre ces résultats.

Aussi, les feuilles sont des organes végétaux temporaires. Leur composition chimique reflète des teneurs et des conditions de prélèvement dans le sol correspondant à un *instant t*, c'est pourquoi la suite de l'étude du transfert chimique aux plantes se focalise sur des carottes dendrologiques afin de mieux cerner l'aspect temporel des contaminations.

⁵ Tyler, G., Pahlsson, A. M., Bengtsson, G., Baath, E. and Tranvik, L. (1989) Heavy metal ecology and terrestrial plants, micro-organisms and invertebrates: a review. *Water, Air and Soil Pollution* 47, 189-215.

5.1.5. Premiers résultats sur les carottes dendrologiques

Les localisations des carottes dendrologiques dépendent des espèces en présence dans les casiers (Figure 47). Au final, les arbres d'intérêt étaient principalement situés sur des dépôts déjà émergés avant 1938 (en rouge) ou après la dérivation (en vert).

Vingt des principaux éléments métalliques détectés dans les carottes sont présentés sur la Figure 48. Ces graphes sont réalisés en tenant compte des variables suivantes :

- la date de terrestrialisation (« dépôt ») de la surface sur laquelle l'arbre est implanté. Les fenêtres de contamination observées lors d'autres études (BRGM, 2013-RC60367) correspondent aux années 1980. Ainsi, nous tentons de capter cette temporalité.
- l'essence, pour les raisons métaboliques et physiologiques exposées précédemment.
- le casier, expression d'un patron sédimentaire associé à une histoire hydro-morphodynamique.

