



HAL
open science

**Programme OSR4 2015-2017. Actions II.2, II.3 et II.4. :
Sédimentation et morphologie du lit majeur. RAPPORT**

**N°2 - Stocks sédimentaires des marges actives -
Approche comparée inter-sites DZM - PDR - PBN**

Hervé Piégay, Gabrielle Seignemartin, Alvaro Tena, Bianca Räßple, Adrien Barra, Jean-François Berger, Gwénaelle Roux, Michal Tal, Daniel Vazquez, Thierry Winiarski

► **To cite this version:**

Hervé Piégay, Gabrielle Seignemartin, Alvaro Tena, Bianca Räßple, Adrien Barra, et al.. Programme OSR4 2015-2017. Actions II.2, II.3 et II.4. : Sédimentation et morphologie du lit majeur. RAPPORT N°2 - Stocks sédimentaires des marges actives - Approche comparée inter-sites DZM - PDR - PBN. [Rapport de recherche] CNRS UMR 5023 - ENTPE LEHNA-IPE; CEREMA; EGEOS; CNRS UMR 7330 - CEREGE; CNRS UMR 5600 - EVS. 2018, 92 p. hal-03700772

HAL Id: hal-03700772

<https://hal.science/hal-03700772>

Submitted on 21 Jun 2022

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
du Rhône

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

RAPPORT N°2 – Stocks sédimentaires des marges actives – Approche comparée inter-sites DZM – PDR – PBN

Version finale 2018



© Bianca Raepple

Auteurs : Hervé Piégay, Gabrielle Seignemartin, Alvaro Tena, Bianca Ræpple, Adrien Barra, Jean-François Berger, Gwénaelle Roux, Michal Tal, Daniel Vazquez, Thierry Winiarski

2015 - 2020



Donnons un avenir à notre fleuve

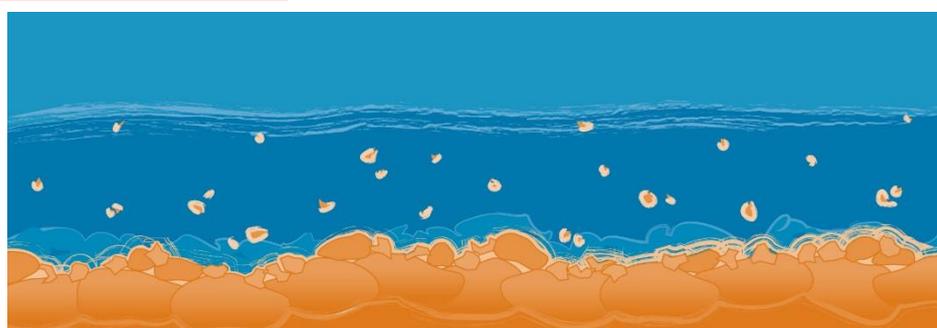


Table des matières

Table des matières	3
Table des figures, tableaux et annexes	4
1. Contexte et objectifs	7
2. Récapitulatifs des données disponibles sur l'ensemble des secteurs	8
3. Comparaisons surfaciques de l'évolution de la bande active	11
3.1. Données utilisées.....	11
3.2. Résultats préliminaires par secteur.....	13
3.3. Résultats comparés	15
4. Comparaisons volumétriques de la sédimentation des marges	17
4.1. Les profils longitudinaux.....	18
4.2. Epaisseurs et volumes de sédiments.....	22
4.3. Discussion sur les bilans volumétriques inter-secteurs.....	24
5. Analyse de la sédimentation	25
5.1. Taux de sédimentation des sédiments fins (sondages à la perche).....	25
5.2. Analyse des patrons de sédimentation	27
6. Concentrations en métaux dans les sédiments.....	42
6.1. Sédiments des casiers Girardon (échantillonnage par profils verticaux).....	43
6.2. Analyses chimiques des sédiments de surface au sein de la plaine alluviale et des casiers ...	56
7. Conclusions générales	65
8. Annexes	67

Table des figures, tableaux et annexes

Table des Figures

Figure 1. Evolution des tracés du Rhône sur les différents secteurs étudiés.....	12
Figure 2. Evolution de la superficie de la bande active du Rhône depuis 1860 sur les secteurs de Pierre-Bénite, Péage de Roussillon et Donzère-Mondragon (en hectares).....	13
Figure 3. Comparaison de l'évolution de la largeur moyenne de la bande active du Rhône entre 1810 et 2009	15
Figure 4. Comparaison de l'évolution de la largeur moyenne de la bande active du Rhône entre 1810 et 2009 en pourcentage (basant 100 en 1860)	16
Figure 5. Résultats bruts présentant les sondages par transects dans le secteur de Donzère-Mondragon	17
Figure 6. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Pierre Bénite : Altitudes des points et droites de régression le long du profil.....	18
Figure 7. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Pierre Bénite : droites de régression linéaire des altitudes des principaux modes de dépôts.....	19
Figure 8. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Péage-de-Roussillon. Altitudes des points et droites de régression le long du profil	19
Figure 9. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Péage-de-Roussillon. Droites de régression linéaire des altitudes des principaux modes de dépôts.....	20
Figure 10. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Donzère Mondragon. Altitudes des points et droites de régression le long du profil	21
Figure 11. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Donzère Mondragon. Droites de régression linéaire des altitudes des principaux modes de dépôts.	21
Figure 12. Comparaison des épaisseurs et volumes de sédiments fins et graviers pour les secteurs de Pierre Bénite, Donzère-Mondragon et Péage de Roussillon.....	24
Figure 13. Boite à moustache montrant les taux de sédimentation pour les secteurs de Pierre Bénite, Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon.....	25
Figure 14. Distribution des taux de sédimentation dans les différentes unités fluviales pour les secteurs de Pierre Bénite, Donzère-Mondragon et Péage-de-Roussillon	25
Figure 15. Distribution des taux de sédimentation en fonction des différentes périodes marquant le début de la végétalisation et la sédimentation fine associée pour les secteurs de Pierre Bénite, Péage de Roussillon et Donzère-Mondragon	26
Figure 16. Localisation sur le site de Pierre Bénite des profils GPR, des carottes sédimentaires et des sondages à la perche (voir en Annexe 4 pour DZM)	28
Figure 17. A) Granulométrie (D50, ligne de couleur grise) et B) Localisation des carottes à Pierre Bénite.....	29
Figure 18. Evolution planimétrique des sites sur lesquels ont été prélevées les carottes de Pierre Bénite.....	29
Figure 19. Profils GPR réalisés sur le secteur de prélèvement des carottes C18a et C18b à Pierre Bénite. - Profils 18i et h (partie aval du bras de débordement). Voir Figure 13 pour leur localisation	30
Figure 20. Profils GPR réalisés sur le secteur de prélèvement des carottes C18a et C18b à Pierre Bénite. - Profils 18a, c et d (partie aval du bras de débordement). Voir Figure 16 pour leur localisation.	31
Figure 21. Carottes sédimentaires réalisés sur le secteur de Donzère A) Profil de la granulométrie (D50, ligne de couleur grise) et B) Localisation des carottes sur le site	32
Figure 22. Evolution planimétrique des sites sur lesquels ont été prélevées les carottes de Donzère	33
Figure 23. Profil GPR réalisé longitudinalement dans une série de casiers sur le secteur de Pierre Bénite à l'amont immédiat du bras restauré de Ciselande	34
Figure 24. Profil GPR réalisé longitudinalement dans une série de casiers sur le secteur de Péage de Roussillon dans le secteur de l'île des graviers.....	34
Figure 25. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation à PBN*	38
Figure 26. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation à PDR*	39
Figure 27. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation à DZM*	39
Figure 28. Exemple des patrons longitudinaux des conditions environnementales dans le secteur de PBN	40

Figure 29. Variation du taux de sédimentation en fonction de la fréquence de connexion (j/an) et de la force tractrice au droit du casier pour un débit quinquennal pour les 3 sites d'étude.....	41
Figure 30. Graphique des teneurs en Zn, Pb, Ni, Cu, Fe et Sr en fonction du secteur	46
Figure 31. Analyse en Composantes Principales réalisée à partir du Zn, Pb, Ni, Cu, Fe et Sr sur l'ensemble des secteurs	47
Figure 32. Graphiques représentant les teneurs en Zinc (A) et en Plomb (B) en fonction du secteur, selon un gradient amont-aval, organisé par profil vertical.....	48
Figure 33. Graphique représentant les teneurs en Nickel (A) et en Cuivre (B) en fonction du secteur, selon un gradient amont-aval, organisé par profil.....	49
Figure 34. Graphiques représentant les teneurs (mg/kg) en Zinc, Plomb, Nickel selon le profil, le secteur et la profondeur de prélèvement.....	50
Figure 35. Graphiques représentant les teneurs (mg/kg) en Cuivre, Fer et Strontium selon le profil, le secteur et la profondeur de prélèvement	51
Figure 36. Lien entre la médiane de coordonnées factorielles sur F1 établie par profil vertical en fonction, de la fréquence de submersion de la surface, de l'âge du dépôt, de l'évolution de la ligne d'eau consécutive à la mise en RCC et de l'évolution de l'altitude du talweg depuis la construction des ouvrages Girardon	52
Figure 37. Valeur médiane des teneurs en éléments métalliques (Cu, Fe, Ni, Pb, Sr, Zc) sur les profils verticaux échantillonnés en fonction de l'âge du dépôt.....	53
Figure 39. Valeur médiane et interquartiles des teneurs en éléments métalliques (Cu, Fe, Ni, Pb, Sr, Zn) sur les profils verticaux en fonction de leur connexion (fréquence de submersion du point d'échantillonnage)..	55
Figure 40. Teneurs en Zinc, Plomb, Nickel et Cuivre dans les sédiments de surface selon le secteur d'étude	57
Figure 41. Concentration en Zinc (Zn) et en Plomb (Pb) dans les échantillons superficiels à Pierre-Bénite (mg/kg)	61
Figure 42. Concentration en Nickel (Ni) dans les échantillons superficiels à Pierre-Bénite et à Donzère-Mondragon (mg/kg)	62
Figure 43. Comparaison des teneurs moyennes en éléments métalliques contenus dans les sédiments en fonction de la date du début de la sédimentation fine (centre de la période identifiée par photo-interprétation) sur les secteurs de Pierre Bénite, Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon.....	64

Table des Tableaux

Tableau 1. Jeu de données « SIG ».....	8
Tableau 2. Jeu de données "Sédiments"	8
Tableau 3. Jeu de données "Relevés de terrain".....	10
Tableau 4. Caractéristiques des sédiments stockés dans les unités fluviales de Pierre-Bénite.....	22
Tableau 5. Caractéristiques des sédiments stockés dans les unités fluviales de Péage-de-Roussillon.....	22
Tableau 6. Caractéristiques des dépôts enregistrés au niveau des unités fluviales à Donzère -Mondragon	22
Tableau 7 : jeu de données utilisé - CHIMIE.....	42
Tableau 8 : teneurs métalliques des échantillons de profils verticaux prélevés dans les casiers	43
Tableau 9 : teneurs métalliques des échantillons de profils verticaux prélevés dans les casiers en regard de la norme S1	44
Tableau 10 : Seuils TEC, PEC et S1 - dénombrement des dépassements dans l'ensemble des échantillons de surface pour chaque secteur d'étude	59
Tableau 11 : Seuils TEC, PEC et S1 - dénombrement des dépassements dans l'ensemble des échantillons de surface des casiers pour chaque secteur d'étude	60

Table des Annexes

Annexe 1. Boite à moustache montrant les épaisseurs et taux de sédimentation aux différentes unités et périodes de sédimentation pour le secteur de Pierre Bénite	67
Annexe 2. Boite à moustache montrant les épaisseurs et les taux de sédimentation aux différentes unités et périodes de sédimentation pour le secteur de Péage-de-Roussillon.....	67
Annexe 3. Boite à moustache montrant les épaisseurs et les taux de sédimentation aux différentes unités et périodes de sédimentation pour le secteur de Donzère-Mondragon.....	68
Annexe 4. Localisation sur le site de Donzère des profils GPR, des carottes sédimentaires et des sondages à la perche.....	69
Annexe 5. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation dans le secteur de PDR. Voir légende de la Figure 28 pour les abréviations.....	70
Annexe 6. Patrons longitudinaux des conditions environnementales dans le secteur de PDR.	71
Annexe 7. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation dans le secteur de DZM. Voir légende de la Figure 28 pour les abréviations.....	72
Annexe 8. Patrons longitudinaux des conditions environnementales dans le secteur de DZM. Voir légende de la Figure 28 pour les abréviations	73
Annexe 9. Secteur PBN : analyse longitudinale de la médiane de coordonnées des individus sur l'axe 1 de à l'ACP de la Figure 31, des écarts-interquartiles. N correspond aux effectifs	74
Annexe 10. Secteur PDR : analyse longitudinale de la médiane de coordonnées des individus sur l'axe 1 de à l'ACP de la Figure 31, des écarts-interquartiles. N correspond aux effectifs	74
Annexe 11. Secteur MON : analyse longitudinale de la médiane de coordonnées des individus sur l'axe 1 de à l'ACP de la Figure 31, des écarts-interquartiles. N correspond aux effectifs	75
Annexe 12. Secteur DZM : analyse longitudinale de la médiane de coordonnées des individus sur l'axe 1 de à l'ACP de la Figure 31, des écarts-interquartiles. N correspond aux effectifs	75
Annexe 13. Graphique représentant les teneurs en Fer (à gauche) et en Strontium (à droite) en fonction du secteur, selon un gradient amont-aval, organisé par profil	76
Annexe 14. Carte - Concentration en Cuivre dans les échantillons superficiels à Pierre-Bénite (mg/kg).....	77
Annexe 15. Carte - Concentration en Zinc dans les échantillons superficiels à Péage-de-Roussillon (mg/kg)	78
Annexe 16. Carte - Concentration en Plomb dans les échantillons superficiels à Péage-de-Roussillon (mg/kg) .	79
Annexe 17. Carte - Concentration en Nickel dans les échantillons superficiels à Péage-de-Roussillon (mg/kg)..	80
Annexe 18. Carte - Concentration en Cuivre dans les échantillons superficiels à Péage-de-Roussillon (mg/kg) .	81
Annexe 22. Sédiments de surface - Relation entre la concentration des teneurs en éléments métalliques et la fréquence annuelle de connexion à Pierre Bénite	85
Annexe 23. Sédiments de surface - boite à moustaches montrant les teneurs en éléments métalliques aux différentes périodes de sédimentation pour le secteur de Pierre Bénite	86
Annexe 24. Relation entre la concentration des teneurs en éléments métalliques et la fréquence annuelle de connexion à Péage-de-Roussillon.....	87
Annexe 25. Boite à moustache montrant les teneurs en éléments métalliques aux différentes périodes de sédimentation pour le secteur de Péage-de-Roussillon.....	88
Annexe 26. Relation entre la concentration des teneurs en éléments métalliques et la fréquence annuelle de connexion à Donzère-Mondragon.....	89
Annexe 27. Boite à moustache montrant les teneurs en éléments métalliques aux différentes périodes de sédimentation pour le secteur de Donzère-Mondragon.....	90

1. Contexte et objectifs

Les travaux de l'axe 2 de l'OSR 4 viennent compléter les Actions 2, 4 et 5 de l'Axe I (« Stockage et déstockage ») du plan triennal précédent (OSR2) et de l'axe 2 de l'OSR3. 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 de la plaine alluviale et des contaminants associés.

Les données obtenues dans le contexte de programmes de recherche précédents (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, le Rhône court-circuité (RCC) de Péage-de-Roussillon (Rapport N°1). Les résultats obtenus sur ce site ont permis d'étendre l'analyse à deux autres sites (Pierre Bénite et Donzère-Mondragon) et de réaliser ainsi des comparaisons. Certaines actions ont également été conduites sur le RCC de Montélimar.

Cette approche doit permettre de fournir une estimation des stocks sédimentaires, de les spatialiser, de souligner leurs dynamiques actuelles (volume et taux de sédimentation), et de localiser les zones potentiellement contaminées par les métaux. Ce travail doit également servir de référentiel pour les suivis futurs des sites de ré-élargissement.

Le présent rapport synthétise les résultats acquis sur les trois RCC retenus, Péage-de-Roussillon, Donzère et Pierre Bénite et plus partiellement aussi sur celui de Montélimar. Il repose sur une analyse de l'évolution de la planimétrie, de la sédimentation à la fois fine et grossière et une évaluation de la contamination par les métaux. Les résultats sont encore partiels, des analyses sont encore en cours (C14, chimie des métaux sur les carottes, interprétation GPR...), mais apportent de premiers éléments pour comprendre la dynamique sédimentaire contemporaine de ces secteurs.

Pour ce rapport de l'Action II.2 et Action II.4, nous nous référons pour la partie méthodologie à celle du premier rapport intitulé *Action II.2 et Action II.4 RAPPORT N°1 -Stocks sédimentaires des marges actives – Méthodologie générale et application sur Péage-de-Roussillon.*

2. Récapitulatifs des données disponibles sur l'ensemble des secteurs

Les tableaux suivants récapitulent l'ensemble des données utilisées dans ce rapport.

Tableau 1. Jeu de données « SIG »

	Secteurs	Dates	Formats
Archives cartographiques/ géographiques géoréférencées et digitalisées	PBN	1860, 1905, 1945, 1954, 1993, 2008	Images : Tiff, Jpeg Digitalisation : Shape
Archives cartographiques/ géographiques géoréférencées et digitalisées	PDR	1810-1929, 1860, 1949, 1974, 1986, 2009	Images : Tiff, Jpeg Digitalisation : Shape
Archives cartographiques/ géographiques géoréférencées et digitalisées	DZM	1810-1929, 1860, 1947, 1954-55, 1976, 2006-2009	Images : Tiff, Jpeg Digitalisation : Shape
LiDAR de la BDT Rhône	PBN, PDR, DZM, MON	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	PBN, PDR, DZM, MON	Modélisation sur les chroniques de débit 1986-2010	Raster

Tableau 2. Jeu de données "Sédiments"

ID	Nom de l'échantillonnage	Secteur	Type de prélèvements	Types d'analyses effectuées	Nombre d'analyses	Matric e étudié e	Campagne – Référent	Localisation GPS
Sed1	Sédiments de surface à PDR	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
Sed2	Sédiments de surface à PBN	PBN	Tarière pédologique – 20 premiers cm	Chimie élémentaire - XRF portatif : <i>Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	321 échantillons	63µm	OSR4 A.Tena	x
Sed3	Sédiments de surface à DZM	DZM	Tarière pédologique – 20 premiers cm	Chimie élémentaire - XRF portatif : <i>Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	267 échantillons	63µm	OSR4 A.Tena	x
Sed5	Sédiments de profils verticaux à PBN	PBN	Tarière pédologique – tous les 20 cm	Chimie élémentaire - XRF portatif <i>Teneur en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	15 profils 146 échantillons	63µm	OSR3 & 4 G.Seignemartin	x
Sed4	Sédiments de profils verticaux à PDR	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
Sed6	Sédiments de profils verticaux à MON	MON	Tarière pédologique – tous les 20 cm	Chimie élémentaire - XRF portatif : <i>Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	17 profils 185 échantillons	63µm	OSR3 & 4 G.Seignemartin	x
Sed7	Sédiments de profils verticaux à DZM	DZM	Tarière pédologique – tous les 20 cm	Chimie élémentaire - XRF portatif : <i>Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	17 profils 281 échantillons	63µm	OSR3 & 4 G.Seignemartin	x

Sed8	Carottes PDR	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
Sed9	Carottes PBN	PBN	Carottage (percussion)	-Granulométrie -Chimie élémentaire au Core-Scanner	5 carottes (0,90m, 2,92m, 2,64m, 2,00m, 1,52m) - échantillonnage de 1 cm à 3 cm	Totale	OSR4 T.Winiarski	x
Sed10	Carottes DZM	DZM	Carottage (percussion)	-Granulométrie -Chimie élémentaire au Core-Scanner	-5 carottes (0,53m, 0,79m, 0,53m, 1,35m, 1,24m) -pas de 1cm à 3cm	Totale	OSR4 T.Winiarski	x
Sed11	Sédiments de surface- PDR - Casiers d'Arcoules (OHM)	PDR	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	cf Sed 11
Sed13	Série de contrôle SAAF-XRF	PBN + PDR + DZM	Echantillons de surface issus de Sed1, Sed2 et Sed3 et Sed 11	-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	PDR	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	PDR	Carottage (percussion)	-Granulométrie -Chimie élémentaire au XRF	x	Totale	A. Barra, J.F. Berger	EVS
Carottes du Casier BRGM	Carottes du Casier BRGM	PDR Casier 117	Carottage (percussion)	-Granulométrie - Analyse quantitative en ETM et PCB -Radargramme	2 carottes C29 & C27	Totale		Rapport BRGM/RC-60367-FR 2013

Tableau 3. 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
Rel2	Sondage à la perche à PBN	PBN	Sondage à la perche	302	Mesure épaisseur sédiment fin	OSR4 A.Tena	X
Rel3	Sondage à la perche à DZM	DZM	Sondage à la perche	307	Mesure épaisseur sédiment fin	OSR4 A.Tena	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
Rel5	Campagne géophysique à PBN	PBN	Géophysique	GPR : 67 profils, 9,93 km sur 5 m de profondeur	GPR : radar géologique	OSR4 T.Winiarski	X
Rel6	Campagne géophysique à DZM	DZM	Géophysique	GPR : 63 profils, 11 km sur 5 m de profondeur ERT : 2 profils, 400 m, 25 m profondeur	GPR : radar géologique ERT : résistivité électrique	OSR4 T.Winiarski	X

3. Comparaisons surfaciques de l'évolution de la bande active

3.1. Données utilisées

Au cours de l'OSR 4, une synthèse des données planimétriques a été réalisée sur les différents Rhône court-circuités étudiés (Péage-de-Roussillon, Donzère-Mondragon et Pierre Bénite). Nous avons complété les jeux de données acquis dans le cadre de l'OSR3 et de l'OSR4 (2015) sur les secteurs de Péage-de-Roussillon et de Donzère-Mondragon (récapitulatif en section 2). L'application du protocole méthodologique SIG pré-validé (incluant des procédures de géoréférencement, de photo-interprétation et de digitalisation détaillées dans le livrable II.1) a permis d'enrichir les séries temporelles dans le but d'affiner l'analyse des changements paysagers et obtenir une délimitation plus précise de l'évolution des différents tracés de la bande active.

Secteur de Péage-de-Roussillon

Se référer à la section 3.1. du *Rapport N°1 - Stocks sédimentaires des marges actives – Synthèse des résultats sur Péage-de-Roussillon*.

Secteur de Donzère-Mondragon

L'analyse diachronique des bandes actives du secteur de Donzère-Mondragon a été effectuée à partir de 6 dates (1810-1929, 1860, 1947, 1954-55, 1976 et 2006-2009). Le cadastre napoléonien levé dans le premier tiers du 19^{ème} siècle et la carte de 1860 permettent de caractériser le tracé en plan du chenal avant les aménagements Girardon. La série de photos de 1947 permet l'observation de l'état du cours d'eau immédiatement avant la mise en service du barrage de Donzère-Mondragon, et la série de 1954-55 immédiatement après. La série photographique de 1976 sert de référence 20 ans après l'ouvrage. La série de 2006-2009 représente la date la plus récente disponible (Figure 1).

Secteur de Pierre-Bénite

Après avoir sélectionné le RCC de Pierre-Bénite comme troisième tronçon d'étude (le RCC de Montélimar était initialement prévu), nous avons créé un jeu de couches SIG à partir des informations disponibles pour l'analyse planimétrique du Rhône. Les séries photographiques finalement analysées à Pierre Bénite sont 1860, 1905, 1945, 1954, 1993, 2008. La présence de la raffinerie de Feyzin a compliqué l'obtention des images aériennes sur ce secteur conduisant à exploiter les seules dates disponibles. Comme c'est le cas pour les autres secteurs, la carte de 1860 sert de référence pour décrire le Rhône avant les grands aménagements. Celle de 1905 permet de visualiser le tracé du chenal intégrant les aménagements Girardon. Les séries de 1945 et 1954 permettent l'observation de l'état du cours d'eau quelques décennies après les aménagements Girardon et avant la dérivation de 1967. Enfin, 1993 et 2008 sont respectivement la référence post-dérivation et la date la plus récente (Figure 1). Pour plus de détails, se référer au tableau de la section 2.

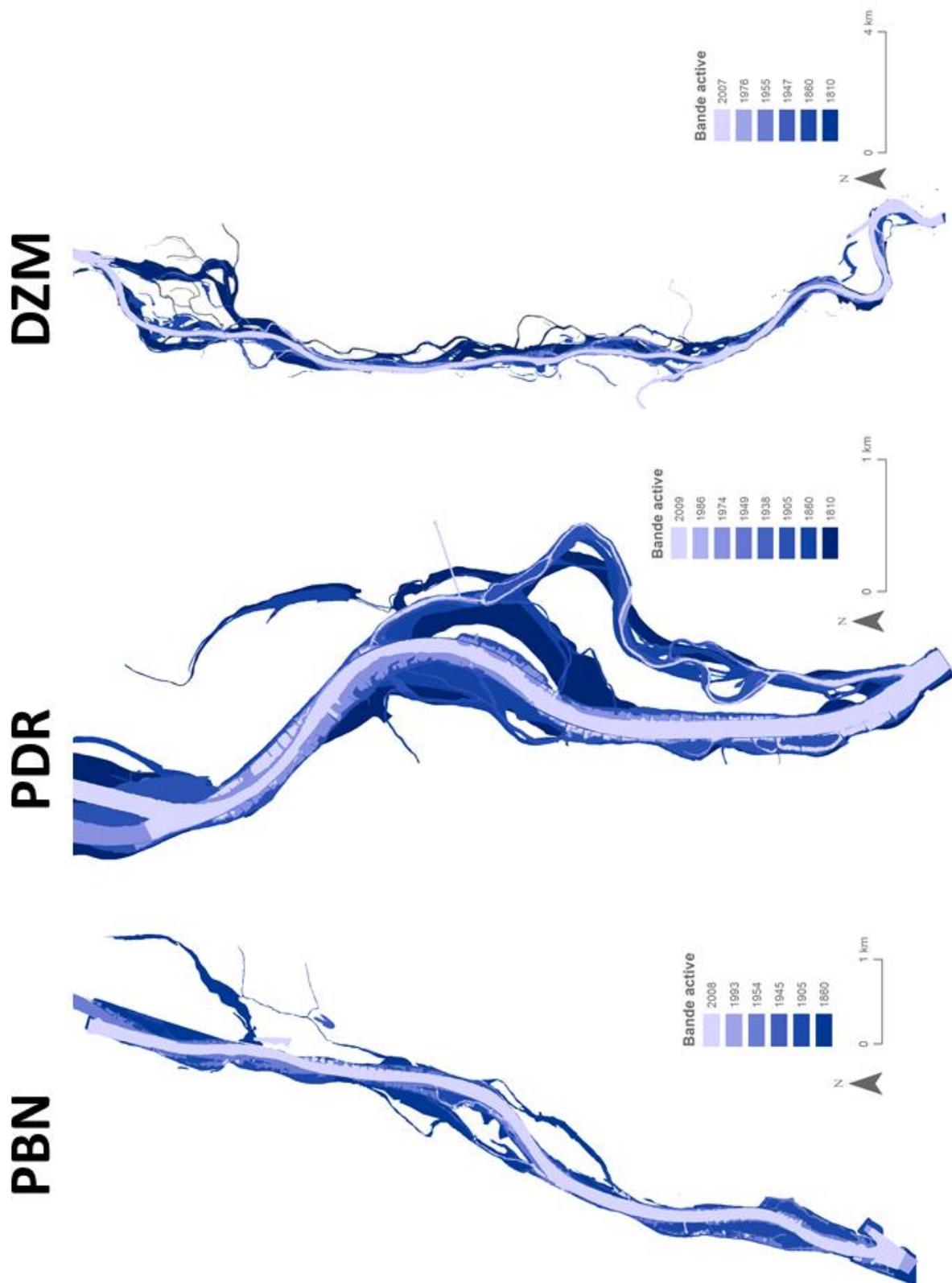


Figure 1. Evolution des tracés du Rhône sur les différents secteurs étudiés
 PBN-Pierre Bénite. PDR- Péage de Roussillon. DZM- Donzère-Mondragon

Figure 2. Evolution des tracés du Rhône sur les différents secteurs étudiés
 PBN-Pierre Bénite. PDR- Péage de Roussillon. DZM- Donzère-Mondragon

3.2. Résultats préliminaires par secteur

Les cartes de la Figure 1 présentent les bandes actives aux différentes dates susmentionnées (Section 3.1). La rétraction du chenal et la simplification du tracé sont visibles sur tous les tronçons. Par le biais de traitement SIG, nous avons alors pu quantifier ce phénomène (Figure 2).

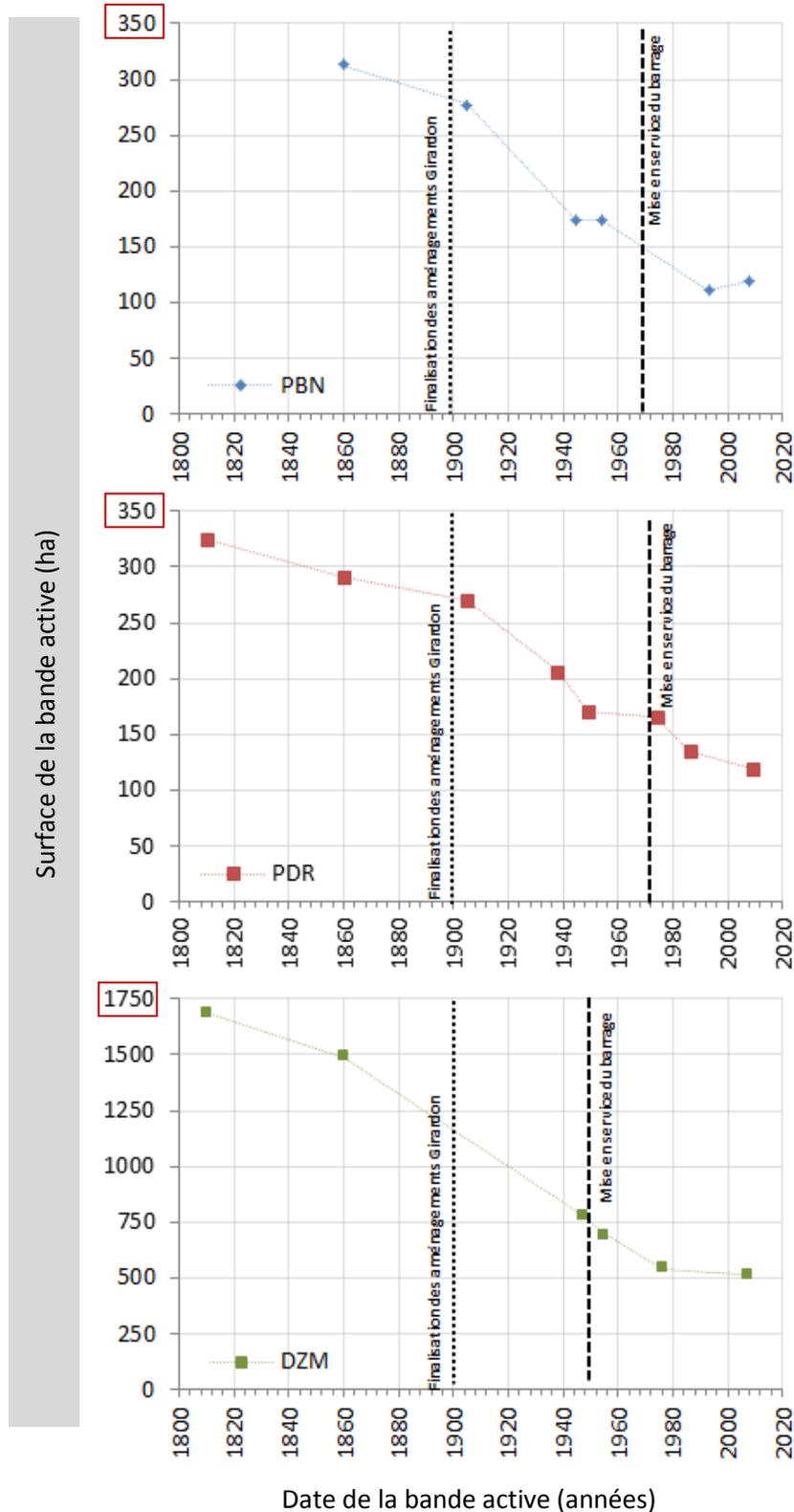


Figure 4. Evolution de la superficie de la bande active du Rhône depuis 1860 sur les secteurs de Pierre-Bénite, Péage de Roussillon et Donzère-Mondragon (en hectares)

Figure 5. Evolution de la superficie de la bande active du Rhône depuis 1860 sur les secteurs de Pierre-Bénite, Péage de Roussillon et Donzère-Mondragon (en hectares)

Pierre-Bénite et Péage-de-Roussillon

L'évolution de la bande active des secteurs de Pierre Bénite et de Péage-de-Roussillon présente une trajectoire similaire, correspondant en moyenne à une perte de bande active d'environ 200 ha en 200 ans, elle s'est déroulée en quatre phases :

- **Phase 1 – 19^{ème} siècle** : la superficie de la bande active diminue légèrement entre 1820 et le début du XX^{ème} siècle. Ceci est probablement lié aux premiers endiguements (infrastructures de protection contre les crues). Une diminution beaucoup plus prononcée de la bande active coïncide avec la finalisation des aménagements Girardon et le resserrement du lit mineur, favorisant la formation d'un chenal unique.
- **Phase 2 – 1^{ère} moitié du 20^{ème} siècle** : la superficie de la bande active se stabilise juste avant la mise en service des barrages et la dérivation du débit vers le canal. Le vieux Rhône semble alors s'être adapté à ces nouvelles conditions hydro-sédimentaires.
- **Phase 3 – 2^{nde} moitié du 20^{ème} siècle** : après la mise en service des barrages, cet équilibre est rompu, on enregistre à nouveau une importante réduction de la bande active. Cette réduction est associée à un phénomène d'émersion des superficies résultant de la réduction de débit, associé à un processus de végétalisation de ces aires atterries et peu remaniées pour que la végétation résiste aux crues suivantes.
- **Phase 4 – présentement** : la superficie de la bande active ne montre pas de grandes variations au cours de ces dernières années.

Alors que les débits réservés sont revus à la hausse depuis presque deux décennies pour les sites pilotes comme Pierre Bénite et plus récemment pour Péage-de-Roussillon et Donzère, et que certaines parties sont restaurées afin de rendre de la fonctionnalité au fleuve, les vieux-Rhône sont sujets à des changements récents. Néanmoins, pour les dernières décades, les **tendances semblent différentes** à Pierre Bénite et Péage-de-Roussillon :

En effet, **Pierre Bénite** enregistre une augmentation récente de superficie de la bande active. Cette augmentation est liée aux travaux de restauration de trois anciens bras secondaires (lônes) du Rhône. Cela suppose une augmentation de la superficie active d'au moins 6 ha. Dans le cas de **Péage-de-Roussillon**, le fait que la superficie de la bande active diminue encore montre que le vieux Rhône n'a pas encore trouvé un nouvel équilibre.

Donzère-Mondragon

L'évolution de la superficie de la bande active du Rhône dans le secteur de Donzère-Mondragon présente une tendance analogue à celle de Pierre Bénite et Péage-de-Roussillon. Cependant, la rétraction de la bande active est beaucoup plus conséquente que sur les autres RCC, il s'agit de 1 200 ha perdus en 200 ans.

- **Phase 1 & 2 – Fin 19^{ème} siècle & 1^{ère} moitié du 20^{ème} siècle** : la superficie de la bande active diminue légèrement entre 1820 et 1860. Ceci est probablement lié aux premiers endiguements (infrastructures de protection contre les crues). Une forte diminution de la superficie de la bande active est observée entre 1860 et 1947.
- **Phase 3 & 4 – 2^{nde} moitié du 20^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui** : on observe un phénomène d'émersion des superficies après la dérivation (entre 1947 et 1955). Le fait que la bande active

continue de se rétracter entre 1955 et 1976 indique que le vieux Rhône est alors encore en train de s'adapter au changement des conditions hydro-sédimentaires. L'absence de débits compétents (RCC avec un débit réservé) a favorisé la végétalisation de zones anciennement actives. Finalement, les images les plus récentes montrent une stabilité de la superficie de la bande active pour la période 1976-2009 tandis que le processus d'ajustement par végétalisation est aujourd'hui abouti ou bloqué par des interventions mécaniques.

A noter que des problèmes de géoréférencement ne nous ont pas permis d'ajouter le Plan Branciard (1905) à la série de données de DZM. Ainsi, il n'est pas possible de discerner la diminution surfacique liée aux anciennes infrastructures de protection contre les crues de celle liée aux aménagements Girardon. On obtient alors un impact cumulé des deux types d'aménagements lorsque l'on se réfère à la période 1860-1947.

3.3. Résultats comparés

L'évolution surfacique relative des trois secteurs est présentée dans les figures 3 et 4. Les tendances sont très similaires.

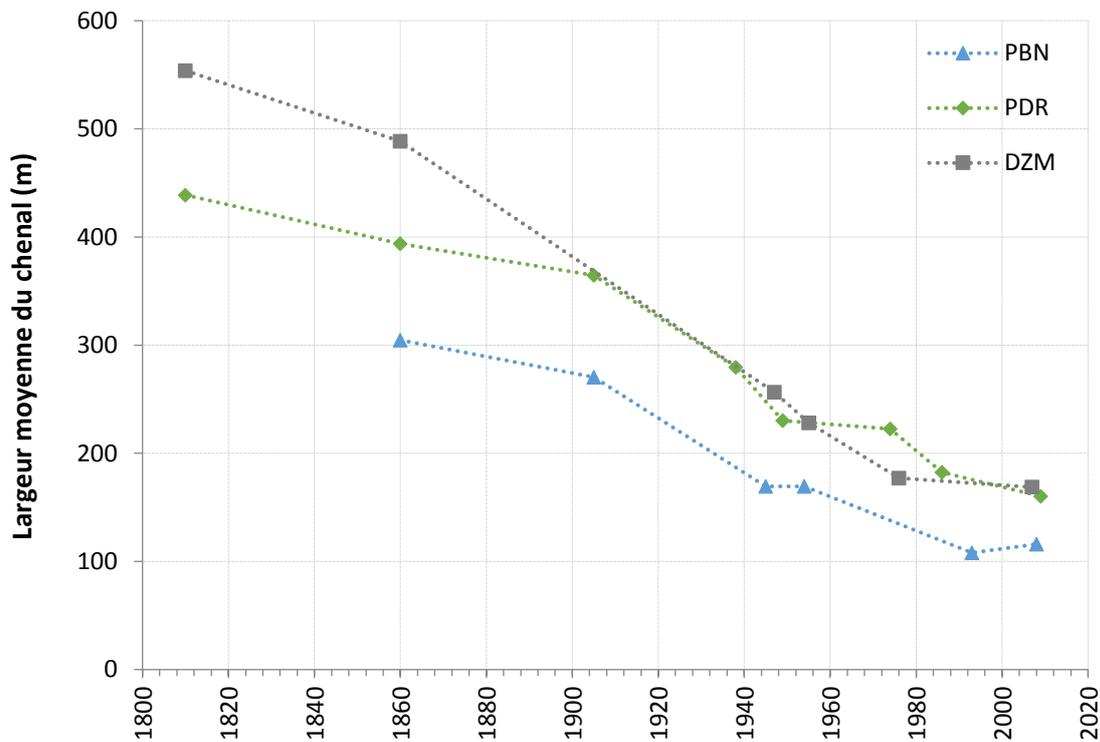


Figure 6. Comparaison de l'évolution de la largeur moyenne de la bande active du Rhône entre 1810 et 2009

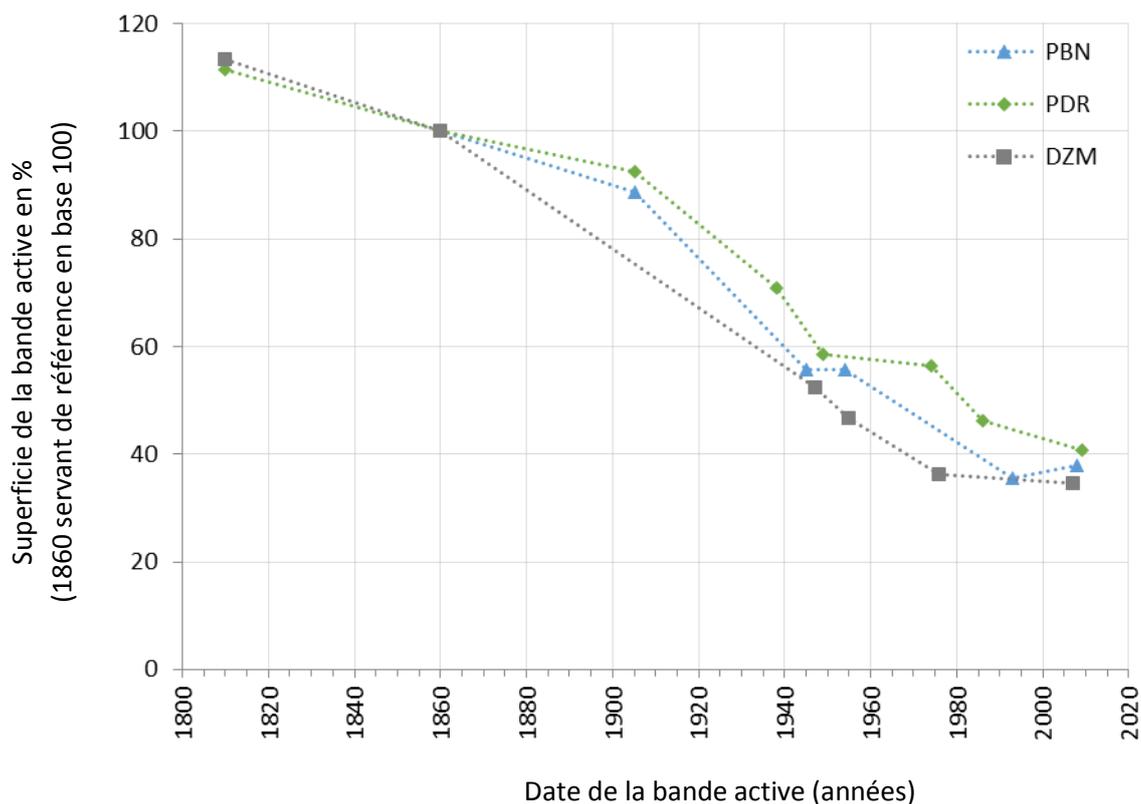


Figure 7. Comparaison de l'évolution de la largeur moyenne de la bande active du Rhône entre 1810 et 2009 en pourcentage (basant 100 en 1860)

Afin de se défaire de l'effet « taille » des secteurs, nous avons étudié le phénomène de rétraction du Rhône à partir de l'évolution de la largeur moyenne par secteur (Figure 3), également ramenée à au rapport [Surface Active au temps t / Surface active en 1860] (exprimé en pourcentage) (Figure 4).