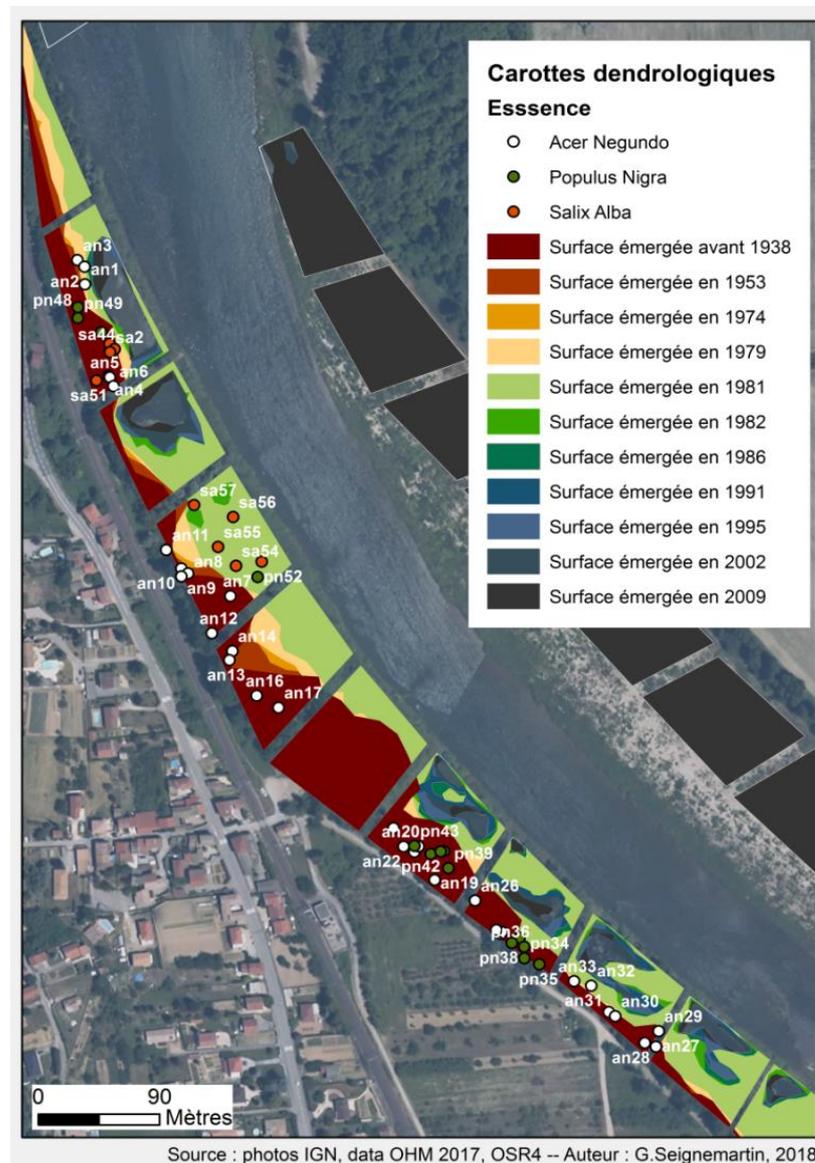


Figure 48. Localisation des carottes dendrologiques

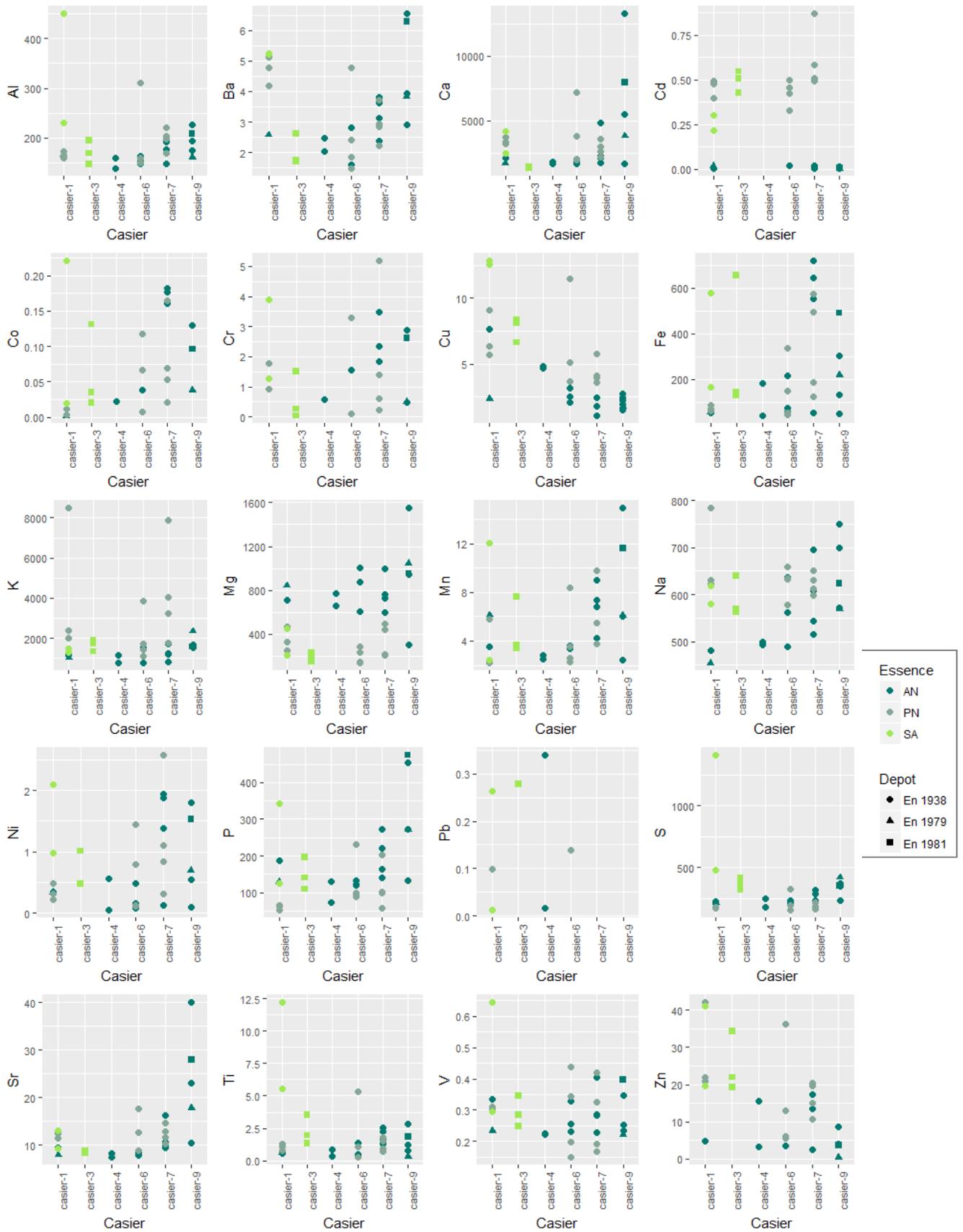


Figure 49. Concentrations (en mg/kg) de 20 principaux éléments détectés à l'ICP-MS dans les 30 carottes dendrologiques, selon l'essence, le casier et la date de terrestrialisation des surfaces. *Laboratoire SPIN, Ecole des Mines de St-Etienne, UMR5600*

On observe une grande variabilité intra-casier, inter- et intra-spécifique (Figure 47). Par exemple, en ce qui concerne le Chrome et le Nickel, il y a une grande variabilité dans le casier 7, que l'essence soit *Populus Nigra* ou *Acer Negundo*. Au contraire, les niveaux de Cadmium sont similaires dans l'ensemble des carottes, quelles que soient les caractéristiques de l'échantillon. La variable « dépôt » ne montre pas de tendance particulière. Il est en effet difficile de décrire des tendances car la variabilité est grande et il n'y a pas d'effet discriminant évident. Pour approfondir ces observations, nous avons réalisé une Analyse en composantes principales.

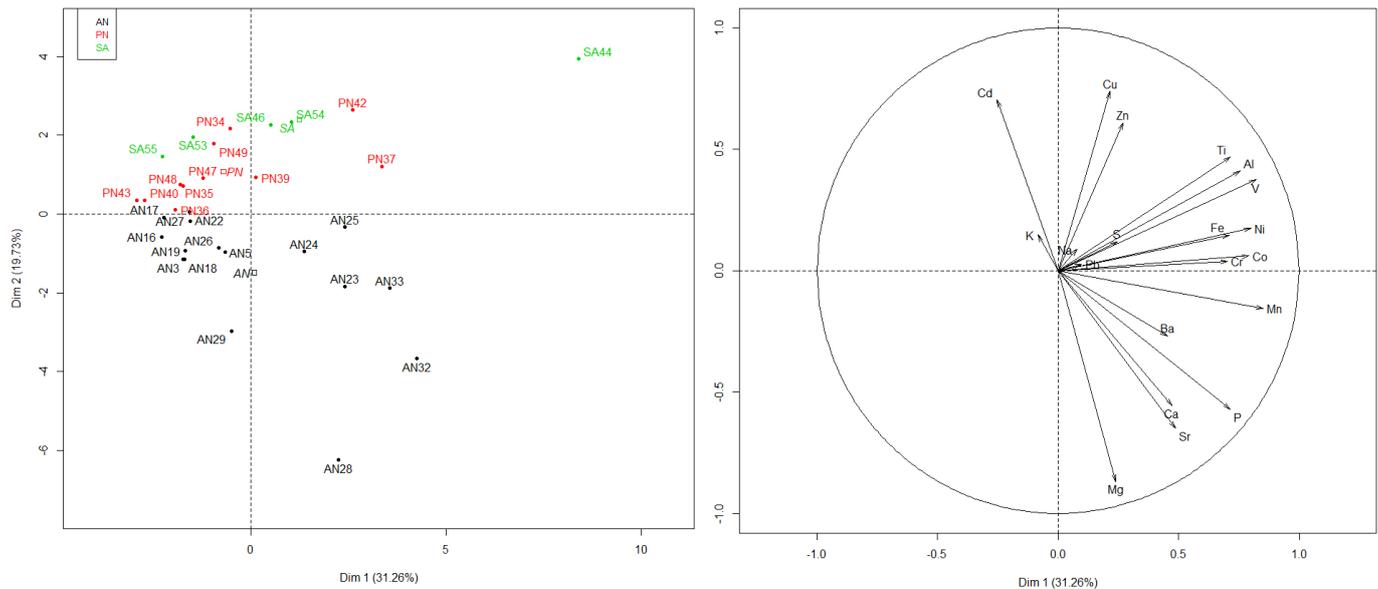


Figure 50. ACP réalisée à partir des teneurs des 20 principaux métaux détectés à l'ICP-MS dans les 30 carottes dendrologiques. AN = *Acer negundo*, PN = *Populus nigra*, SA = *Salix alba*

L'ACP (Figure 49), dont les deux premières composantes portent presque 50 % de la variabilité, montre que l'essence semble être un paramètre important à prendre en compte dans l'interprétation de la variabilité des teneurs.

L'ANOVA est un test statistique qui permet de comparer la variance des groupes afin de tester une relation entre chaque élément métallique et les variables explicatives potentielles (tableau 9). L'hypothèse nulle (H0) postule qu'il n'y a pas de différence entre les moyennes des groupes, autrement dit que les concentrations en métaux ne sont pas affectées par les variables explicatives. La seconde hypothèse (H1) postule qu'il existe une différence entre les moyennes des groupes, et donc que les concentrations en élément métalliques sont affectées par les variables explicatives.