Pour les trois secteurs, on observe :

- jusqu'à la première moitié du XX^{ème} siècle, une diminution importante de l'ordre **40%** de la surface initiale de la bande active. Les casiers Girardon semblent avoir joué un rôle prépondérant dans la déconnection du Rhône avec sa plaine alluviale : les bras secondaires disparaissent au profit d'un chenal unique (phénomène observable sur les cartes de la Figure 1).
- une légère stabilisation avant la mise en service des aménagements (visible à PBN et PDR) ;
- une réduction importante d'environ **20%** de la surface initiale de la surface de la bande active après la mise en service des barrages (abaissement de la ligne d'eau) ;
- une stabilisation surfacique (PBN) ou une diminution de la bande active très progressive (PDR, DZM), représentative d'un système en voie de stabilisation ou sujet à des processus lents de sédimentation des marges.

A l'échelle de la plaine alluviale de chaque secteur, les deux phases principales d'aménagement (Girardon et Dérivation) induisent une régression surfacique proportionnellement équivalente au sein de chaque secteur : 40% de la surface initiale pour la première phase contre 20% pour la seconde, soit 60% en cumulé (PDR : 59,3%, PBN : 62% et DZM : 65,5%).

4. Comparaisons volumétriques de la sédimentation des marges

Sur le RCC de Péage-de-Roussillon, la densité de points d'échantillonnage avait permis d'interpoler le toit de galets d'une façon satisfaisante afin de dresser un bilan des stocks sédimentaires disponibles.

En raison de la longueur du Rhône court-circuité de Donzère-Mondragon (30 km), il était logistiquement difficile d'échantillonner avec la même densité toute la plaine alluviale et réitérer ainsi ce type d'analyses pour une comparaison inter-secteurs. Une approche par transect a donc été adoptée afin de s'adapter à cette contrainte. Ces transects ont été choisis afin de bien caractériser la sédimentation des différentes unités alluviales (plaine ancienne, plaine jeune, casiers, champs d'épis). Les résultats comparatifs de ces deux méthodes sont disponibles dans le rapport OSR3.

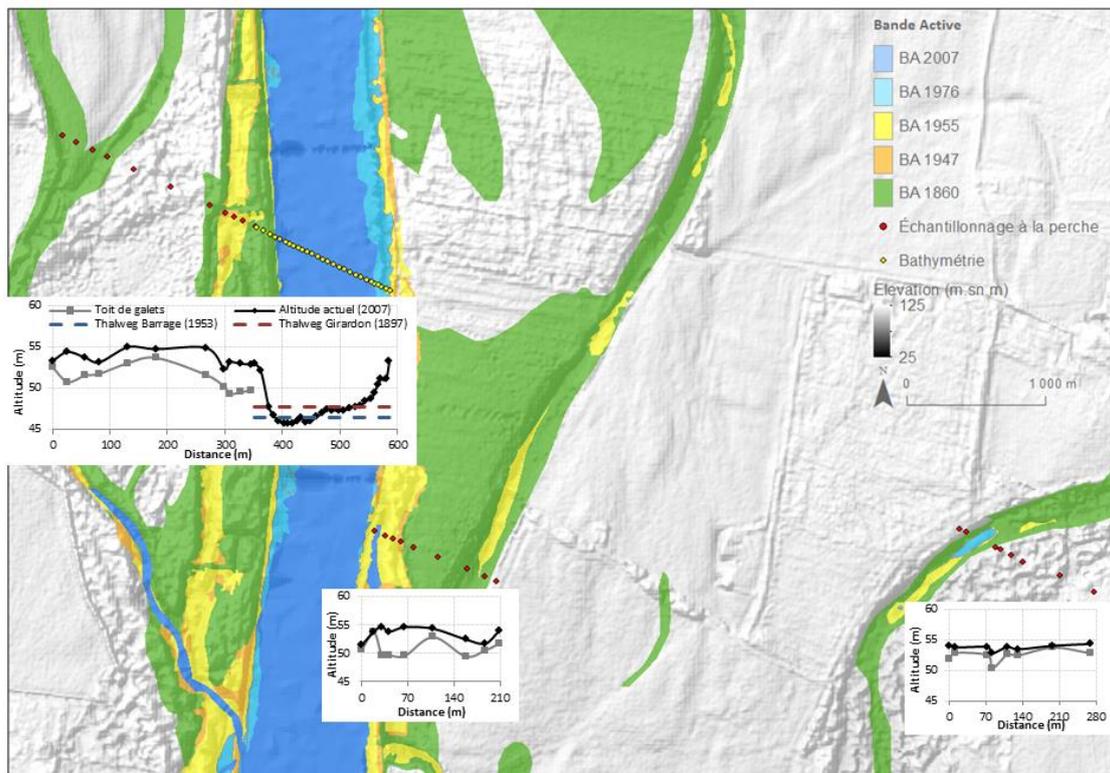


Figure 8. Résultats bruts présentant les sondages par transects dans le secteur de Donzère-Mondragon

Profil en noir : l'altitude actuelle du sol à partir de levés LiDAR (année, précision) ; profil en gris : altitude de refus des sondages à la perche (toit des galets : ancien lit du Rhône).

La méthode par transects permet de produire des séries de données couvrant les différents types de surfaces alluviales, déterminés selon la typologie susmentionnée ou en fonction de leur âge (Figure 5). Les profils de l'altitude actuelle du sol (en noir sur la Figure 5) et les profils du toit de galets (en gris sur la Figure 5) ont été déterminés à partir de 19 transects régulièrement répartis sur le linéaire. L'intérêt de cette démarche est de pouvoir caractériser régulièrement le remplissage sédimentaire de la plaine afin de créer un jeu de données représentatif du tronçon.

La comparaison des deux méthodes appliquée au RCC Péage-de-Roussillon a montré que les résultats obtenus avec la méthode par transects sont très proches de ceux obtenus par l'interpolation du toit de graviers à partir d'un maillage fin de sondages effectués à la perche (voir rapport OSR3).

4.1. Les profils longitudinaux

Les estimations des épaisseurs de sédiments fins stockés sur l'ensemble des trois RCC ont été obtenues par différence entre l'altitude moyenne du sol actuel et celle du refus des sondages à la perche (toit des graviers). Les altitudes moyennes du sol, du toit des graviers et du talweg sont basées sur le calcul d'une droite de régression linéaire (droite de tendance). Afin de préciser ces estimations globales, les résultats sont présentés en fonction de plusieurs modes de dépôts : champ d'épis, casier, plaine jeune, plaine ancienne. On obtient des estimations moyennes par types d'unités : champ d'épis, casier, plaine jeune, plaine ancienne. Cette méthode permet de dégager des tendances sur le continuum. Selon les estimateurs moyens, il apparaît que les épaisseurs de sédiments fins et de graviers augmentent selon un gradient amont-aval.

4.1.1. Profil longitudinal à Pierre-Bénite

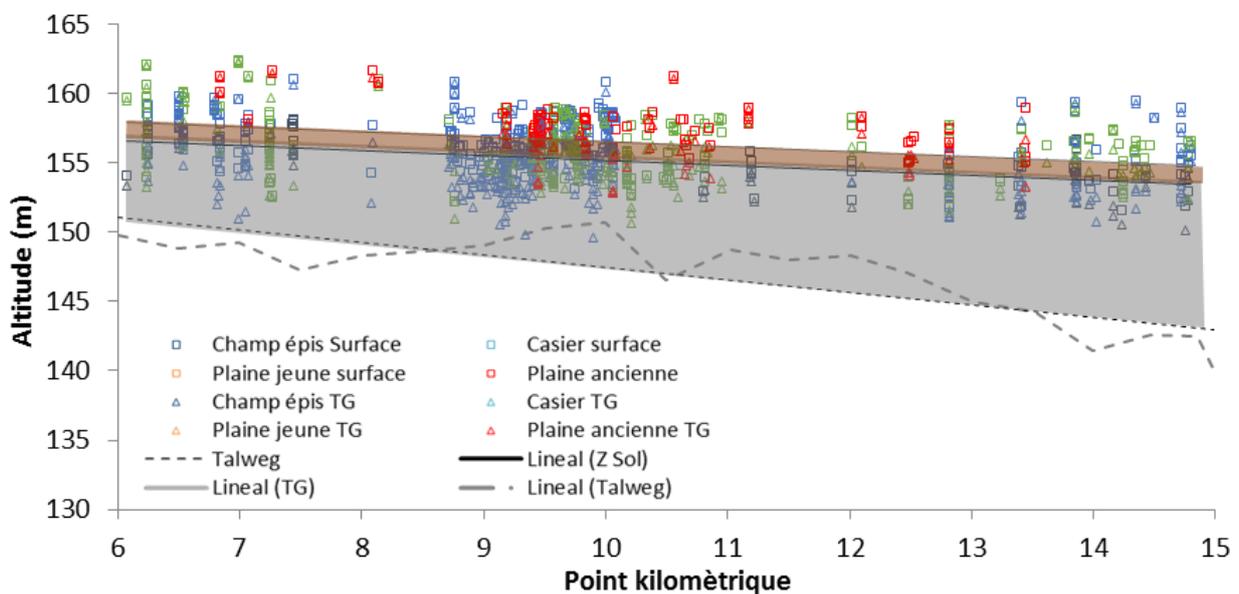


Figure 9. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Pierre Bénite : Altitudes des points et droites de régression le long du profil

Les carrés représentent les points mesurés d'altitude du sol et les triangles les points mesurés de l'altitude du toit de galets (TG) pour les différents modes de dépôts. Les droites représentent les régressions linéaires de l'altitude du talweg, du toit des galets et de la surface du sol. La surface grise représente l'épaisseur des graviers et la surface marron représente l'épaisseur de sédiments fins par rapport à l'altitude moyenne du talweg.

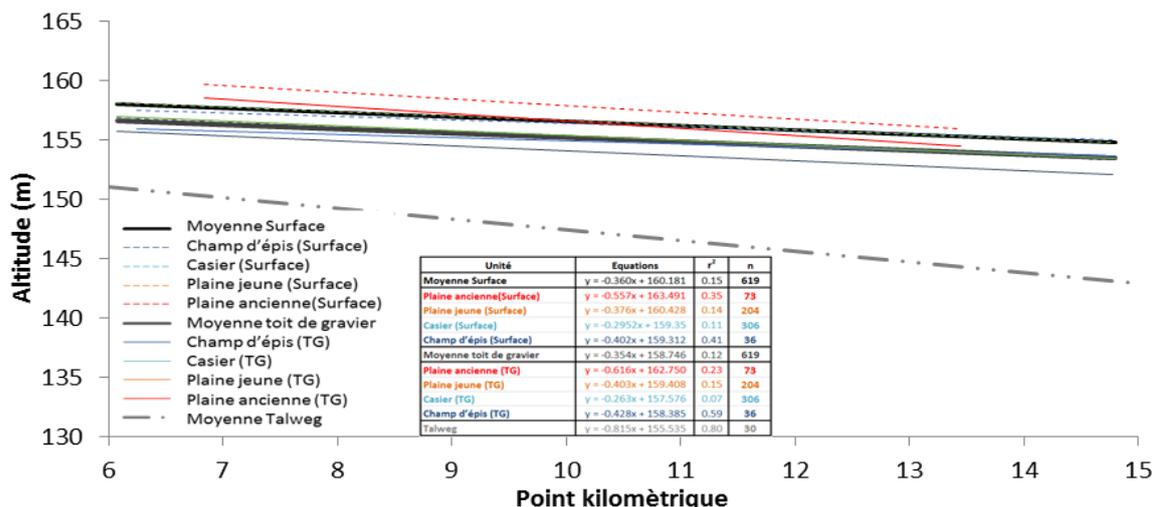


Figure 10. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Pierre Bénite : droites de régression linéaire des altitudes des principaux modes de dépôts

Sur la Figure 6, il apparaît distinctement que les épaisseurs de galets (surface grise) augmentent selon un gradient amont-aval. Ce n'est pas le cas pour les sédiments fins (en marron) dont l'épaisseur semble rester constante sur tout le linéaire. La Figure 7 amène un éclairage quant aux tendances globales à PBN : par exemple, le coefficient de la droite de régression de la surface pour la plaine ancienne est de -0,557, celui du toit de gravier est -0,616 alors que celui du Talweg est de -0,815. Ces coefficients traduisent la constance observée de l'épaisseur des fines - les droites de surface et du toit de graviers sont quasiment parallèles - ainsi que l'augmentation de l'épaisseur des graviers dans un gradient amont-aval : les droites du toit de galets et du talweg divergent.

4.1.2. Profil longitudinal à Péage-de-Roussillon

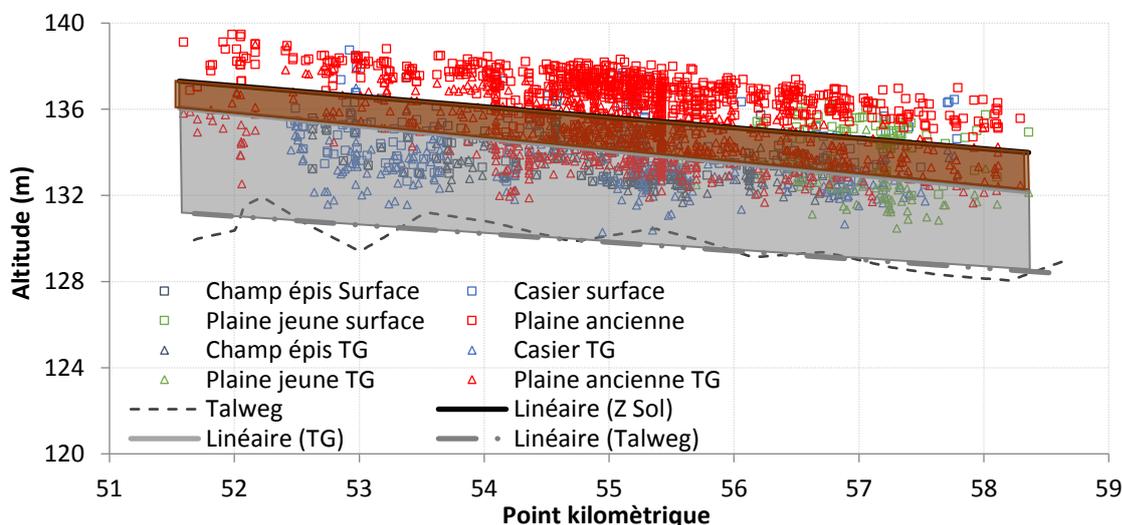


Figure 11. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Péage-de-Roussillon. Altitudes des points et droites de régression le long du profil

Les carrés représentent les points mesurés d'altitude du sol et les triangles les points mesurés de l'altitude du toit de galets (TG) pour les différents modes de dépôts. Les droites représentent les régressions linéaires de l'altitude du talweg, du toit des galets et de la surface du sol. La surface grise représente l'épaisseur des graviers et la surface marron représente l'épaisseur de sédiments fins par rapport à l'altitude moyenne du talweg.

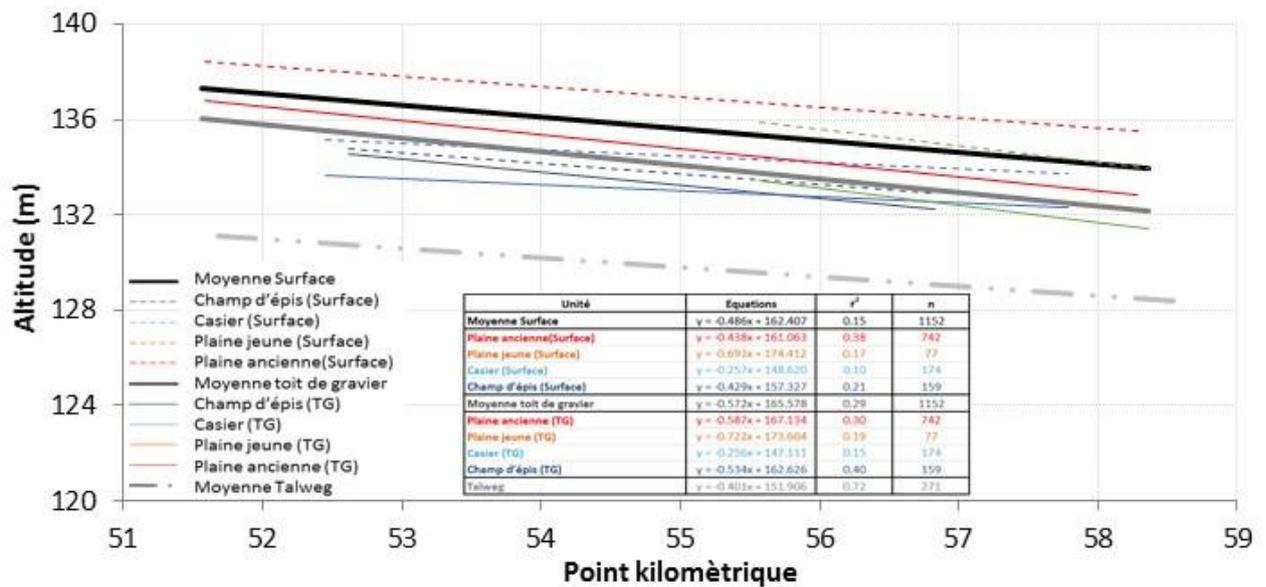


Figure 12. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Péage-de-Roussillon. Droites de régression linéaire des altitudes des principaux modes de dépôts

Sur le continuum de Péage-de-Roussillon (Figure 8), il semblerait qu'il y ait une légère augmentation de l'épaisseur des fines entre le PK52 et le PK58 pour le cas de plaine ancienne, tendance plus visualisable sur la figure 9, notamment grâce aux coefficients des droites : ($a=-0,438$) pour la surface, ($a=-0,587$) pour le toit de graviers et ($a=-0,40$) pour le talweg. Cette tendance n'est pas retrouvée pour les autres compartiments alluviaux où les droites entre surface et toit de graviers sont quasiment parallèles. Concernant l'épaisseur de graviers, nous n'observons pas de gradient amont-aval.

Remarque méthodologique

La comparaison méthodologique des approches « surfaciques » et par « transects », disponible sur le secteur de Péage-de-Roussillon montre des résultats très voisins. Avec la méthode des transects, les valeurs médianes d'épaisseur de fines obtenues pour les différentes unités fluviales sont de 2,16 m pour la plaine ancienne (<1860), 2,49 m pour la plaine jeune (> 1860), 1,44 m pour les casiers, et 0,45 m pour les champs d'épis, alors que pour les mêmes unités, les épaisseurs obtenues avec l'approche surfacique sont de 2,20 m, 2,50 m, 1,45 m et 0,48 m, respectivement (voir rapport OSR3). Il y a ainsi à peine quelques centimètres de différence entre les épaisseurs obtenues pour chaque compartiment de la plaine (moins de 1,5% dans tous les cas). Ce résultat est important d'un point de vue méthodologique car il valide l'utilisation de la méthode par transects et autorise son application aux autres secteurs.