Tableau 9. ANOVA sur les données ICP-MS, comparant les teneurs en fonction des essences ou de l'âge de dépôts

	Test 1 ~effet du de l'âge du dépôt	Test 2 ~effet du casier	Test 3 ~effet de l'essence	Test 4 ~effet du casier*effet de l'essence
Elément	P-Value	P-Value	P-Value	P-Value
Al	0.7846	0.7448	0.09362	Casier : 0.5066811 Essence : 0.0007453 Casier*Essence : 0.814525
Ba	0.8817	0.0004717	0.9471	Casier : 0.001177 Essence : 0.578534 Casier*Essence : 0.646124
Ca	0.9429	0.02462	0.5671	Casier : 0.03793 Essence : 0.52548 Casier*Essence : 0.70981
Cd	0.2564	0.1146	2.678e-10	Casier : 6.609e-06 Essence : 1.528e-09 Casier*Essence : 0.1291
Co	0.4387	0.5333	0.5184	Casier : 0.4487 Essence : 0.1629 Casier*Essence : 0.3033
Cr	0.4491	0.687	0.8749	Casier : 0.7432 Essence : 0.6771 Casier*Essence : 0.7167
Cu	0.3623	0.006927	5.916e-06	Casier : 8.916e-05 Essence : 5.049e-05 Casier*Essence : 0.2589
Fe	0.4711	0.09307	0.5293	Casier : 0.09389 Essence : 0.18771 Casier*Essence : 0.64477
K	0.8102	0.7125	0.004035	Casier : 0.54847 Essence : 0.00735 Casier*Essence : 0.35488
Mg	0.1762	0.03	1.964e-07	Casier : 0.0019578 Essence : 0.0002166 Casier*Essence : 0.6533671
Mn	0.6946	0.1686	0.5943	Casier : 0.2068 Essence : 0.4738 Casier*Essence : 0.7608
Na	0.2323	0.3736	0.08139	Casier : 0.18108 Essence : 0.01570 Casier*Essence : 0.05022
Ni	0.8382	0.2308	0.7597	Casier : 0.2115 Essence : 0.1078 Casier*Essence : 0.7558
P	0.3921	0.01049	0.04123	Casier : 0.00689 Essence : 0.06392 Casier*Essence : 0.49680
Pb	0.396	0.8763	0.891	Casier : 0.9216 Essence : 0.8892 Casier*Essence : NA
S	0.7913	0.5258	0.0008389	Casier : 0.1316 Essence : 2.154e-05 Casier*Essence : 0.9229
Sr	0.9694	0.0005381	0.4624	Casier : 0.001474 Essence : 0.559498 Casier*Essence : 0.834785
Ti	0.6733	0.6374	0.002185	Casier : 0,1753 Essence : 8.898e-06 Casier*Essence : 0.5597
V	0.5624	0.6858	0.2262	Casier : 0.6731 Essence : 0.1252 Casier*Essence : 0.9100
Zn	0.36	0.04608	0.0009011	Casier : 0.03336 Essence : 0.09989 Casier*Essence : 0.40148

Ces tests sont à considérer en tenant compte du fait que l'échantillon est petit (n=30) et que le plan d'échantillonnage n'est pas équilibré car les essences ne sont pas présentes dans chaque casier avec la même fréquence. Nous avons aussi inclus les éléments métalliques qui n'étaient pas des contaminants potentiels (oligo-éléments, majeurs, etc...) afin de mieux comprendre l'expression de la variabilité spatiale.

Les résultats soulignent cependant qu'il n'y a pas d'effet observé de l'âge du dépôt sur les concentrations en éléments métalliques. En revanche, l'identité du casier semble influencer les concentrations en Baryum, Calcium, Cuivre, Magnésium, Phosphore, Strontium et Zinc. L'essence de l'arbre est également une variable qui semble influencer sur les concentrations en Cadmium, Cuivre, Potassium, Magnésium, Soufre, Titane et Zinc et éventuellement en Aluminium.

Pour le Sodium (oligo-élément), l'interaction « casier*essence » présente une p-value de 0,05. Ainsi, cette interaction semble significative : les concentrations en Na diffèrent selon l'essence et aussi selon le casier d'appartenance de l'individu. Ce résultat pourrait traduire une variabilité spatiale : suivant le contexte stationnel, une même espèce n'aura pas la même tendance à stocker le Sodium. En effet, la Figure 48 révèle une forte hétérogénéité notamment en ce qui concerne *Acer negundo*. Pour les autres métaux, les interactions ne sont pas significatives.

5.1.6. Discussion et perspectives

Dans les matrices végétales, certaines anomalies chimiques présentent des valeurs significativement supérieures aux teneurs de référence pour des pools foliaires provenant de zones naturelles (Figure 46). Toutefois, tout comme pour les concentrations métalliques des sédiments, celles-ci ne sont pas extrêmes et le milieu ne semble que très localement contaminé. L'étude de ces éléments mérite tout de même d'être approfondie au regard du contexte stationnel.

Pour la partie dendrologique, l'aspect temporel a été approché par la variable « âge des dépôts sédimentaires ». Toutefois, celle-ci n'a pas montré de résultat significatif dans l'explication des patrons chimiques végétaux. Ceci n'est pas forcément étonnant, cette variable manque de modalités pour permettre de capter une variabilité à l'échelle du casier. L'âge du dépôt indique le début de la sédimentation, mais ne renseigne pas sur sa dynamique temporelle. De plus, la chronologie des dépôts d'une part, et des flux de polluants d'autre part, sont des phénomènes croisés dans certains trains de casiers, mais leur caractérisation est complexe et dépend des conditions stationnelles (sous-unités morphodynamiques internes au casier).

Le fait que les contaminations puissent être enregistrées par la végétation sous-entend que les matrices sédimentaires soient contaminées. Les analyses chimiques sédimentaires réalisées au préalable afin de cadrer le plan d'échantillonnage végétal présentaient des échantillons contrastés selon les casiers et selon la profondeur de prélèvement. Au vu de la complexité des patrons sédimentaires, le plan d'échantillonnage choisi n'aura pas été suffisant pour capter la variabilité intra-casier. C'est pour cette raison que d'autres échantillons de sédiments en surface ont été prélevés en même temps que l'échantillonnage foliaire. Les concentrations de ces sédiments expriment une variabilité spatiale de surface, avec des casiers centraux dans le train (casiers 3, 4, 6) plus chargés en contaminants. Ces casiers présentaient néanmoins des conditions particulières pouvant influencer les résultats observés : ils sont placés en pleine concavité et leurs surfaces émergées « pré-dérivation »

sont plus importantes (en rouge sur la Figure 42). Ainsi, l'échantillonnage sédimentaire de surface n'aura pas non plus suffi à renseigner ces tendances spatiales afin de caractériser le transfert aux végétaux. En effet, le sédiment de surface représente seulement les 20 premiers centimètres et les zones d'échanges racinaires peuvent atteindre plusieurs mètres pour les arbres les plus anciens.

Une autre approche a donc été développée afin de capter cette variabilité spatio-temporelle. Grâce aux méthodes dendrochronologiques de datation relative, une classification par fenêtres temporelles a été effectuée sur des coupes d'arbres. Nous avons confectionné des échantillons dendrologiques non plus à l'échelle de l'individu (comme pour les carottes) mais correspondant à des périodes de temps définies.

A ce jour, l'approche par fenêtres temporelles semble la plus pertinente pour tenter de comprendre la variabilité temporelle sans qu'elle soit noyée par la variabilité spatiale. La phase d'analyse des concentrations en fonctions des fenêtres temporelles constitue une des perspectives principales de cette approche exploratoire. Les résultats obtenus tout récemment devront être confrontés aux analyses sur matrice sédimentaire - dont l'analyse sera plus détaillée sur le plan chronologique - afin de répondre aux questionnements impliquant le transfert de contaminants des sédiments vers la végétation.