4.1.3. Profil longitudinal à Donzère-Mondragon

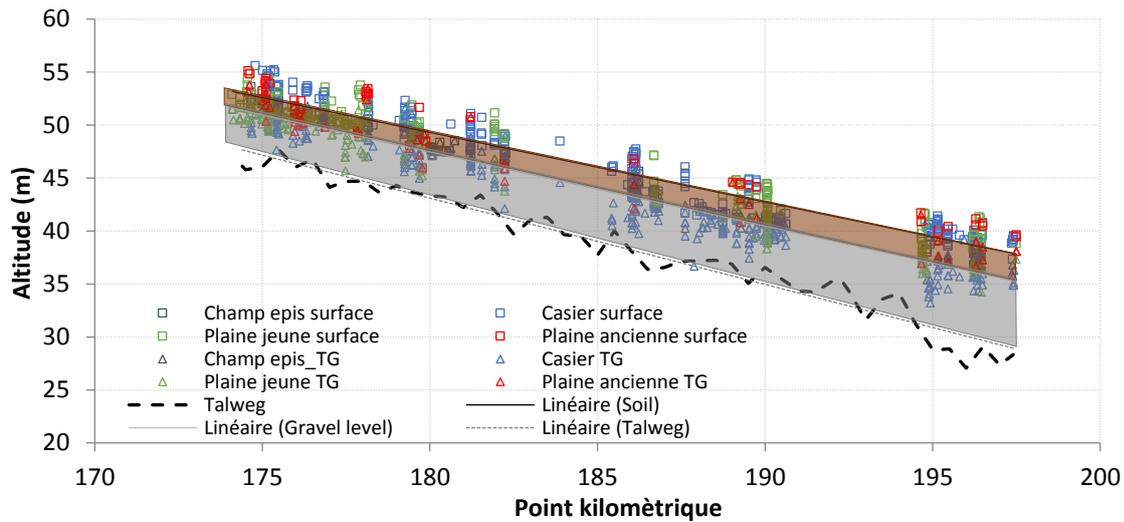


Figure 13. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Donzère Mondragon. Altitudes des points et droites de régression le long du profil

Les carrés représentent les points mesurés d'altitude du sol et les triangles les points mesurés de l'altitude du toit de galets (TG) pour les différents modes de dépôts. Les droites représentent les régressions linéaires de l'altitude du talweg, du toit des galets et de la surface du sol. La surface grise représente l'épaisseur des graviers et la surface marron représente l'épaisseur de sédiments fins par rapport à l'altitude moyenne du talweg.

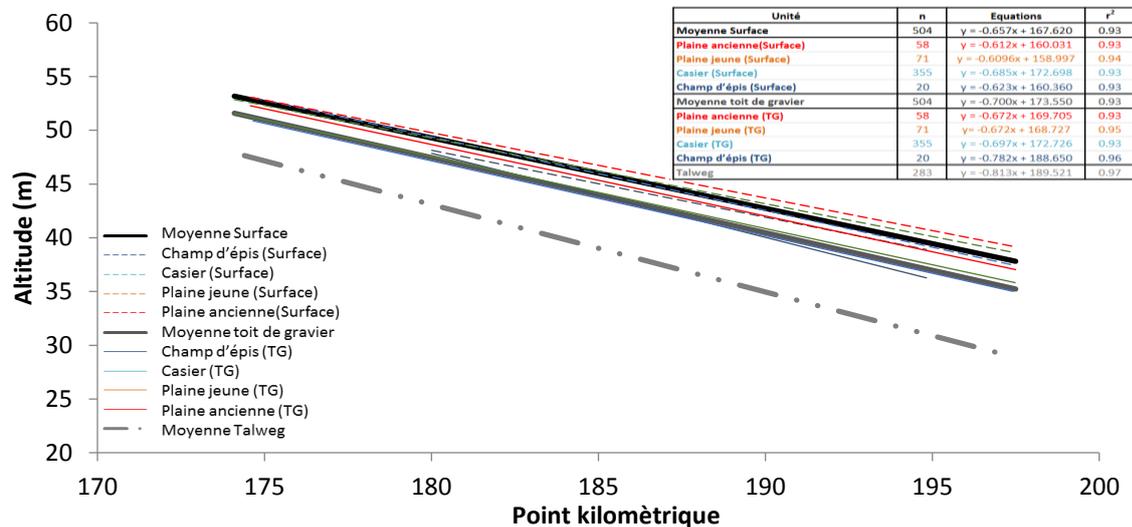


Figure 14. Tendances des variations d'altitudes de la surface du sol actuel, du toit des galets et du talweg du RCC de Donzère Mondragon. Droites de régression linéaire des altitudes des principaux modes de dépôts.

A Donzère, il n'y a pas de gradient amont-aval contrasté concernant les épaisseurs de sédiments fin (Figure 10 et 11). Les droites appariées de chaque compartiment entre surface et toit de galets sont pratiquement parallèles (coefficients similaires) sauf dans le cas des champs d'épis ($a=-0.623$)

pour la surface contre ($a=-0.782$) pour le toit de graviers. Il semblerait que les champs d'épis à l'aval stockent davantage de fines.

La droite du Talweg montre un coefficient plus élevé que les autres droites ($a=-0,81$). Ainsi, les droites de régression des toits de graviers et du talweg ont tendance à diverger. Néanmoins, en regardant le détail de la Figure 10, on observe une variation importante de l'altimétrie du talweg entre les PK 194 et 197, alors absorbée dans la droite de régression du talweg de la Figure 11. Avant le PK194, le talweg se maintient, puis plonge sur les 3 derniers kilomètres, *impactant* alors le coefficient de variation de la droite le représentant.

4.2. Epaisseurs et volumes de sédiments

En considérant la différence altimétrique existant entre l'altitude moyenne actuelle du sol et la position moyenne du toit de graviers, il est possible d'estimer les épaisseurs moyennes de sédiments fins. En les multipliant par les surfaces associées, on obtient les volumes sédimentaires présents dans ces compartiments. En les sommant, on estime le stock total de sédiments fins.

Ce raisonnement est également effectué pour estimer le stock de graviers : en considérant la différence altimétrique existant entre la position moyenne du toit de graviers dans les différents compartiments alluviaux et celle du fond du lit (talweg), il est possible d'estimer les épaisseurs de sédiments grossiers. En les multipliant par les surfaces associées, on obtient les volumes sédimentaires de ces compartiments. En les sommant, on estime le stock total de sédiments grossiers.

Tableau 4. Caractéristiques des sédiments stockés dans les unités fluviales de Pierre-Bénite

Unité	Nombre d'observations	Surface (km ²)	Ép. Sédiment fin (m)	Vol. Sédiment fin (10 ⁶ m ³)	Ép. Graviers (m)	Vol. Graviers (10 ⁶ m ³)
Champ d'épis	36	0,29	1,21	0,35	7,13	2,08
Casier	306	0,96	1,43	1,37	8,14	7,79
Plaine jeune	204	1,4	1,32	1,85	8,43	11,82
Plaine ancienne	73	4,55	1,39	6,32	8,41	38,22

Tableau 5. Caractéristiques des sédiments stockés dans les unités fluviales de Péage-de-Roussillon

Unité	Nombre d'observations	Surface (km ²)	Ép. Sédiment fin (m)	Vol. Sédiment fin (10 ⁶ m ³)	Ép. Graviers (m)	Vol. Graviers (10 ⁶ m ³)
Champ d'épis	159	0,34	0,45	0,15	3,33	1,13
Casier	174	0,44	1,44	0,63	3,22	1,42
Plaine jeune	77	1,35	2,49	3,35	3,53	4,75
Plaine ancienne	742	4,45	2,16	9,58	4,96	22,03

Tableau 6. Caractéristiques des dépôts enregistrés au niveau des unités fluviales à Donzère -Mondragon

Unité	Nombre d'observations	Surface (km ²)	Ép. Sédiment fin (m)	Vol. sédiment fin (10 ⁶ m ³)	Ép. Graviers (m)	Vol. Graviers (10 ⁶ m ³)
Champ d'épis	20	0,58	1,44	0,84	4,61	2,67
Casier	355	2,78	2,64	7,32	4,53	12,58
Plaine jeune	71	6,61	2,1	13,9	5,44	35,93
Plaine ancienne	58	1,69	1,12	1,89	6,07	10,28

PBN (tableau 4) est caractérisé par des épaisseurs de sédiments fins globalement plus faibles que les deux autres secteurs (tableau 5 et 6) au niveau de la plaine ancienne et de la plaine jeune. Les épaisseurs de sédiment fin sont du même ordre de grandeur quel que soit le compartiment étudié. Pour les graviers, elles sont particulièrement élevées et homogènes par rapport aux autres secteurs. Au niveau des champs d'épis, la quantité de grossier est relativement conséquente. Les casiers stockent aussi une quantité assez importante de grossier : 5,5 fois plus qu'à Péage-de-Roussillon. Ces sédiments grossiers, relictuels de l'ancien lit majeur du Rhône, sont à considérer au regard de l'incision considérable du chenal sur ce secteur. Ils sont donc d'un point de vue opérationnel très limités dans leur possibilité de remobilisation.

Sur le secteur de PDR, les épaisseurs moyennes de sédiments fins sont inférieures à celles de Pierre-Bénite en ce qui concerne les champs d'épis mais équivalentes pour les autres compartiments. Avec une valeur moyenne de 1,42m, elles sont globalement inférieures à celles enregistrées à Donzère-Mondragon. Le ratio épaisseur de sédiment [grossier/ fin] sur le secteur de Péage-de-Roussillon est de 2,7. Sur ce site, ce n'est pas dans les casiers que l'on observe les épaisseurs de sédiments fins les plus élevées, mais au niveau de la plaine jeune. La distribution des épaisseurs dans les différentes unités est plus variable à Donzère-Mondragon. Pour le gravier, c'est sur la plaine ancienne que les épaisseurs sont les plus élevées, avec presque 5 m de sédiment grossier. Ce stock de sédiment grossier est probablement un reliquat de l'ancien lit divaguant du Rhône. Les sédiments fins s'y retrouvent aussi avec une épaisseur plutôt élevée (2,16 m), constituant ainsi un stock conséquent de sédiments fins.

La plaine jeune de Péage-de-Roussillon présente des caractéristiques intermédiaires aux casiers et à la plaine ancienne : l'épaisseur moyenne de graviers y est plus faible que dans la plaine jeune de Donzère-Mondragon et l'épaisseur moyenne de sédiment fin est élevée, avoisinant les 2,5m. Les plaines anciennes et jeunes montrent des épaisseurs de sédiments fins plus importantes que les casiers, révélatrices d'un Rhône qui stocke davantage de fines sur ses marges éloignées que sur ses marges les plus proches.

Au niveau des champs d'épis, le gravier est dominant et peu de sédiment fin le recouvre. C'est donc un stock à considérer à des fins opérationnelles pour une remobilisation. Les casiers s'avèrent être aussi de bons candidats pour la recharge du fait de leur proximité au chenal. Néanmoins, ils sont recouverts par de plus grandes épaisseurs de sédiments fins et constituent un stock proportionnellement plus faible qu'à Donzère-Mondragon. Concernant la qualité des sédiments fins surmontant le stock de graviers, les conseils de précautions concernant les risques éco-toxicologiques potentiels restent les mêmes que sur l'ensemble du linéaire rhodanien.

Sur le secteur de Donzère-Mondragon, le ratio épaisseur de sédiment [grossier/fin] est de 2,5. Toutefois, la distribution des stocks sédimentaires est très différente selon le compartiment alluvial. Pour le sédiment fin, les épaisseurs estimées sont plus grandes dans les casiers et la plaine jeune. En ce qui concerne le sédiment grossier, les épaisseurs moyennes sont plus grandes au niveau de la plaine jeune et de la plaine ancienne. Le stock de sédiment grossier dans la plaine alluviale est probablement là encore un reliquat de l'ancien lit divaguant du Rhône.

Les fines, quant à elles, sont le reflet des processus alluviaux récents : le vieux-Rhône, avec son débit de crue laminé par la dérivation dépose des sédiments fins au niveau de ses marges protégées

par des digues. En revanche, au niveau des champs d'épis (plus dynamiques), le grossier est dominant. C'est donc un stock dont le Rhône pourrait disposer aisément du fait de leur position dans le chenal et leur accessibilité (peu de sédiment fin les recouvrant). Les casiers s'avèrent être aussi des bons candidats pour fournir du sédiment grossier au chenal actif. Néanmoins, ils sont recouverts par de plus gros volumes de sédiments fins, eux aussi à considérer en regard du risque éco-toxicologique potentiel qu'ils représentent.

4.3. Discussion sur les bilans volumétriques inter-secteurs

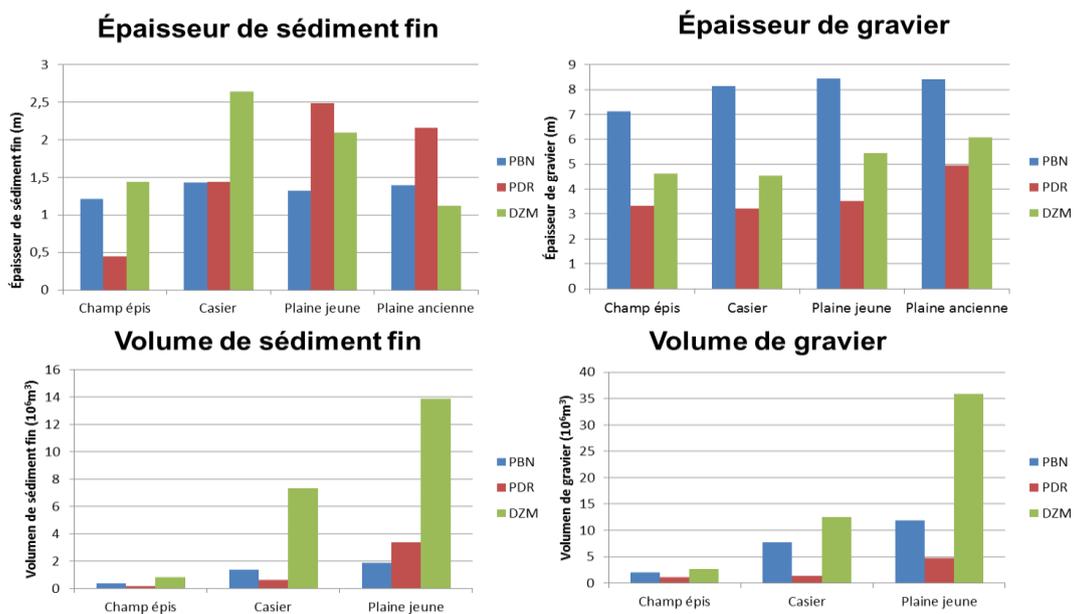


Figure 15. Comparaison des épaisseurs et volumes de sédiments fins et graviers pour les secteurs de Pierre Bénite, Donzère-Mondragon et Péage de Roussillon

La Figure 12 synthétise les tendances identifiées lors de l'analyse par secteur :

- Pierre-Bénite présente des caractéristiques très particulières. Les épaisseurs de sédiments fins y sont homogènes quel que soit le compartiment. Il en va de même pour les épaisseurs de graviers. Les volumes associés aux sédiments fins sont très faibles tandis que les estimations volumiques de grossier sont modérées. L'incision précoce de ce secteur pourrait expliquer une déconnexion rapide des marges et donc une sédimentation fine très faible. Le grossier serait un reliquat du Rhône du 19^{ème} siècle et résulte ainsi d'une forte incision du lit dans la plaine alluviale.
- Péage-de-Roussillon présente des stocks sédimentaires très faibles en rapport aux autres secteurs. Son incision est beaucoup plus modérée que celle observée à Pierre Bénite. Somme toute relativement faibles, les stocks de grossier les plus disponibles (recouverts par de faibles épaisseurs de sédiments fins) sont dans les champs d'épis et les casiers. Les épaisseurs de sédiments fins sont plus grandes dans la plaine que dans les casiers.
- Les épaisseurs de sédiments à Donzère-Mondragon témoignent d'un stockage sédimentaire assez attendu : le grossier (reliquat de l'ancien lit) est plutôt abondant ; essentiellement du fait de l'incision du lit ; mais il est recouvert par des fines également abondantes. Ces sédiments fins sont principalement stockés dans les casiers et dans une moindre mesure dans la plaine. Ainsi qu'en témoignent les épaisseurs plus grandes de sédiment fin, les champs d'épis sont plus déconnectés et donc plus sédimentés que dans les autres secteurs.

5. Analyse de la sédimentation

5.1. Taux de sédimentation des sédiments fins (sondages à la perche)

Pour le calcul des taux de sédimentation associés aux périodes de début d'atterrissement, notamment la période antérieure à 1860, l'âge des ouvrages a été utilisé car ces ouvrages ont affecté la sédimentation de la zone où le sondage a été réalisé. Si l'atterrissement de cette zone n'a été influencé par aucun ouvrage (digue), la date de début de sédimentation est alors déterminée à partir d'une photo-interprétation (surface en eau à l'année n mais atterrie à l'année n+x).

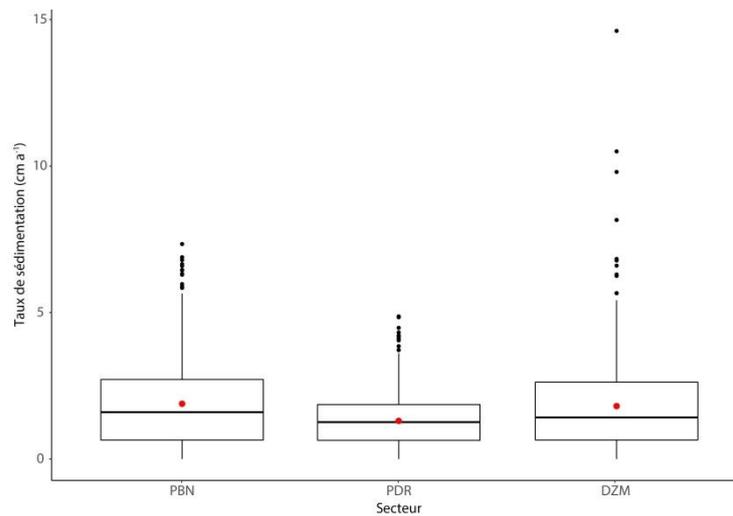


Figure 16. Boîte à moustache montrant les taux de sédimentation pour les secteurs de Pierre Bénite, Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon

Concernant les taux moyens de sédimentation des fines, les étendues des boxplots sont globalement chevauchantes (Figure 13) : il n'y a pas de différences marquées entre les trois secteurs d'étude. C'est à Péage-de-Roussillon que le taux de sédimentation est le plus faible, avec 1,30 cm/an, contre 1,81cm/an à Pierre-Bénite et 1,89cm/an à Donzère-Mondragon.

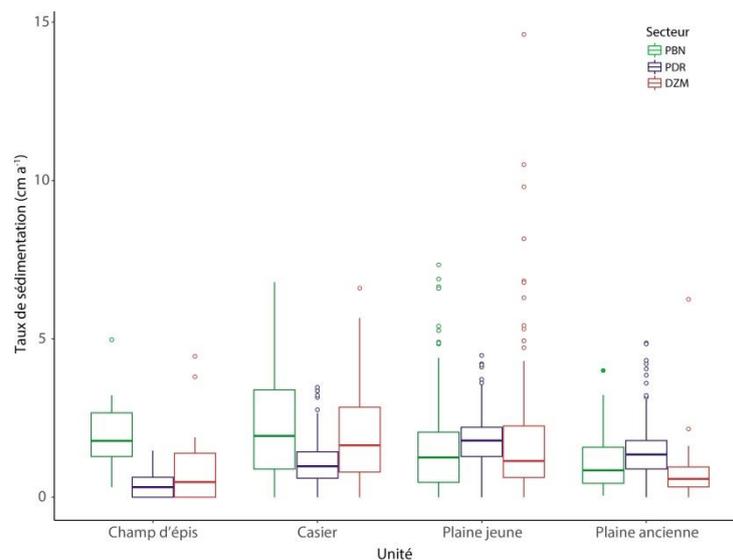


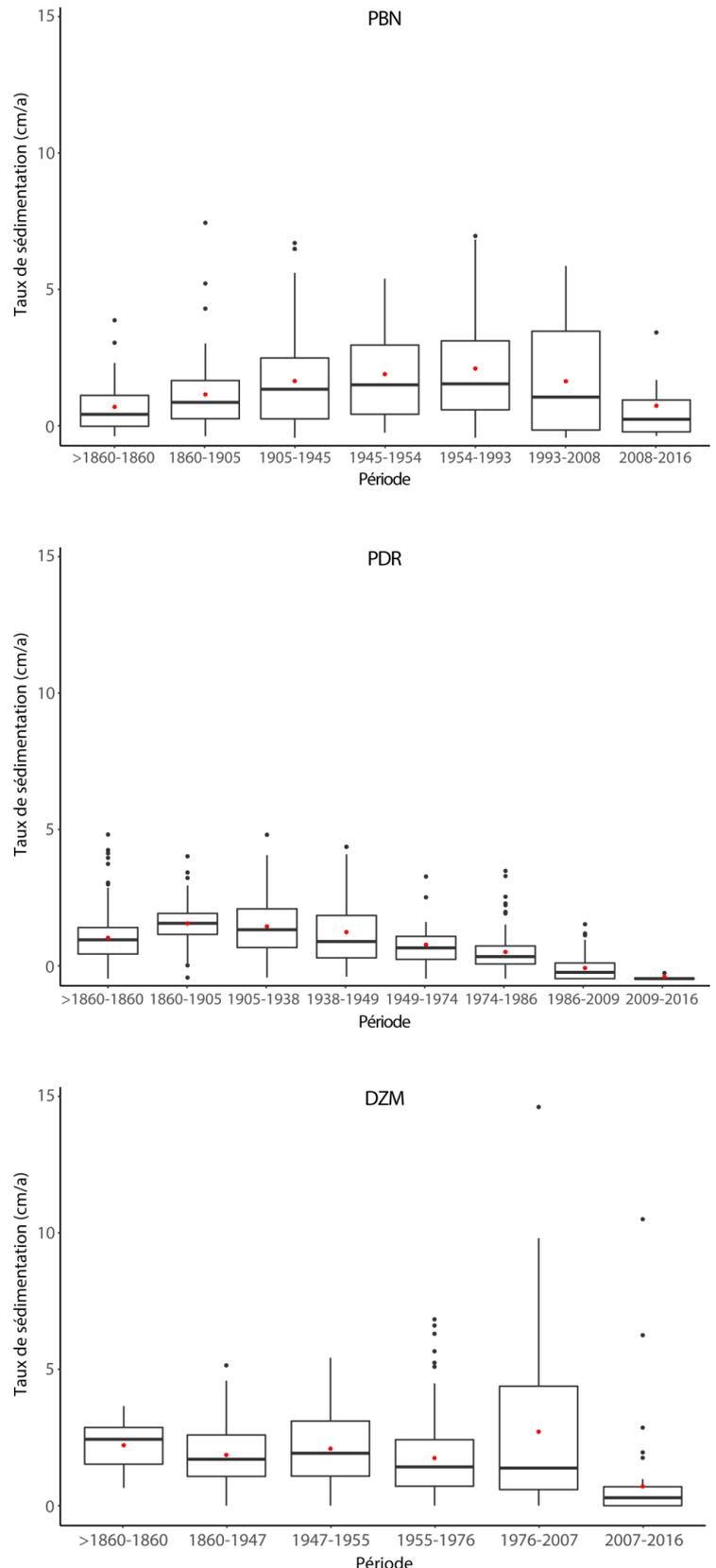
Figure 17. Distribution des taux de sédimentation dans les différentes unités fluviales pour les secteurs de Pierre Bénite, Donzère-Mondragon et Péage-de-Roussillon

En comparant les taux moyens de sédimentation par compartiment alluvial, nous constatons une hétérogénéité selon les sites (Figure 14). A Pierre-Bénite, les taux les plus élevés sont associés aux champs d'épis et aux casiers et ils sont plus faibles sur les deux unités dans les plaines. Péage-de-Roussillon présente un patron inverse, avec des taux plus importants dans la plaine jeune et la plaine ancienne que dans les casiers ou encore les champs d'épis. Finalement, à Donzère-Mondragon, ce sont les casiers et la plaine jeune qui ont enregistré les taux les plus forts, comparés aux champs d'épis ou la plaine ancienne. Ces compartiments, caractérisés par une connectivité plutôt modérée, reçoivent des sédiments fins qu'ils accumulent (peu de remobilisation), contrairement au champ d'épis où la dynamique hydraulique permet leur lessivage.

Les taux moyens de sédimentation ont été affinés au regard des dates de début de sédimentation (Figure 15) : l'ajout de cette variable temporelle met en avant une importante variabilité intra et inter-secteurs.

Pour le secteur de Pierre-Bénite, les taux de sédimentation sont croissants depuis 1860 jusqu'à un maximum médian de 2,3 cm/an sur la période 1954-1993 (Figure 12). Pour la période suivante, le taux de sédimentation diminue. A Péage-de-Roussillon, l'évolution des taux de sédimentation diffère de celle observée à Pierre Bénite. Les taux les plus importants sur les surfaces émergées sont observés sur la période 1860-1905 (1,83 cm/an). Ils enregistrent une forte diminution sur les surfaces émergées, pour arriver jusqu'à une valeur de 0,2 cm/an au cours de la période la plus récente. La tendance observée à Donzère-Mondragon est assez semblable à celle de Péage-de-Roussillon ; bien que moins marquée ; avec des taux de sédimentation allant décroissant des périodes les plus anciennes aux périodes les plus récentes. En outre, il est à noter qu'il y a une forte variabilité des taux de sédimentation des surfaces végétalisées entre 1976 et 2007 à Donzère-Mondragon.

Figure 18. Distribution des taux de sédimentation en fonction des différentes périodes marquant le début de la végétalisation et la sédimentation fine associée pour les secteurs de Pierre Bénite, Péage de Roussillon et Donzère-Mondragon



5.2. Analyse des patrons de sédimentation

Pour approfondir la compréhension des processus de sédimentation, des carottes sédimentaires ont été étudiées afin d'obtenir des profils granulométriques et chimiques en ETM (Eléments Traces Métalliques). La distribution de la taille des particules suivant la profondeur (Figure 17) permet de mieux interpréter les phases de remplissage sédimentaire et de proposer des scénarios de sédimentation pour chaque secteur. Le couplage de ces résultats avec l'évolution planimétrique des sites (Figure 18), constitue une aide à l'interprétation.

Cette approche est également complétée par une approche géophysique à partir de profils obtenus par radar géologique ou GPR (Ground Penetrating Radar) afin de bien caractériser le contexte sédimentaire environnant. Une série de sondages à la perche renforce l'interprétation des radargrammes (figure 19).

Des analyses chimiques sont en cours sur PBN et DZM dans le cadre d'OSR5, notamment des datations C14 permettant de confirmer ou infirmer les interprétations proposées dans ce rapport.

5.2.1. Sédimentation dans la plaine

Cinq carottes ont été prélevées sur le site de Pierre Bénite (Figure 16 et 17). A l'exception des carottes C18, elles sont plutôt courtes. Comme cela a pu être aussi observé sur Péage-de-Roussillon (Rapport N°1, section 4.2.4.), ces carottes se caractérisent par des changements granulométriques très contrastés. La partie la plus basse est très souvent sableuse rendant compte de stations hydrauliquement actives, très connectées au fleuve alors que la partie récente se caractérise par une sédimentation plutôt limoneuse, typique de plaines alluviales déconnectées et marquées par des écoulements de faible énergie.

La rupture granulométrique sur C3c (Figure 17) est associée à la mise en débit réservé de ce secteur, événement qui a accéléré son atterrissement comme le souligne la séquence de photographie (Figure 18). Les autres ruptures semblent davantage imputables à la mise en place des ouvrages Girardon. Si ces interprétations sont vérifiées dans le cadre des analyses complémentaires d'OSR5, alors les taux de sédimentation calculés pour le 20^{ème} siècle varieraient de 0,17 cm/an sur les marges externes du site à 0,30-0,45 cm/an sur les autres stations, ce qui serait finalement relativement faible par rapport aux observations précédentes.

SONDAGES ET GPR À PBN

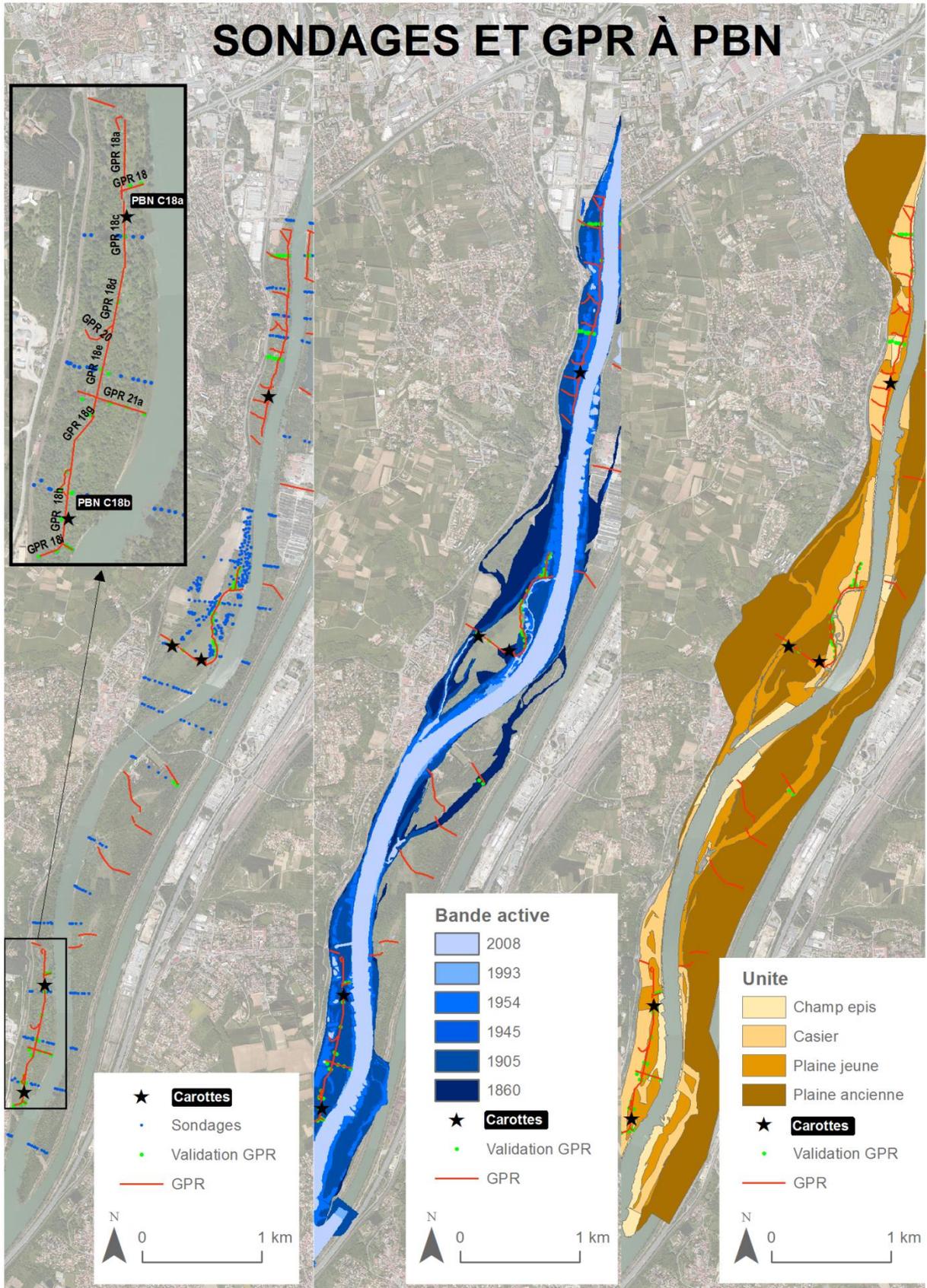


Figure 19. Localisation sur le site de Pierre Bénite des profils GPR, des carottes sédimentaires et des sondages à la perche (voir en Annexe 4 pour DZM)

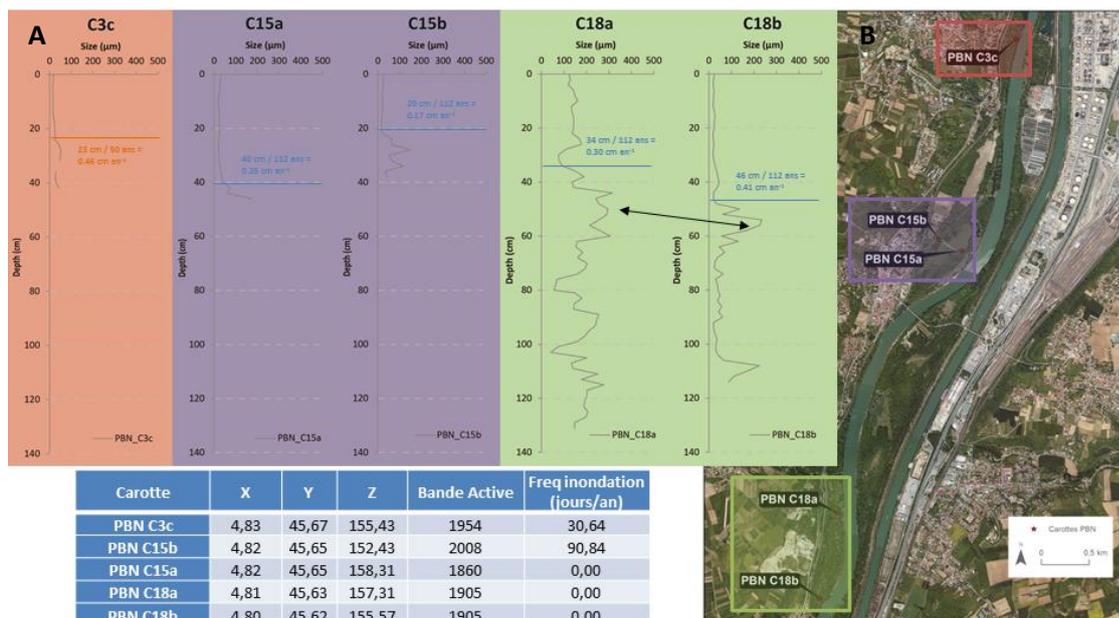


Figure 20. A) Granulométrie (D50, ligne de couleur grise) et B) Localisation des carottes à Pierre Bénite

Les lignes transversales bleues, et oranges représentent nos hypothèses de sédimentation et le taux de sédimentation moyen associé. Bleu représente l'étape post Girardon et orange, étape post-dérivation (RCC).

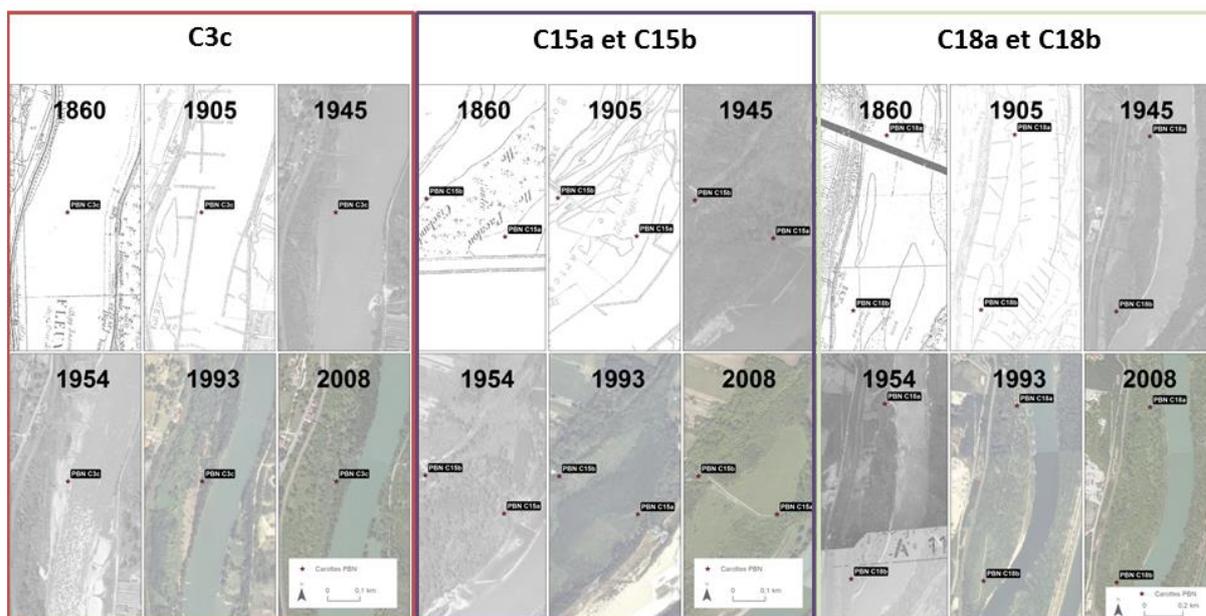


Figure 21. Evolution planimétrique des sites sur lesquels ont été prélevées les carottes de Pierre Bénite

Une analyse plus détaillée est effectuée sur les carottes C18b et C18c car nous disposons également sur ce secteur de nombreux profils GPR. Les Figures 16, 17B et 18 nous permettent de localiser les carottes et profils GPR en regard des évolutions géo-historiques et des unités alluviales. Cette méthodologie intégrative permet de rapprocher les caractéristiques stationnelles et les résultats granulométriques (Figure 17A) afin de proposer une interprétation de l'histoire hydrosédimentaire de ces sites.

Une rupture très marquée est observée sur les carottes C18b et C18c, soulignant une modification significative des conditions d'énergie dans la plaine. La C18b intègre toute l'histoire du 20^{ème} siècle, et une partie du 19^{ème} (vérifié avec les séries photographiques, Figure 18). Elle rend compte de la dynamique d'un bras antérieurement actif (venues sableuses) qui par la suite, connaît une perte d'activité. Dans la carotte, ceci se traduit par une première rupture bien visible, interprétée comme étant liée à une déconnection du site par les ouvrages Girardon (au niveau du trait bleu -Figure 17). La carotte C18a est localisée en amont de ce bras, et de la sorte, enregistrerait plutôt des entrées sableuses en débordement.

Lorsque nous calculons les taux de sédimentation moyens sur la base de ces hypothèses, les valeurs sont inférieures à celles indiquées précédemment, entre 0,3 et 0,4 cm/an. Cette hypothèse ne peut malheureusement pas être confortée par les résultats de la datation au Césium 137 et au Plomb 210. Nous avons été amenés à réaliser de nouveaux prélèvements pour aboutir à une datation au C14 des parties basses des carottes (possibilité de déterminer une datation dans le 19^{ème} siècle).

Le profil GPR 18i, partiellement transversal à la plaine alluviale (Figure 16), permet de bien rendre compte de l'ancien lit de débordement (Figure 19). En effet, les réflecteurs laissent facilement deviner la délimitation de l'ancien chenal (en jaune) et les structures de remplissage adjacentes. Sur le profil 18h, une sédimentation fine uniforme sur près de 2m est confirmée sur tout le continuum à la fois par les sondages à la perche et par le radargramme. Sur ce dernier, on observe des réflecteurs bien marqués aux alentours de 2m (en rouge), agencés parallèlement à la surface, surplombés par une couche à l'aspect uniforme, elle-même dominée par une autre couche délimitée par un réflecteur épais et régulier (en vert). En outre, on observe bien la séquence correspondante dans la carotte C18b (Figure 19) : deux couches limoneuses, sableuses (22 à 72cm et 99 à 123cm) sont séparées par une séquence « argiles et limons » (72 à 99cm).

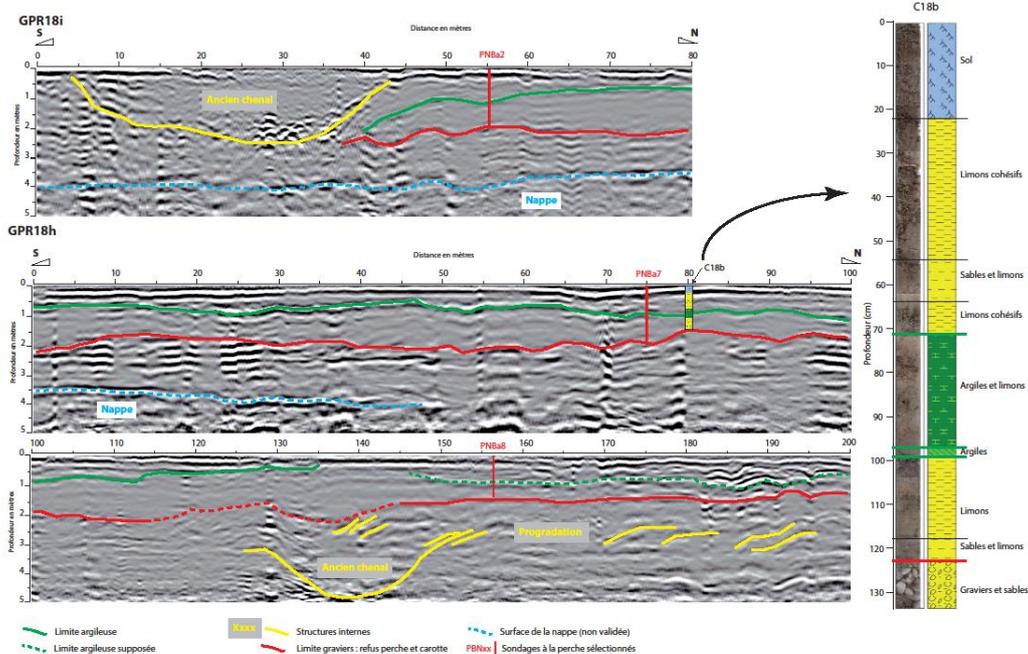


Figure 22. Profils GPR réalisés sur le secteur de prélèvement des carottes C18a et C18b à Pierre Bénite. - Profils 18i et h (partie aval du bras de débordement). Voir Figure 13 pour leur localisation

La Figure 20 rend compte des structures stratigraphiques sur la partie amont du bras. Un tenon est bien identifié sur la partie la plus amont du profil GPR 18a ainsi que l'ancienne fosse de dissipation d'énergie à l'aval immédiat de l'ouvrage. Le secteur amont est maintenant sédimenté sur près de 4m par des sables entrant par débordement et se déposant rapidement du fait de la rugosité végétale. Une rupture granulométrique est visible sur la carotte C18a mais la partie sommitale reste plutôt sableuse dans ce secteur, confirmant ce contexte débordant, de forte énergie. L'épaisseur de fine se réduit progressivement de l'amont vers l'aval pour atteindre 2m sur le profil GPR18d, ce qui est concordant avec les sondages à la perche disponibles. Il semble que l'on distingue des formes de progradation des sables.