Ainsi, l'étude de la chimie des arbres doit être poursuivie dans le but de mieux appréhender les mécanismes d'accumulation en ETM des essences rivulaires, ce qui permettra dans un second temps de juger de la capacité des individus à jouer un rôle de bioindicateur de leur milieu.

5.2. Evaluation des effets hydrauliques de la sédimentation des marges

Nous avons réalisé pour le Vieux Rhône deux versions du modèle, la première avec la géométrie de 2015, et la seconde avec la géométrie de 1897. Il faut noter que seul le bief du Vieux Rhône a fait l'objet du changement de géométrie. Tous les autres biefs restent dans les conditions de 2015. Il ne s'agit donc pas de simuler la situation hydraulique de 1897, mais la situation actuelle (avec aménagement en dérivation) dans l'hypothèse où le Vieux Rhône retrouverait son gabarit de 1897.

Le profil en long du Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon avec les géométries de 1897 et de 2015 est représenté sur la Figure 48. Le barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf se situe en amont du bief au PK 50920 et le seuil Peyraud se situe au PK 60000 ; ces deux ouvrages ont été conservés dans les deux modèles. Le barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf répartit les débits entre le Vieux Rhône et le canal de production conduisant à l'usine de Sablons. Pour un débit inférieur à 1685 m³/s dans le Rhône total en amont de l'aménagement, le débit réservé du Vieux Rhône est de 85 m³/s, le reste passant dans le canal de production. Pour un débit supérieur à 1685 m³/s, 1600 m³/s vont dans le canal de production (débit d'équipement) et le reste passe dans le Vieux Rhône. Le débit de régime de base du Vieux Rhône est donc de 85 m³/s.

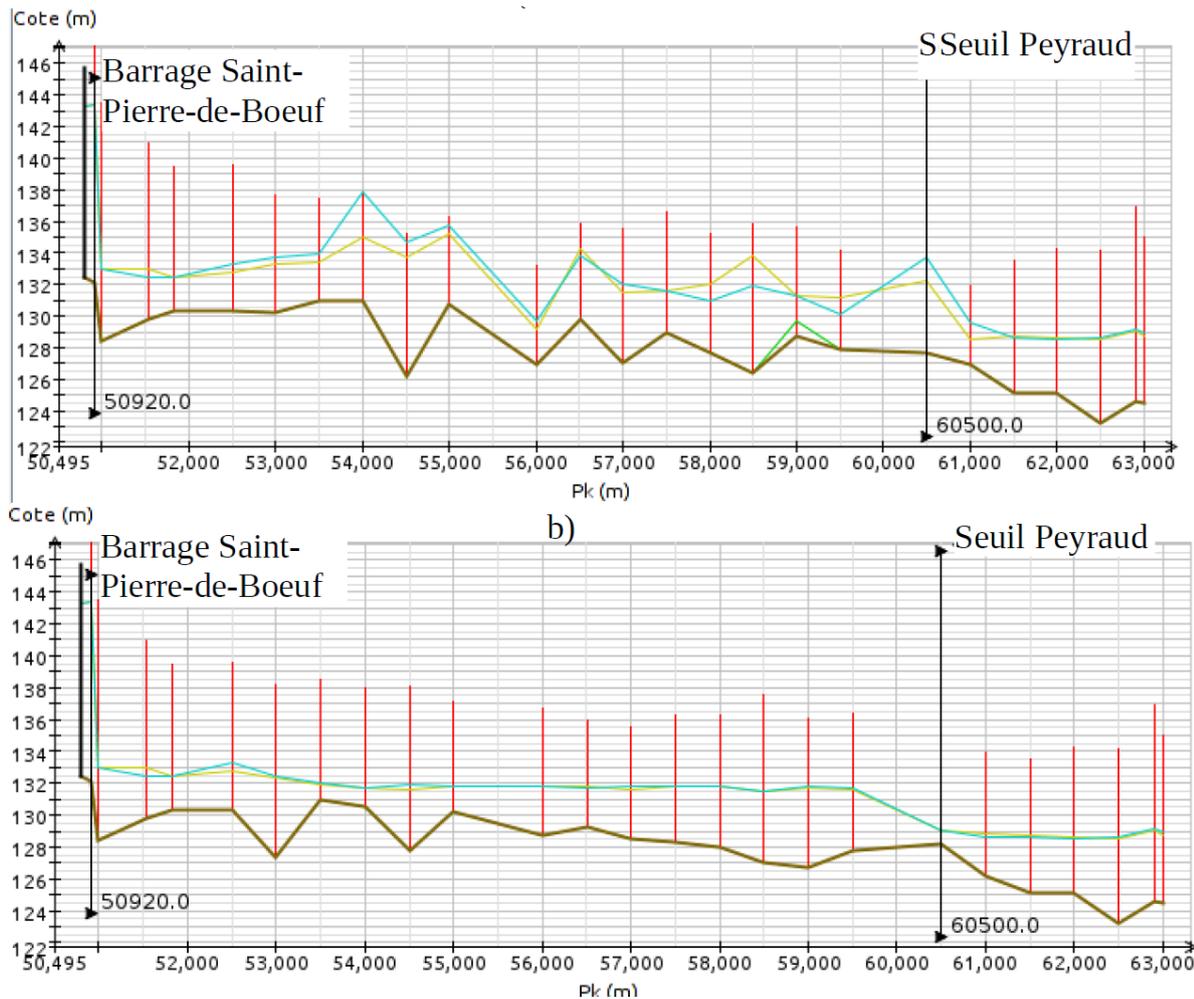


Figure 51. Profil en long du bief du Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon a) en 1897 et b) en 2015
 En marron : 85 m³/s, en jaune : 1400 m³/s, en vert : 2400 m³/s

Le calage des coefficients de Strickler (rugosité du lit) et la validation du modèle de 2015 sur le secteur de Péage-de-Roussillon ont été réalisés dans le cadre de l'OSR3 à partir de lignes d'eau mesurées pour des débits jusqu'à 3700 m³/s dans le Rhône total, soit un débit de 2100 m³/s dans le Vieux Rhône. Les coefficients de Strickler ont été conservés pour la modélisation de 1897. Trois débits ont été simulés avec les deux géométries. Ils correspondent au module interannuel et aux crues biennale et quinquennale. Les débits correspondants dans le Vieux Rhône sont respectivement de 85 m³/s, 1400 m³/s et 2400 m³/s. Il n'est pas possible de simuler des débits plus importants car le modèle n'est pas validé pour des valeurs supérieures et il ne simule pas les débordements latéraux.

Les résultats peuvent être exprimés en cotes (mNGF), en tirant d'eau (m) et en surcotes (m). Le tirant d'eau est calculé comme la différence entre la cote (niveau d'eau) et la cote du point le plus bas du lit (talweg). Sont appelées surcotes, les différences entre les cotes des crues biennale et quinquennales et les côtes du débit réservé. Cette représentation permet de s'affranchir des variations en dents de scie observées sur la représentation en tirant d'eau et qui sont principalement dues à la discrétisation spatiale des profils en travers (maillage à 100 m).