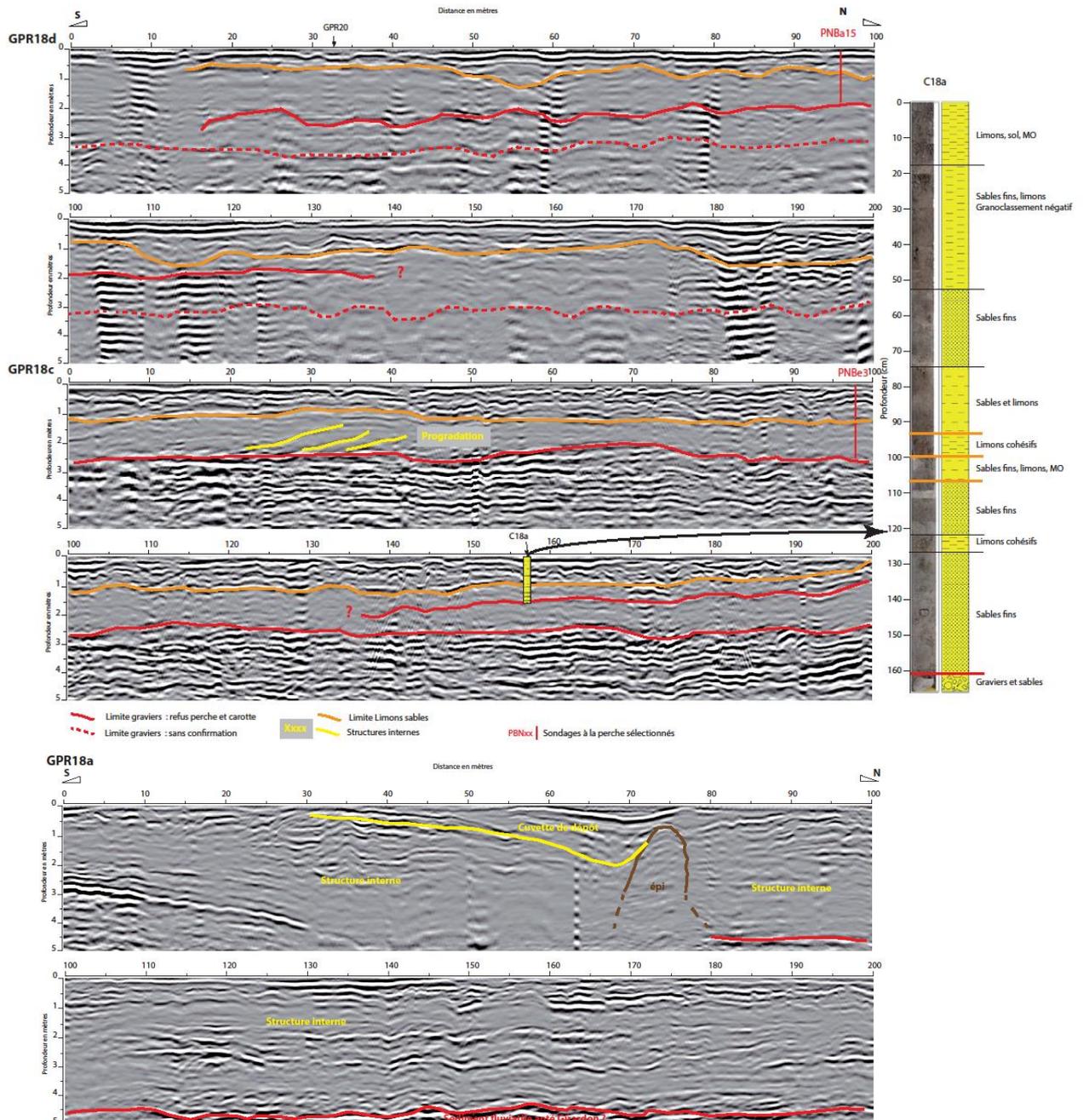


Figure 23. Profils GPR réalisés sur le secteur de prélèvement des carottes C18a et C18b à Pierre Bénite. - Profils 18a, c et d (partie aval du bras de débordement). Voir Figure 16 pour leur localisation.

Comme sur les sites de PDR et de PBN, l'analyse de la sédimentation est également abordée sur DZM en s'appuyant sur une analyse fine de carottes sédimentaires (Figures 21 et 22). La stratigraphie à partir de profils GPR est malheureusement difficile à valider ici par des sondages à la perche car les campagnes n'ont pas été effectuées aux mêmes endroits. Cinq carottes ont été prélevées sur le site de Donzère. A l'exception de la C2, elles sont plutôt longues (>1,5m). Comme cela a été observé sur PBN et PDR, ces carottes se caractérisent par des séquences granulométriques très contrastées.

Les carottes C2 et C10, éloignées du chenal et localisées sur des surfaces anciennes, n'ont sans doute pas enregistré de sédimentation récente (20^{ème} siècle). En effet, on associe les changements granulométriques aux changements hydrauliques consécutifs à la construction des ouvrages Girardon ou à la mise en RCC. Dans les carottes étudiées qui enregistrent une sédimentation, ces événements sont généralement caractérisés par un passage d'une granulométrie sableuse à limoneuse. Sur ces deux carottes, cette diminution franche de la granulométrie n'est pas visible. Néanmoins, sur la carotte C2, on observe une légère rupture à 50cm. On peut l'interpréter comme la conséquence d'un changement de dynamique du bras, évoluant de bras principal à bras secondaire, ayant enregistré une brève phase de sédimentation au tout début de sa déconnexion (séquence de la carotte C2 entre 0 et 45 cm).

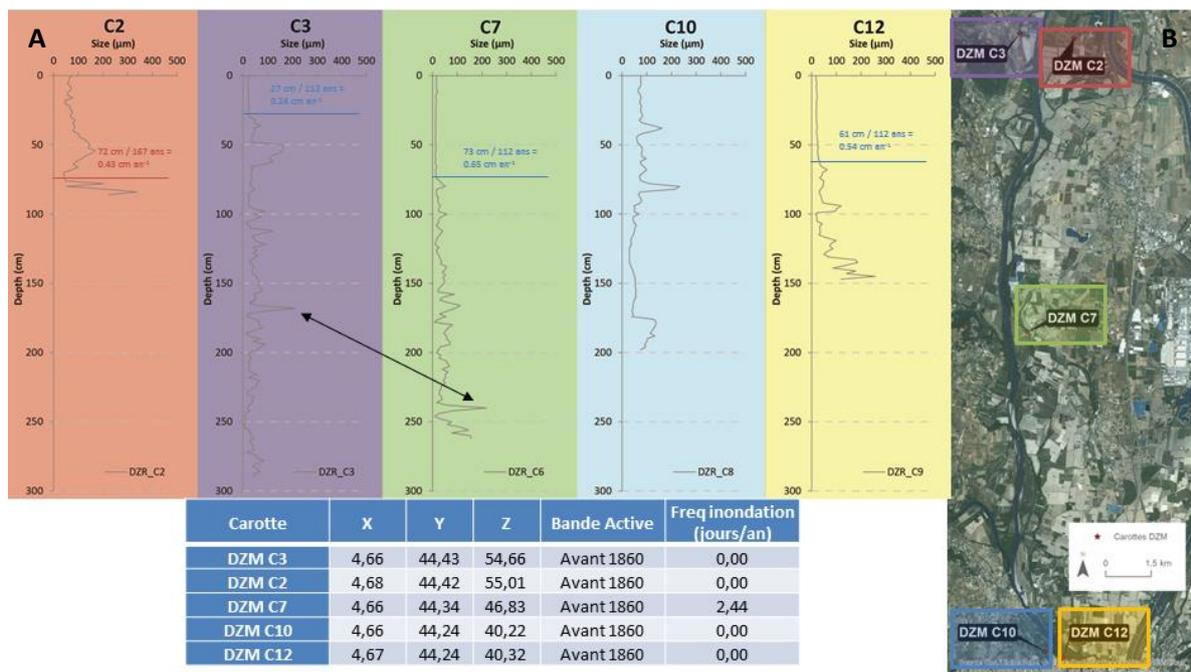


Figure 24. Carottes sédimentaires réalisés sur le secteur de Donzère A) Profil de la granulométrie (D50, ligne de couleur grise) et B) Localisation des carottes sur le site

Les lignes transversales bleues, et rouges représentent nos hypothèses de sédimentation et le taux de sédimentation moyen associé. Rouge représente un changement de dynamique de bras principal à bras secondaire dans le courant du 19^{ème} siècle, et Bleu, la rupture associée aux ouvrages Girardon.

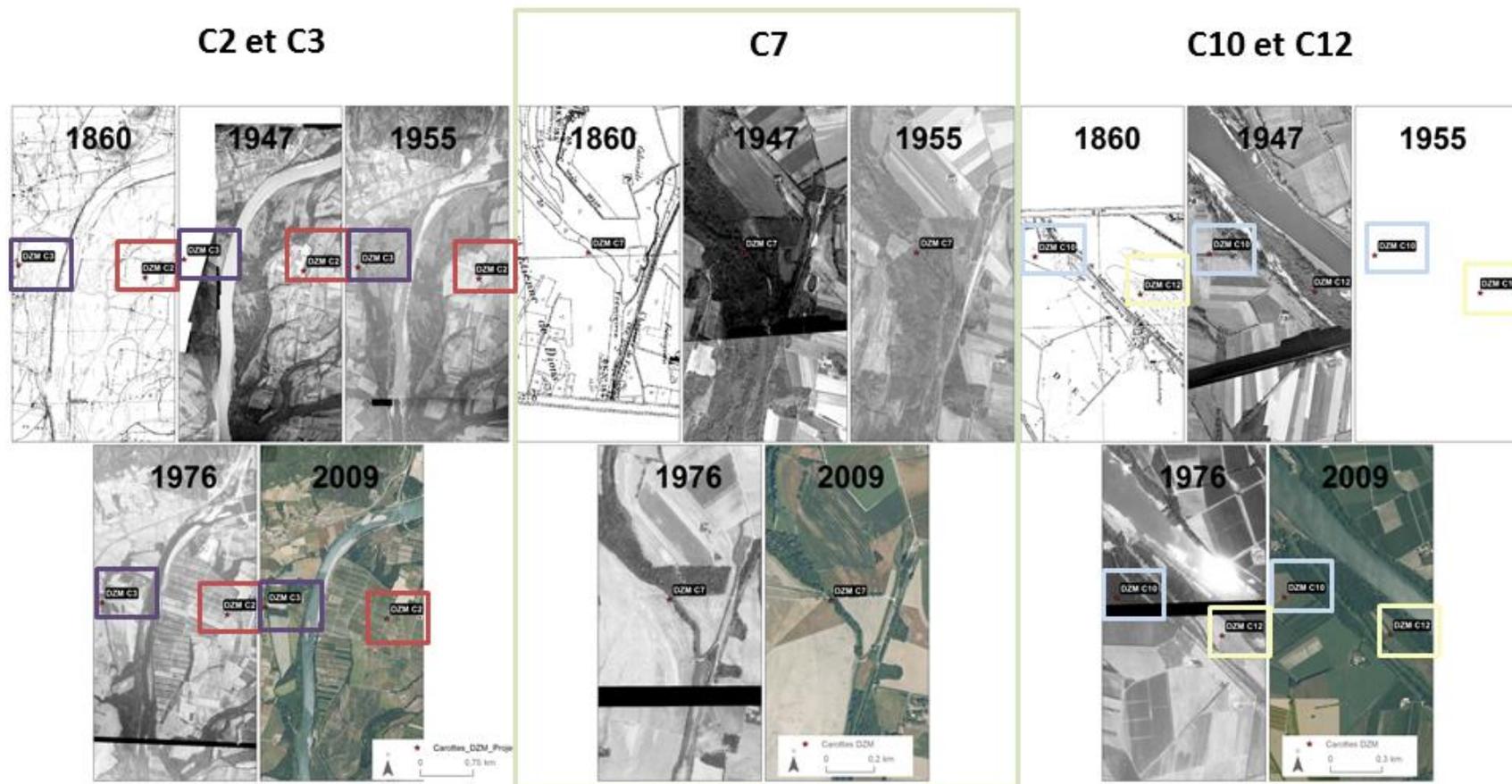


Figure 25. Evolution planimétrique des sites sur lesquels ont été prélevées les carottes de Donzère

La Figure 21 montre une rupture assez claire pour les carottes C3, C7 et C12. L'analyse planimétrique confirme que ces zones se sont bien atterries au début du 20^{ème} siècle (Figure 22). Ce sont des carottes ainsi caractérisées par un long enregistrement, couvrant potentiellement les deux derniers siècles de sédimentation, voire plus. Sous ces hypothèses, les taux moyens de sédimentation pour ces trois carottes varient de 0,24 cm/an à C3 à 0,67 cm/an à C7. Par ailleurs, à PBN et à DZM, nous ne disposons pas encore des analyses ETM par *Core scanner*. Par conséquent, ces analyses supplémentaires permettront d'affiner les hypothèses sur la chronologie des dépôts (cf. tronçon modèle Péage-de-Roussillon, Rapport n°1, section 4.2.4). Aussi, ces premières interprétations seront encore à confirmer grâce aux méthodes de datation.

5.2.2. Sédimentation dans les casiers

La sédimentation dans les casiers a également fait l'objet d'une attention particulière. Des profils GPR couplés à des sondages à la perche ont permis de bien identifier les structures stratigraphiques. Ces profils ont été réalisés longitudinalement au Rhône afin de recouper perpendiculairement une série de casiers à Pierre Bénite et à Péage-de-Roussillon (Figures 23 et 24).

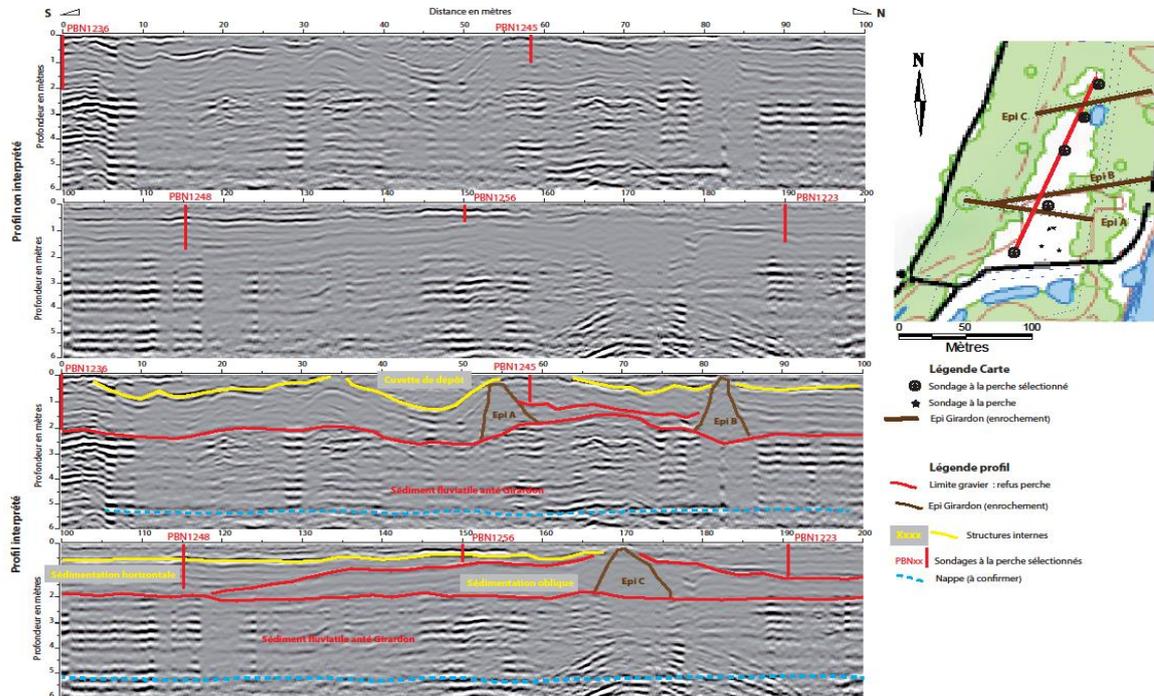


Figure 26. Profil GPR réalisé longitudinalement dans une série de casiers sur le secteur de Pierre Bénite à l'amont immédiat du bras restauré de Cislande

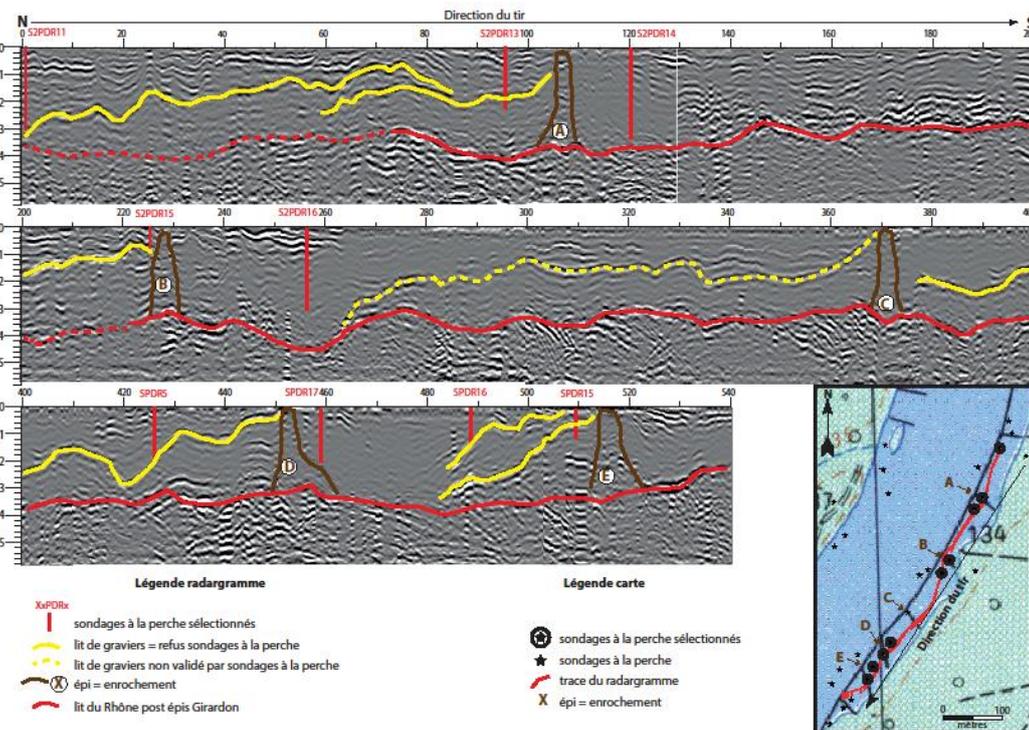


Figure 27. Profil GPR réalisé longitudinalement dans une série de casiers sur le secteur de Péage de Roussillon dans le secteur de l'île des graviers

Ces profils permettent de souligner plusieurs points importants :

- Les tenons jouent un rôle très particulier en favorisant la présence de fosses de dissipation à l'aval immédiat de chacun d'eux. Ces fosses constituent des ajustements morphologiques résultant des modifications hydrauliques induites par ces ouvrages. Ceci se caractérise aussi par des dépôts graveleux dans la partie plus aval des casiers. Cet agencement géomorphologique s'est probablement mis en place au tout début du 20^{ème} siècle lorsque l'hydrologie du Rhône n'était pas encore modifiée.
- Les sondages à la perche et les profils GPR ne sont pas toujours concordants. Dans la couche sédimentaire limono-sableuse, on remarque des venues graveleuses dont la résistance à la perche a pu être confondue avec celle du toit de galets. La perche bloque alors sur la venue graveleuse ce qui ne permet pas de sonder les couches limono-sableuses situées en-dessous. En conséquence, la profondeur du toit de galets y est sous-estimée. Ce type de sédimentation est typique des casiers. En effet, les casiers sont marqués par une connectivité hydraulique particulière, contrastée ; celle-ci est à l'origine de ces séquences granulométriques hétérogènes (avec venues graveleuses). A noter que les autres unités de la plaine sont soumises à une sédimentation plus homogène. De la sorte, on ne rencontre pas ce problème méthodologique pour ces autres unités alluviales.
- La sédimentation qui démarre dans les casiers après la mise en RCC est donc complexe, à la fois sablo-limoneuse et parfois graveleuse en fonction de l'intensité des événements de crue.
- Ceci confirme également que les graviers présents dans les casiers correspondent pour partie à des remaniements du fond des casiers mais aussi à des apports sédimentaires. Il est donc probable que ces graviers soient plutôt de petites tailles comparativement à ceux qui constituent le lit.
- La sédimentation qui démarre après la mise en RCC se manifeste donc sur une morphologie atterrie bien souvent complexe qui explique que les taux de sédimentation peuvent être très variables à l'intérieur des casiers. Ils peuvent être notamment très élevés dans les anciennes fosses.