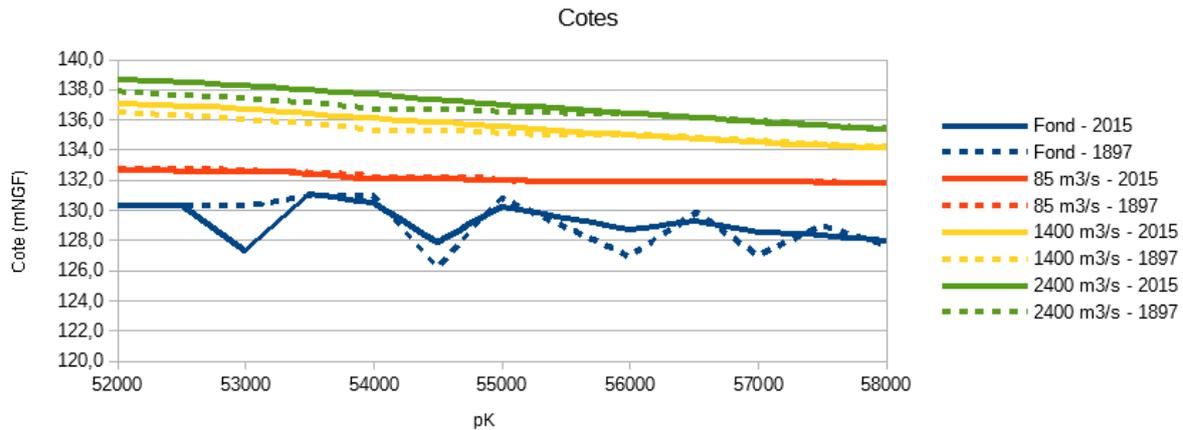


Figure 52. Niveau d'eau pour différents débits et altitude du fond du lit entre les PK 52 et 58 en 1897 et 2015

Les premiers résultats indiquent des tirants d'eau plus importants avec la géométrie de 2015 qu'avec celle de 1897 entre les PK 52000 et 56000, et des tirants d'eau similaires en aval (Figure 52). Cette augmentation était attendue à cause de la contraction de la section d'écoulement en 2015 liée aux aménagements Girardon construits entre les deux dates. Ces différences de tirants d'eau sont de l'ordre de 1 m pour 2400 m³/s. Il faut les relativiser compte-tenu des incertitudes sur les données d'entrée (précision de la carte de 1897, hypothèse de rugosité équivalente et donc de granulométrie) et du fait que le modèle n'intègre pas l'écoulement d'une partie du débit dans le bras de la Platière en rive gauche. L'absence de modification de la ligne d'eau en aval est sans doute liée à un contrôle aval du seuil Peyraud plus important que le changement de géométrie entre les deux dates. Le travail est en cours pour modéliser tout le bief de Péage-de-Roussillon avec la géométrie de 1897 et tester différentes rugosités.

6. Conclusion générale

Le site-pilote de Péage-de-Roussillon a permis de tester différentes approches méthodologiques pour caractériser la sédimentation de la plaine alluviale du Rhône. La démarche associe :

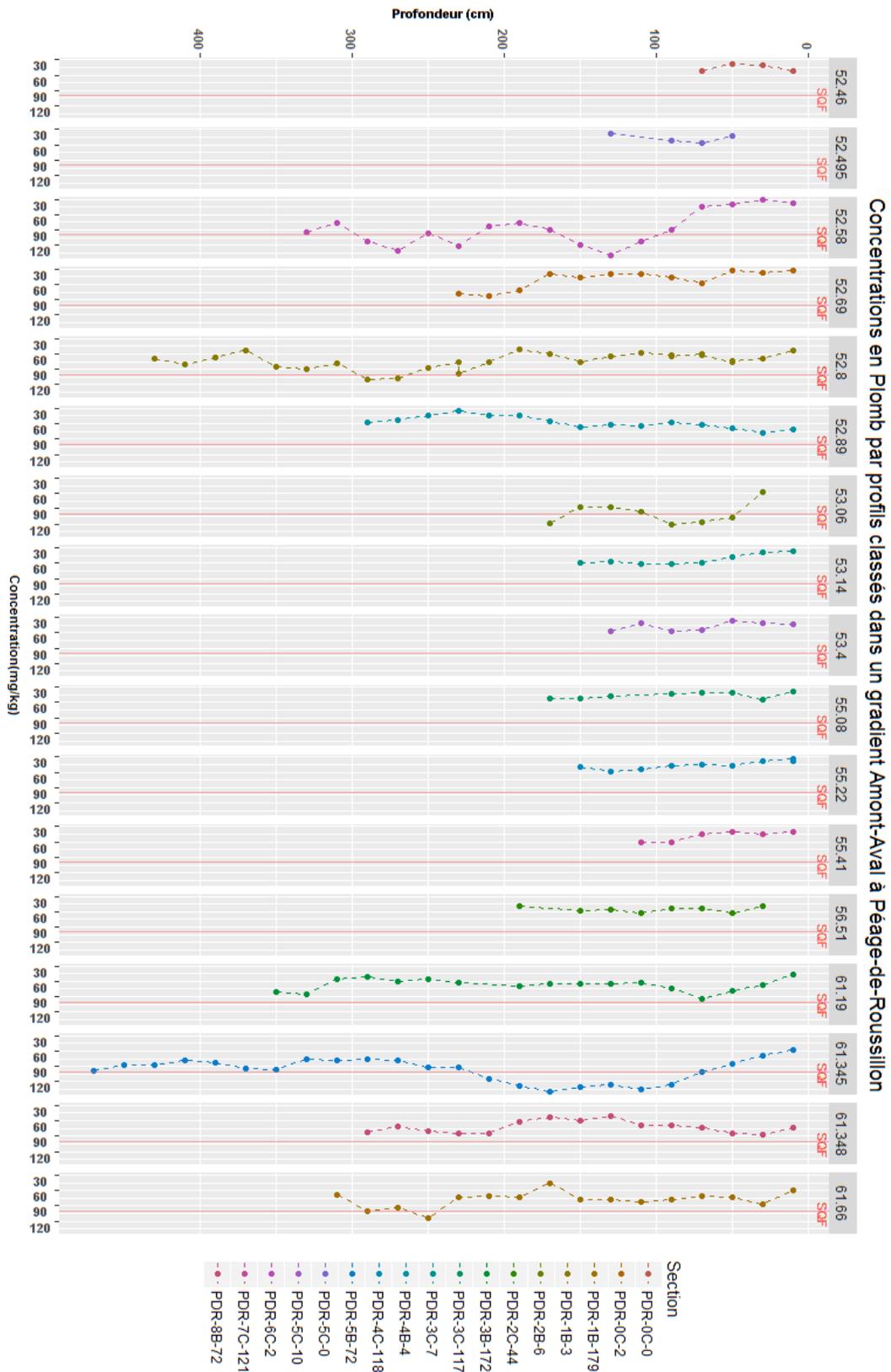
- une analyse planimétrique permettant de dater le début de sédimentation et de mieux comprendre la trajectoire temporelle de changement, en identifiant les périodes clés d'évolution, bien souvent en lien avec l'aménagement du fleuve.
- une caractérisation de la sédimentation s'appuyant sur des sondages à la perche, des profils GPR, des carottes sédimentaires et un travail de datation confrontant la chronologie des évolutions planimétriques (SIG) et des datations au C14.
- une évaluation de la contamination potentielle par les métaux et les PCB reposant sur des échantillons caractérisant à la fois la surface et la masse sédimentaire, à partir de mesures réalisées sur des profils verticaux.
- une évaluation des conséquences potentielles des ajustements fluviaux en termes de risques environnementaux (analyse exploratoire du transfert des contaminants au vivant et de l'effet potentiel de la sédimentation et des modifications de géométrie associées sur la ligne d'eau et le risque inondation).

La démarche s'intéresse à tous les compartiments fluviaux, et plus spécifiquement aux casiers car ceux-ci sont les premiers concernés par le schéma de ré-élargissement du lit.

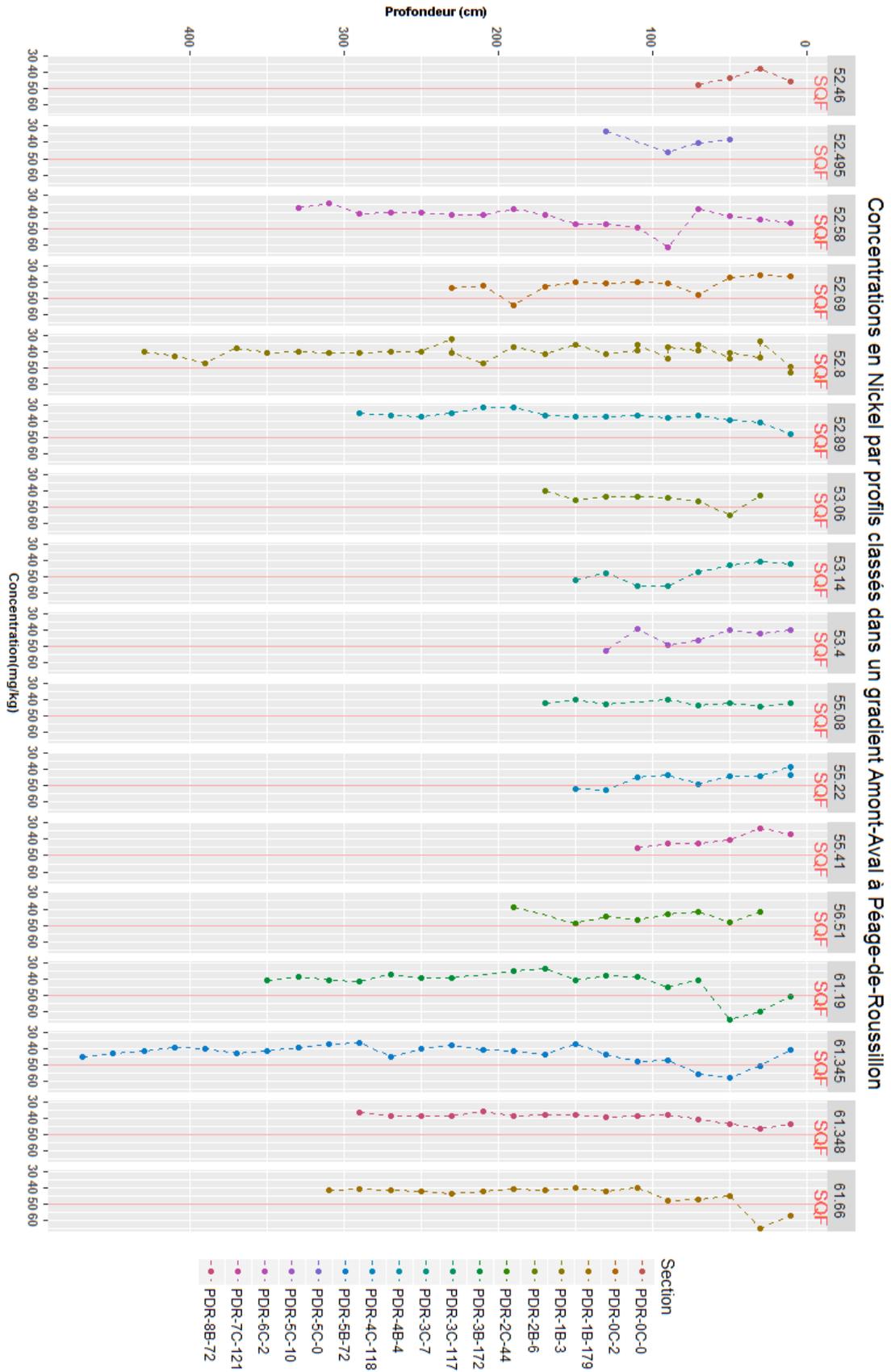
Les résultats sont à la fois méthodologiques et thématiques :

- l'approche planimétrique met clairement en évidence l'effet des deux phases d'aménagement (ouvrages Girardon puis mise en RCC) sur l'évolution du lit et les processus de sédimentation dans la plaine. Les dates disponibles pour l'analyse sont nombreuses au 20^{ème} siècle mais beaucoup plus rares au 19^{ème} siècle alors que de nombreuses surfaces s'atterrissent à cette période. Un travail exploratoire en archives est donc encore nécessaire pour mieux caractériser cette période en augmentant le nombre de sources cartographiques. Les sources photographiques du 20^{ème} siècle permettent de bien restituer la dynamique d'atterrissement dans les casiers, mais ce volet a nécessité un lourd travail de recalage des photographies afin de minimiser les erreurs de géoréférencement pour caractériser ces objets de petites tailles.
- les processus de sédimentation sont bien appréhendés à partir des différentes approches. Là encore, les effets des aménagements sont clairement soulignés avec une réduction de l'intensité et de la fréquence des débordements et de la taille des sédiments déposés. On constate que la sédimentation au 19^{ème} siècle était beaucoup plus sableuse et abondante. Une grande partie des surfaces du lit majeur sont inactives depuis plus d'un siècle. Les profils GPR réalisés dans les casiers soulignent une sédimentation complexe interstratifiée, combinant des dépôts sableux et graveleux. Le travail confirme que les casiers présentent des quantités importantes de graviers qui peuvent être sollicités pour des recharges éventuelles du chenal. La question est maintenant posée de savoir quelle est la taille de ces sédiments.
- la contamination par les métaux est observée sur les sédiments de surface des milieux les plus déconnectés (Cu, Pb, Ni, Zn). Le TEC est dépassé pour ces quatre éléments. La masse sédimentaire est en revanche peu chargée en métaux à l'exception de certains casiers qui ont beaucoup sédimenté à la suite de la mise en RCC. La planimétrie permet de localiser les secteurs à risques.
- l'analyse du transfert des contaminants aux plantes est encore à finaliser. En l'état, il est difficile de faire un lien entre contaminants dans le sol et dans les plantes compte-tenu des faibles teneurs enregistrées dans les casiers et de la très forte hétérogénéité de ces teneurs dans la masse sédimentaire. Certaines plantes enregistrent des teneurs en métaux qui peuvent dépasser certains seuils, mais il est difficile de généraliser ces réponses en lien avec la contamination alluviale.
- les premiers résultats de la modélisation hydraulique rétrospective sont encourageants. Il est possible d'intégrer les anciennes géométries tirées de cartes du 19^{ème} siècle dans le modèle 1D actuel et d'évaluer la sensibilité hydraulique de différents scénarios de changement. Ces premiers tests seront étendus au cours de l'année 2018 afin de mieux évaluer l'effet de la sédimentation fine sur l'évolution de la géométrie du chenal et in fine sur les lignes d'eau.