5.2.3. Facteurs de contrôle de la sédimentation dans les casiers

Ces éléments stratigraphiques montrent que la connectivité des casiers avec le lit principal joue un rôle clé pour expliquer la sédimentation et la nature de cette sédimentation. C'est pourquoi nous avons complété cette étude par une seconde approche permettant d'analyser en inter- et intra-tronçon la variabilité des conditions de sédimentation de ces casiers : nous confrontons les modalités de cette sédimentation avec les facteurs qui affectent la connexion (Figures 25 à 29). Nous avons également repris les données du modèle 1D afin de déterminer les forces tractrices au droit des casiers pour des crues courantes (Q5) (Figures 28, 29, annexes 6, 7 et 8). Dans les casiers, nous observons des patrons d'atterrissement (basés sur une analyse d'images aériennes) et de sédimentation (à partir de sondages à la perche) distincts selon les secteurs étudiés (PBN, PDR, MON et DZM). La connectivité hydrologique actuelle des casiers est décrite en fonction de la durée en jours/an et la fréquence en événements par

an de submersion de la digue longitudinale, ainsi que la hauteur relative de la digue longitudinale par rapport au niveau de la ligne d'eau à un débit de 100 m³/s, ces variables étant dérivées des modèles de submersion de Džubáková et al. (2015).

L'évolution historique de la connectivité des casiers est évaluée à partir de l'analyse de l'évolution de la géométrie du chenal principal court-circuité (incisions/exhaussements), à partir des données du talweg de Parrot (2015) et de la ligne d'eau entre 1902 (données issues du rapport officiel Ponts et Chaussées, 1910 ; Bravard, 2010) et 2010 (données issues de la BDT, IGN). Ce changement de la ligne d'eau reflète à la fois l'évolution de la géométrie du chenal principal court-circuité, ainsi que l'impact des barrages.

Globalement, les casiers des différents secteurs ont vu un fort atterrissement entre les années 1940, environ 60 ans après le début de la phase de l'aménagement Girardon et juste avant les premières dérivations, et les années 2000 : tandis que 9,9% des casiers étaient terrestres sur plus de 90% de leur surface (moyenne = 42,9%) dans les années 1940, nous en comptons 79,6% dans les années 2000 (moyenne = 90,8%). Nous constatons une homogénéisation des conditions intra-secteur (écart type₁₉₄₀ = ±29,5% ; écart type₂₀₀₀ = ±20,3%) et une amplification des différences inter-secteurs, due à des vitesses d'évolution différentes entre les quatre secteurs. En moyenne, les conditions d'atterrissement étaient relativement similaires entre PBN (36,3% terrestres), PDR (43,7%) et DZM (34,3%) dans les années 1940. Seul MON montrait un atterrissement plus fort (69,5% en moyenne). Entre 1940 et 2000, les trajectoires d'évolution semblent avoir divergé entre les secteurs et souvent nous observons un changement des trajectoires par rapport à la période avant 1940 : ce sont les secteurs de PBN et MON qui montrent les moyennes d'atterrissement actuelles les plus importantes. Celles-ci sont de 97,6% et 97,1%, respectivement. A DZM et PDR les valeurs moyennes sont plus faibles, atteignant 87,2% et 80,8%, respectivement.

Ces patrons planimétriques diffèrent pour partie des patrons de sédimentation. Nous enregistrons sur des surfaces émergées avant la dérivation les épaisseurs moyennes les plus importantes à PDR (362 cm) et DZM (343 cm). A PBN et MON elles se montrent plus faibles, à 218 cm et 193 cm, respectivement. Sur les surfaces émergées après la dérivation, les épaisseurs étaient en moyenne de 345 cm (DZM), 245 cm (MON), 160 cm (PDR) et 126 cm (PBN). Afin de tenir compte des différentes durées des périodes pré- et post-dérivation, nous avons également considéré des valeurs normalisées par l'âge moyen de la surface, qui a été déterminé à partir d'une analyse d'images aériennes. Ainsi, les taux annuels moyens de sédimentation les plus élevés sont observés à PDR (4,5 cm/an) et DZM (4,2 cm/an). A PBN et MON ils étaient dans l'ordre de 2,7 cm/an et 2,5 cm/an, respectivement. Nous constatons également des taux annuels moyens importants sur les surfaces post-dérivation, de 6,8 cm/an à DZM, 6,0 cm/an à PDR, 5,1 cm/an à MON et 3,4 cm/an à PBN.

5.2.4. Taux d'atterrissement et facteurs de contrôle

Les analyses bivariées des taux d'atterrissement et des facteurs de contrôle (fréquence de connexion, forces tractrices) ne montrent généralement pas de lien direct entre les deux. Ceci est sans doute dû au fait que les facteurs qui contrôlent cette sédimentation varient à la fois spatialement et temporellement. Afin de faciliter l'interprétation des différents patrons d'atterrissement et de sédimentation ainsi que des liens complexes avec les facteurs de contrôle, et hiérarchiser l'effet de chacun d'eux, nous avons examiné les patrons longitudinaux au sein de chaque secteur (Figures 25, 26, 27 et 28, annexes 5 à 8). Cette analyse montre des conditions d'atterrissement qui varient à l'échelle locale, avec une organisation plutôt en sous-secteurs, avec néanmoins de grandes variabilités locales. Cela explique les différences dans l'évolution temporelle et l'état contemporain des quatre secteurs. On voit ainsi que le rôle respectif de chacun des facteurs de contrôle varie significativement selon les conditions locales.

Les patrons d'atterrissement et les taux de sédimentation sont très variables longitudinalement montrant que des facteurs locaux les régissent certainement :

- A PBN (Figure 25), 3 principaux sous-secteurs sont observés : globalement les taux augmentent progressivement du Pk 6 au 8 et se réduisent ensuite jusqu'au Pk 10. Ce patron sinueux est en résonance avec l'évolution longitudinale des forces tractrices mais aussi avec la hauteur de la digue observées sur la Figure 28. Quand les forces tractrices augmentent du Pk 8 au Pk 10 et la hauteur de la digue s'abaisse, les taux de sédimentation tendent à se réduire ; on dispose de conditions hydrauliques de moins en moins favorables au dépôt. Dans la partie aval (Pk 12-14), là aussi un gradient de sédimentation se manifeste avec une réduction des taux vers l'aval. Ceci est en lien avec une remontée de la ligne d'eau du fait du contrôle amont et de conditions de plus en plus favorables au dépôt vers l'aval. Ceci est en cohérence avec l'évolution des forces tractrices également.
- A PDR (Figure 26), les taux d'atterrissement observés entre les Pk55 et 57 présentent une très forte variabilité locale encore difficile à interpréter. Les patrons de sédimentation suivent comme sur Pierre Bénite une certaine logique par sous-secteur, diminuant progressivement entre les Pk 52 et 54 ou 53 et 56 mais augmentant ensuite jusqu'au Pk 58. Cette structure semble également en résonance avec les forces tractrices et la connectivité qui augmentent également du Pk 52 au Pk 53 ou 53 et 56 mais se réduisent ensuite jusqu'au Pk 58. Il existe ainsi des effets-seuils au-delà desquels l'énergie limite le dépôt ou le permet.
- A DZM (Figure 27), les patrons de sédimentation semblent également suivre une certaine cyclicité. C'est ainsi que les niveaux d'atterrissement en 2000 présentent un gradient décroissant entre les Pk 175 et 177 ou 187 et 190 pour certains casiers qui correspondent aussi à des gradients d'énergie croissante. Des maxima et des minima de sédimentation s'observent aussi avec une périodicité plus fréquente. Des maxima sont observés aux Pk 176, 182, 186 et 190, qui correspondent aussi à des maxima locaux au niveau des forces tractrices. Cette périodicité se voit également en termes de connectivité (voir par ex. le patron longitudinal de l'altitude relative en Annexe 8).

En nous basant sur les patrons décrits ci-dessus, nous supposons également que les processus régissant les dépôts sédimentaires varient entre les secteurs.

A PBN, le fort atterrissement, associé à une faible sédimentation pourrait s'expliquer par une forte déconnexion, suite à des incisions ainsi qu'à la dérivation de l'écoulement dans le canal. Au contraire, à PDR et DZM, l'exhaussement par sédimentation semble être le facteur principal contrôlant les atterrissements. Relativement à PBN, la déconnexion semble avoir joué un rôle moins important sur ces deux secteurs.

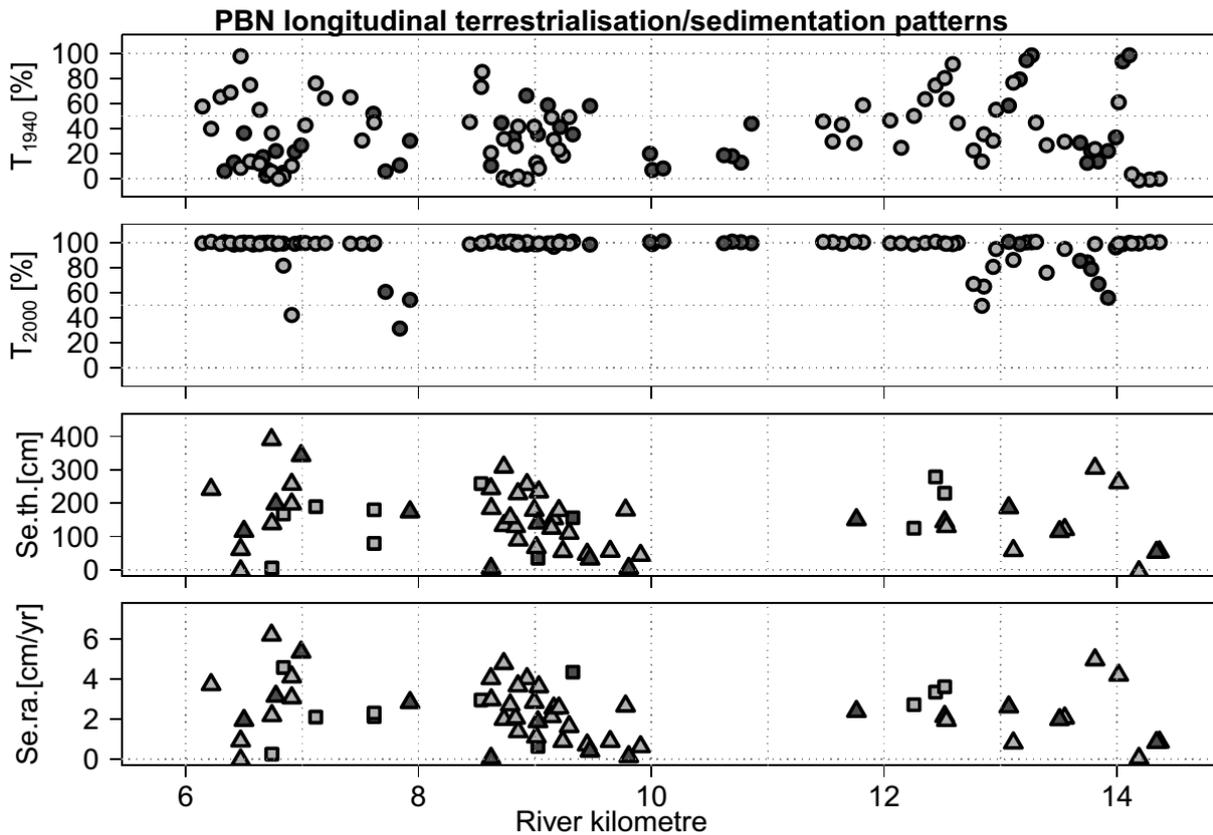


Figure 28. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation à PBN*

* $T_{1940/2000}$: Surface atterrie dans les années 1940s/2000s, respectivement ; Se.th. = Epaisseur de sédiments fins.
 Se.ra. = Taux de sédimentation. Gris clair : rive droite, gris foncé : rive gauche. Cercles : casiers, analyse B.
 Râppler, carrés : points d'échantillonnage B. Râppler, triangles : points d'échantillonnage projet OSR 4 A. Tena, valeurs moyennées par casier. Pour plus de détail, voir thèse B. Râppler

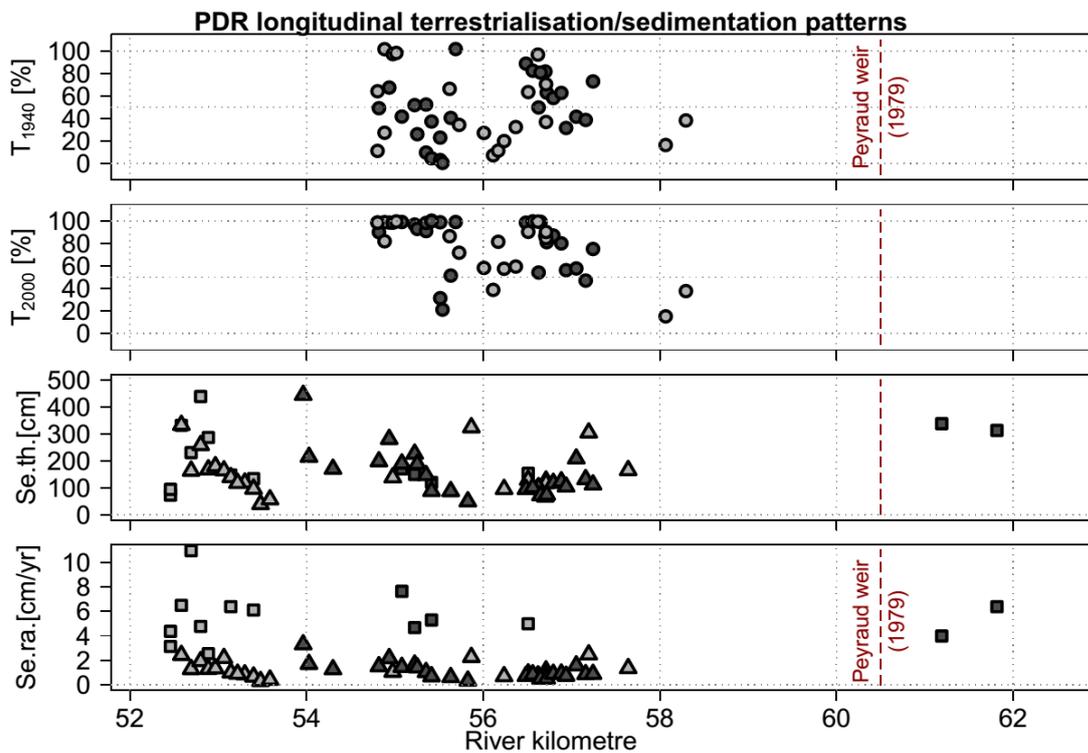


Figure 29. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation à PDR*

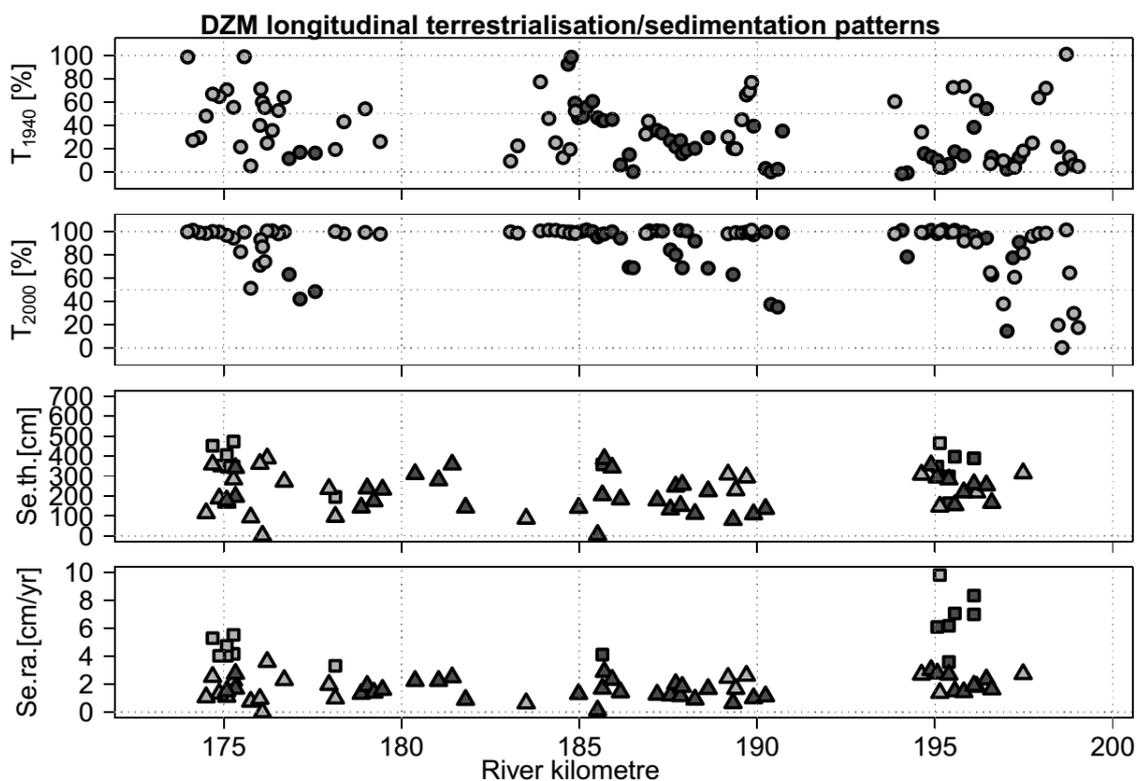


Figure 30. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation à DZM*

* $T_{1940/2000}$: Surface atterrie dans les années 1940s/2000s, respectivement ; Se.th. = Epaisseur de sédiments fins. Se.ra. = Taux de sédimentation. Gris clair : rive droite, gris foncé : rive gauche. Cercles : casiers, analyse B. Râppler, carrés : points d'échantillonnage projet OHM B. Râppler, triangles : points d'échantillonnage projet OSR 4 A. Tena, valeurs moyennées par casier. Pour plus de détail, voir thèse B. Râppler

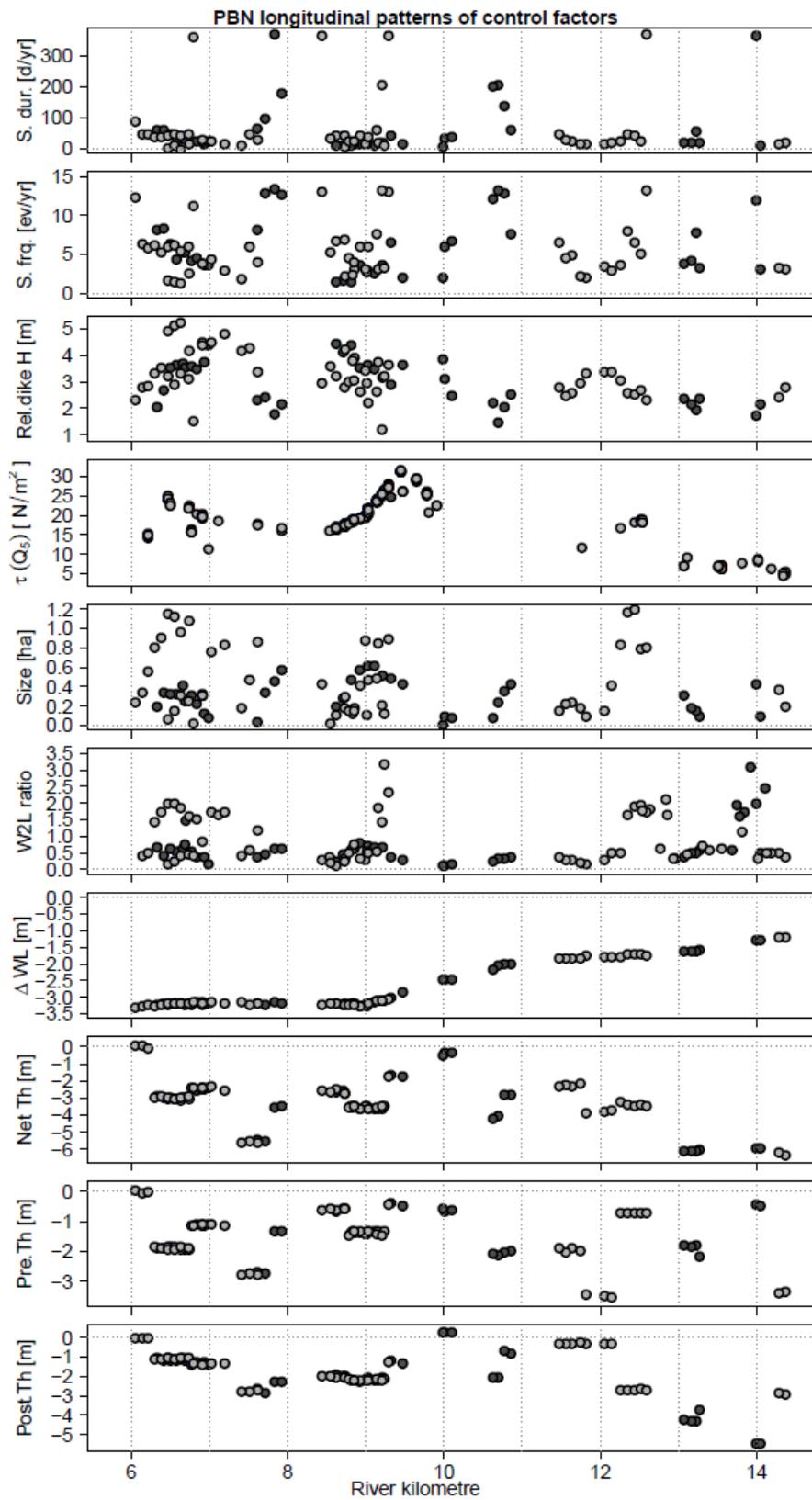


Figure 31. Exemple des patrons longitudinaux des conditions environnementales dans le secteur de PBN
(Voir les annexes 6, 7 et 8 pour les autres secteurs)

S.dur. = Durée de submersion de la digue longitudinale du casier ; *S. frq.* = Fréquence de submersion de la digue longitudinale du casier ; *Rel. dike H* = Hauteur relative de la digue longitudinale du casier par rapport au niveau de la ligne d'eau à un débit de 100 m³/s ; $\tau(Q_5)$ = force tractrice au droit du casier pour une crue quinquennale ; *Size* = Surface du casier ; *W2L ratio* = Rapport largeur/longueur du casier ; ΔWL = Niveau de la ligne d'eau₂₀₁₀ – Niveau de la ligne d'eau₁₉₀₂ ; *Net Th* = Changement net du talweg du chenal principal court-circuité à proximité du casier ; *Pre. Th* = Changement pré-dérivation du talweg du chenal principal court-circuité à proximité du casier ; *Post. Th* = Changement post-dérivation du talweg du chenal principal court-circuité à proximité du casier.