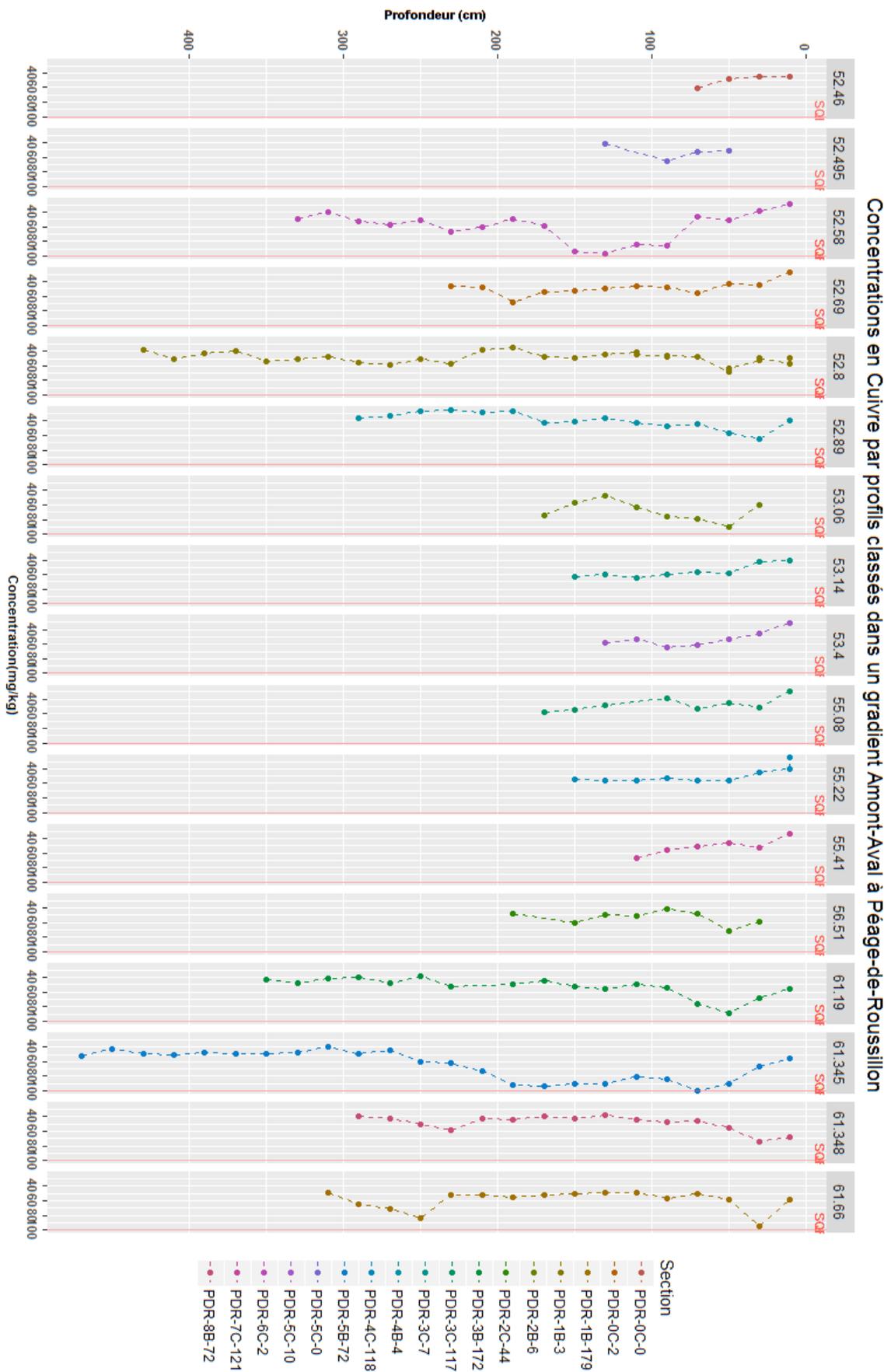
7. ANNEXES



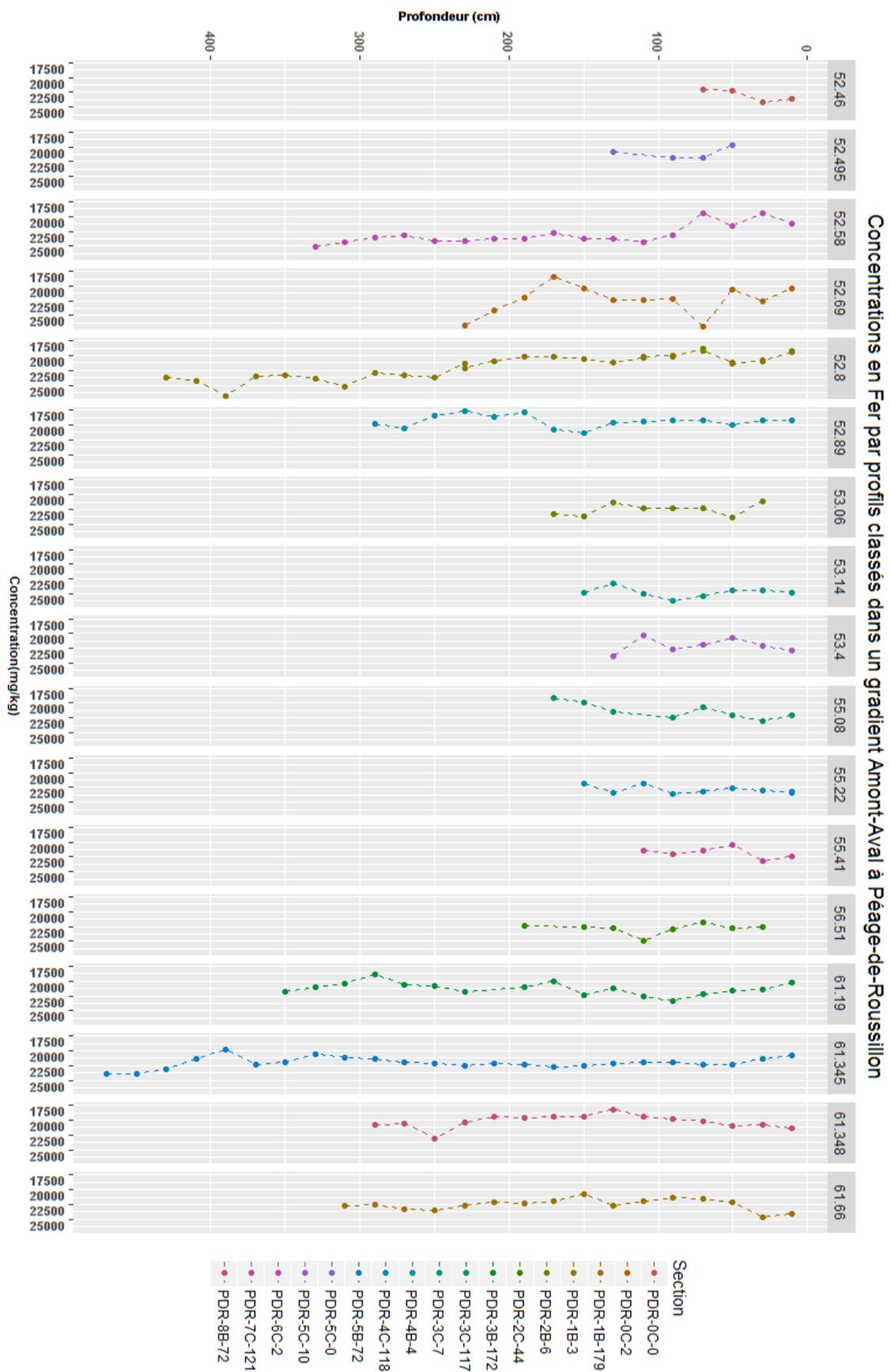
Annexe 1. Concentration en Plomb des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR



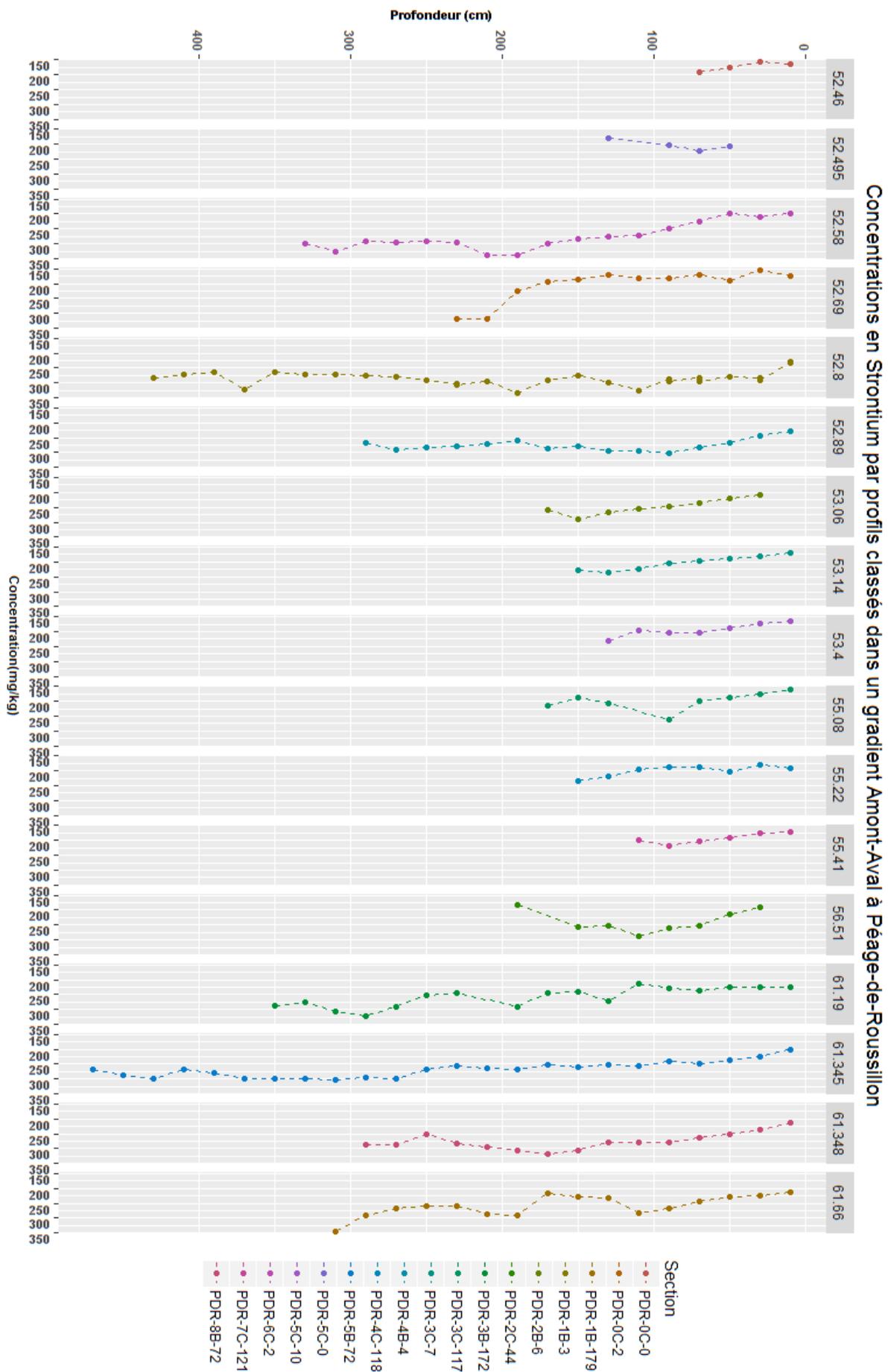
Annexe 2. Concentration en Nickel des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR



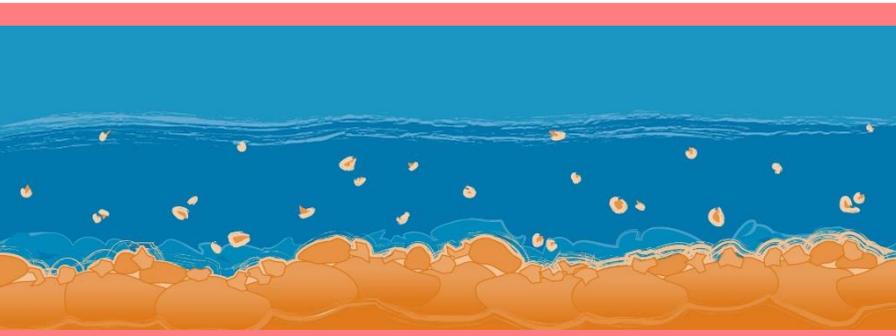
Annexe 3. Concentration en Cuivre des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR



Annexe 4. Concentration en Fer des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR



Annexe 5. Concentration en Fer des profils classés dans un ordre amont-aval à PDR



Observatoire des Sédiments du Rhône



Provence-Alpes-Côte d'Azur



Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact : dad.roux@graie.org