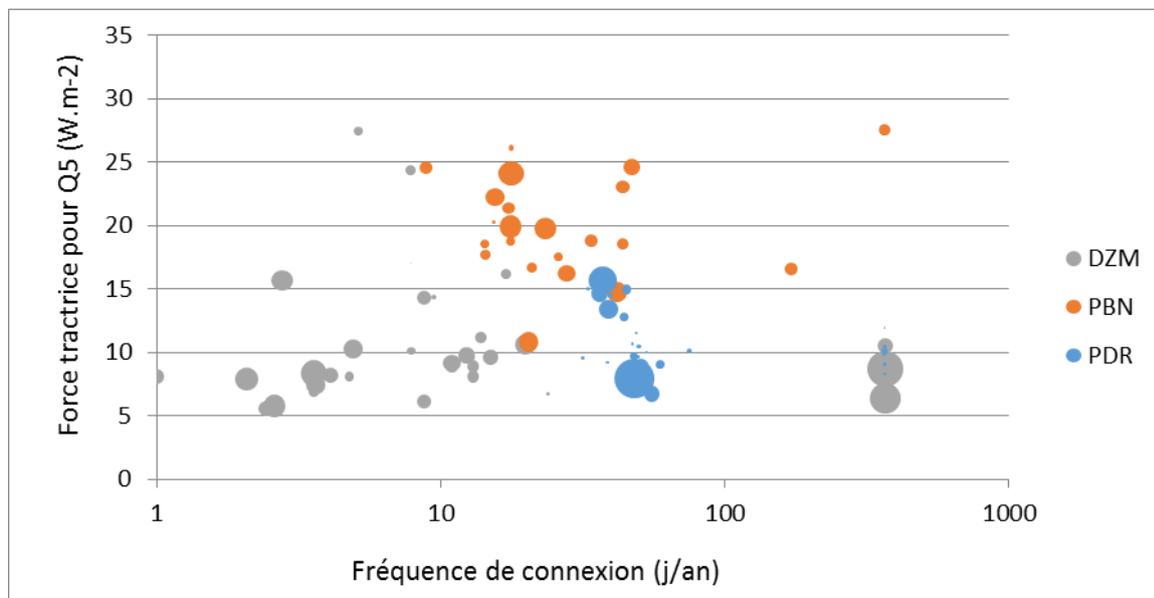


Figure 32. Variation du taux de sédimentation en fonction de la fréquence de connexion (j/an) et de la force tractrice au droit du casier pour un débit quinquennal pour les 3 sites d'étude

La Figure 29 montre également que le lien entre fréquence d'inondation et forces tractrices est lui-même contrasté d'un secteur à l'autre, correspondant alors à des patrons de sédimentation assez variables. Un lien existe entre les deux variables sur PBN et PDR : l'un et l'autre étant positionnés aux deux extrémités de ce gradient.

Les secteurs très connectés (80j/an) présentent de faibles forces tractrices (10 N/m²) pour Q₅ et les moins connectés 10 j/an des forces tractrices plus fortes, de l'ordre de 25 N/m². Il existe également des zones à DZM et PDR qui sont connectées en permanence. Sur DZM, la plupart des casiers semblent suivre un gradient inverse, les moins connectés (2j/an) ayant les forces tractrices les plus faibles (5 N/m²) et les plus connectés (40 j/an) les forces tractrices les plus fortes (10 N/m²).

De fait, si ces facteurs contrôlent principalement la sédimentation dans les lônes restaurées comme le montrent les travaux de J. Riquier, ceci n'est pas aussi explicite sur les casiers. De fait, la variation de la connectivité au cours du temps joue sans doute un rôle non négligeable. Il semble aussi que d'autres paramètres soient à considérer, notamment la taille des casiers qui contrôle les courants circulatoires à l'intérieur et qui semblent aussi influencer le piégeage des sédiments.

Ces premiers résultats, encore exploratoires, soulignent l'extrême diversité des situations locales. Leurs analyses seront affinées dans le cadre d'OSR5.

6. Concentrations en métaux dans les sédiments

Plus de 1600 échantillons ont fait l'objet d'une analyse par XRF sur les 4 secteurs d'étude, permettant de déterminer les teneurs en Zn, Ni, Pb, Cu, Sr et Fe. Le jeu de données est rappelé ci-dessous (tableau 7).

Tableau 7 : jeu de données utilisé - CHIMIE

ID	Nom de l'échantillonnage	Secteur	Type de prélèvements	Types d'analyses effectuées	Nombre d'analyses	Matrice étudiée
Sed4	Sédiment de profils verticaux dans les casiers Girardon	PDR	Tarière pédologique – tous les 20 cm sur une verticale	Chimie élémentaire - XRF portatif <i>Teneur en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	19 profils	63µm
Sed5		--			209 échantillons	
Sed6		PBN			15 profils	
Sed7		--			146 échantillons	
		MON			17 profils	
		--			185 échantillons	
		DZM			17 profils	
		--			281 échantillons	
Sed1	Sédiment de surface dans la plaine alluviale	PBN	Tarière pédologique – les 20 premiers cm	Chimie élémentaire - XRF portatif : <i>Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni, Fe, Sr</i>	321 échantillons	63µm
Sed2		--			--	
Sed3		PDR			229 échantillons	
		--			--	
		DZM			267 échantillons	

Du fait de la multiplicité des sites d'études (PBN, PDR, MON et DZM), des compartiments fluviaux étudiés (plaine versus casiers), des modalités d'échantillonnage (surface versus profils verticaux), les résultats seront organisés de manière à permettre une analyse comparative.

Les échantillons provenant des profils verticaux et ceux de surface sont d'abord étudiés. Les résultats portent ensuite sur les échantillons provenant des casiers puis ceux d'autres compartiments alluviaux. En effet, la partie 5.2.2. a montré la spécificité des processus sédimentaires intra-casiers, d'où la pertinence de les distinguer.

Dans les échantillons des profils verticaux des casiers, une première sous-partie présente les résultats tous secteurs confondus, une seconde partie se focalise sur l'approche comparative inter-secteur tandis qu'une troisième partie allie variabilité intra et inter-secteur. Pour finir, une quatrième partie ouvre sur une approche exploratoire des variables explicatives.

Concernant les échantillons de surface, une analyse globale permet de dresser un bilan de l'état chimique des sédiments de surface, étayée par un ensemble de cartes sur les secteurs de PBN, PDR et DZM.

Les teneurs présentées sont en mg/kg. Elles ont été transformées selon le jeu d'équations présentées dans le premier volume de ce rapport. Ces résultats « bruts » sont interprétés au regard de seuils qui permettent d'appréhender la contamination. Trois types de seuils sont utilisés, du fait de l'information normative ou éco-toxicologique qu'ils apportent :

- Le **seuil S1** provient de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement, rubrique 3.2.1.0. Il fait partie d'un ensemble de seuils de qualité réglementaires qui renseignent la qualité géochimique des eaux. Le seuil S1 est spécifique aux sédiments extraits de cours d'eau ou canaux. Le seuil S1 correspond aux « niveaux relatifs aux éléments et composés traces (en mg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm ».
- Les **TEC** et **PEC** sont des seuils relatifs à des réactions éco-toxicologiques du milieu. Ils sont disponibles pour différents types d'éléments chimiques (métaux, HAP, PCB, etc.). Ils ont été établis par MacDonald (2000) sur la fraction du sédiment inférieure à 2mm, à l'aide d'un échantillonnage provenant de rivières nord-américaines. Le Threshold Effect Concentration (TEC), est un seuil en dessous duquel aucun effet écotoxicologique n'est observable, alors que le Probable Effect Concentration (PEC) est un seuil au-dessus duquel des effets sont à priori observés.

Ces indicateurs offrent une idée des niveaux de contamination et permettent d'interpréter ces valeurs selon des critères normatifs et éco-toxicologiques. Toutefois, ils demeurent des indicateurs à interpréter avec précaution. Notamment, comme c'est la fraction fine qui est analysée lors de notre étude, le signal est concentré. Par conséquent, si les seuils présentés ici ne sont pas dépassés, il est fort probable que les seuils S1, TEC et PEC de l'échantillon total ne sont pas dépassés non plus.

6.1. Sédiments des casiers Girardon (échantillonnage par profils verticaux)

6.1.1. Synthèse des données, tous secteurs confondus

Les données suivantes proviennent de l'analyse des profils sédimentaires de tous les secteurs confondus, et ce, quelle que soit la profondeur de prélèvement.

a. Résultats bruts sur l'ensemble des secteurs

Tableau 8 : teneurs métalliques des échantillons de profils verticaux prélevés dans les casiers

N Total= 828	Zn	Pb	Ni	Cu	Fe	Sr
Paramètres généraux						
Moyenne des teneurs	172,23	64,77	45,44	45,79	24619,39	363,11
Ecart-type (Pearson)	59,65	21,53	6,14	15,44	3066,18	116,95
Médiane	159,48	62,24	45,11	42,59	24913,46	412,15
Valeur min (mg/kg)	77,38	19,82	28,48	14,19	17348,37	139,74
Valeur max (mg/kg)	523,45	160,85	66,25	139,66	33782,11	584,86
Paramètres de contrôle de la mesure						
Moyenne de l'écart XRF-ICP	-1,76	-3,99	13,75	4,17	4519,61	-3,04
Ecart-type (Pearson) de l'écart XRF-ICP	1,31	0,42	1,03	1,18	499,7	33,66

Le Zinc varie fortement, avec un minimum de 77,38 mg/kg et un maximum 523,45 mg/kg. La valeur moyenne de 172,23 mg/kg est associée à un coefficient de variation (C.V.) assez élevé de 28,83%. Le Plomb varie entre 19,82 et 160,85 mg/kg avec une moyenne plutôt basse de 64,77 mg/kg et un C.V. assez élevé de 30%. Le Nickel présente une moyenne de 45,44 mg/kg, avec un écart-type faible (C.V =

7,4%) et s'inscrit dans un intervalle peu étendu de [28,48-66,25] mg/kg. Le Cuivre varie de 14,19 à 139,66 mg/kg, avec une moyenne de 45,79 mg/kg et un C.V. de presque 30%. Le Fer, en concentration moyenne de 24 619,39mg/kg, avec un CV de 8% varie dans un intervalle de 17 348,37 à 33 782,11 mg/kg. Le strontium présente un assez fort C.V. de 31% autour d'une moyenne de 363,11mg/kg, associé à un grand intervalle [139,74 – 584,86] mg/kg.

C'est en regard des seuils normatifs et écologiques qu'il est possible de recontextualiser ces valeurs afin de savoir si ces teneurs correspondent à des valeurs normales pour le milieu ou si elles correspondent à des contaminations.

b. *Interprétation en regard du seuil S1*

Tableau 9 : teneurs métalliques des échantillons de profils verticaux prélevés dans les casiers en regard de la norme S1

Données en regard des seuils de pollution S1						
	Zn	Pb	Ni	Cu	Fe	Sr
Seuil S1 (mg/kg)	300	100	50	100	x	x
Nombre de dépassement du S1	33	54	174	6	x	x
Fréquence de dépassement sur le total des échantillons	0,0399	0,0652	0,2101	0,0072	x	x
Moyenne du dépassement (mg/kg)	73,92	16	4,22	18,3	x	x
Ecart-type (Pearson) du dépassement	58,75	13,37	3,55	15,1	x	x
Indice (base 1) de dépassement Min	1,01	1	1	1,01	x	x
Indice (base 1) de dépassement Max	1,75	1,61	1,33	1,4	x	x
Indice (base 1) de dépassement Moyen	1,25	1,16	1,08	1,18	x	x

D'un point de vue réglementaire, c'est la norme S1 en France qui définit le statut de contamination des échantillons. Dans cette section, nous allons donc nous baser sur cet indice.

Sur l'ensemble des casiers échantillonnés sur les 4 secteurs situés sur le Rhône moyen, les teneurs moyennes en métaux sont bien en dessous des seuils S1 alors même que le signal est concentré (fraction <63µm étudiée). Néanmoins, de manière ponctuelle, ces seuils sont parfois dépassés :

Les teneurs en Zinc dépassent le S1 dans 3,99% des cas, dont l'indice moyen de dépassement est de 1,25, soit une teneur moyenne de $(1,25 \times 300) = 375$ mg/kg pour ces 3,99% de valeurs dépassant le S1. Le zinc dépasse donc peu souvent le S1 mais avec un indice moyen assez élevé. Le dépassement maximal observé correspond à un indice de 1,75, soit une teneur de $(1,7448 \times 300) = 523,45$ mg/kg correspondant à la teneur maximale observée.

Pour le Plomb, dans 6,52% des cas avec un indice moyen de 1,16. C'est-à-dire que les valeurs qui dépassent le seuil de 100 mg/kg, le font avec un facteur moyen de 1,16 ; soit une teneur moyenne de 116 mg/kg pour ces 6,52% de valeurs dépassant le S1. Le dépassement maximal observé correspond à un indice de 1,61, soit une teneur de 161 mg/kg correspondant à la teneur maximale observée.

Les teneurs en Cuivre dépassent rarement le S1, et quand c'est le cas, l'indice moyen de dépassement est de 1,18.

Les teneurs en Nickel dépassent le S1 dans 21,01% des cas, dont l'indice moyen de dépassement est de 1,03. Il dépasse souvent le S1, mais avec un faible écart au S1. Le cuivre ne dépasse quasiment jamais le S1 (0,72% de dépassement).

c. Discussion

En tenant compte de l'augmentation du signal résultant de l'analyse de la fraction fine et du nombre relativement faible de dépassement, les sédiments analysés ne présentent pas une contamination globalement élevée.

Du point de vue normatif relatif au seuil S1, il est toléré « 3 dépassements pour 30 échantillons analysés » avec « 1 dépassement par tranche de 10 échantillons supplémentaires analysés [...] sous réserve que les teneurs mesurées sur les échantillons en dépassement n'atteignent pas 1,5 fois les niveaux de référence considérés. » (R.214.1, ARRÊTÉ du 17 juillet 2014 - art. 2). C'est-à-dire qu'en dessous de 10% du nombre échantillons analysés supérieurs aux seuils S1, s'ils ne dépassent pas 1,5 fois ces seuils, la qualité des sédiments n'entraînent pas de mesures particulières.

Ainsi, pour le Nickel la question est posée de savoir si ce pourcentage est encore dépassé lorsque l'on étudie le signal chimique sur la fraction inférieure à 2mm, car le seuil est dépassé dans 21,03% des cas, mais faiblement.

Pour le Plomb et le Zinc, le seuil est parfois dépassé avec plus de 1,5 fois sa valeur. Ici encore, il faut garder à l'esprit que le signal chimique a tendance à être concentré dans la fraction fine.

Le S1 est un seuil réglementaire mais les seuils écologiques (PEC et TEC), souvent plus faibles que le S1, posent la question du réel effet de ces concentrations sur l'environnement. Aussi, il est à noter que les fonds géochimiques particuliers des bassins versants des affluents (Isère, Ardèche, etc.) peuvent aussi amener à relativiser ces dépassements.

La variabilité relativement importante des teneurs de certains métaux (Zinc, Plomb, Cuivre, Strontium), reste encore à expliquer. L'approche comparative peut fournir quelques éléments pour alimenter les interprétations.

6.1.2. Approche comparative inter-secteur

Les échantillons ont été prélevés sur la partie amont du Rhône Moyen (PBN, PDR) et sa partie aval (MON, DZM). Il est alors intéressant de comparer les teneurs selon leur localisation afin d'étudier les tendances globales à l'échelle des secteurs.

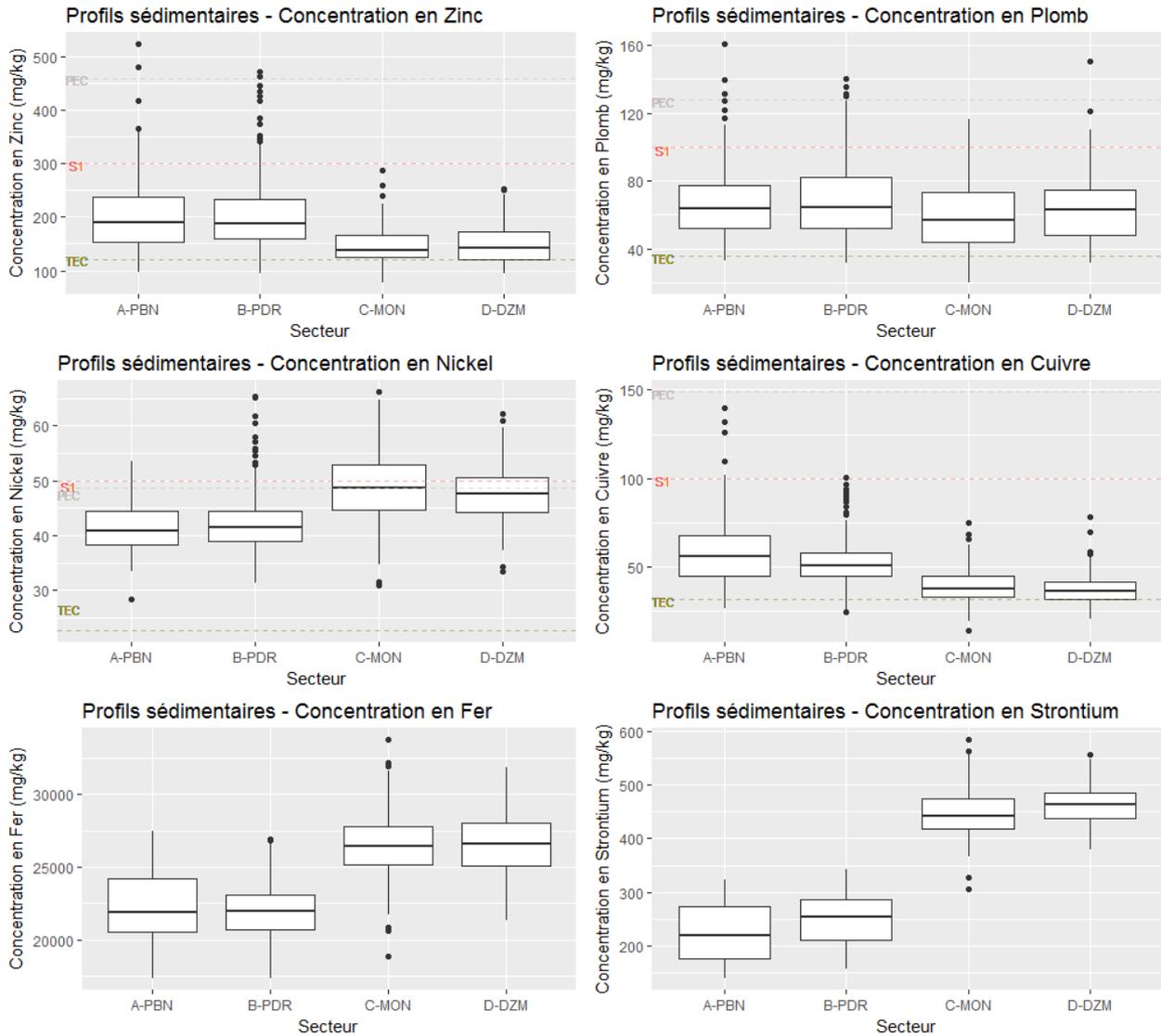


Figure 33. Graphique des teneurs en Zn, Pb, Ni, Cu, Fe et Sr en fonction du secteur

Le Zinc présente des teneurs plus élevées à PBN et PDR, avec de nombreuses valeurs extrêmes dans le quantile supérieur (Figure 30). Cette même tendance est observée pour le Plomb et le Cuivre. Pour le Nickel, MON et DZM montrent des teneurs plus importantes que les deux secteurs amont.

Le Fer et le Strontium, ici davantage utilisés comme éléments de comparaison (ils ne font pas partis de la nomenclature S1), laissent présager que les deux secteurs amont ont en effet des signatures chimiques bien différentes que les deux secteurs à l'aval.

Afin de mieux comprendre ces patrons chimiques, une analyse en composantes principales a été réalisée à partir des 6 éléments (Zn, Pb, Ni, Cu, Fe, Sr) en tant que variables actives et le « secteur » en tant que variable illustrative.

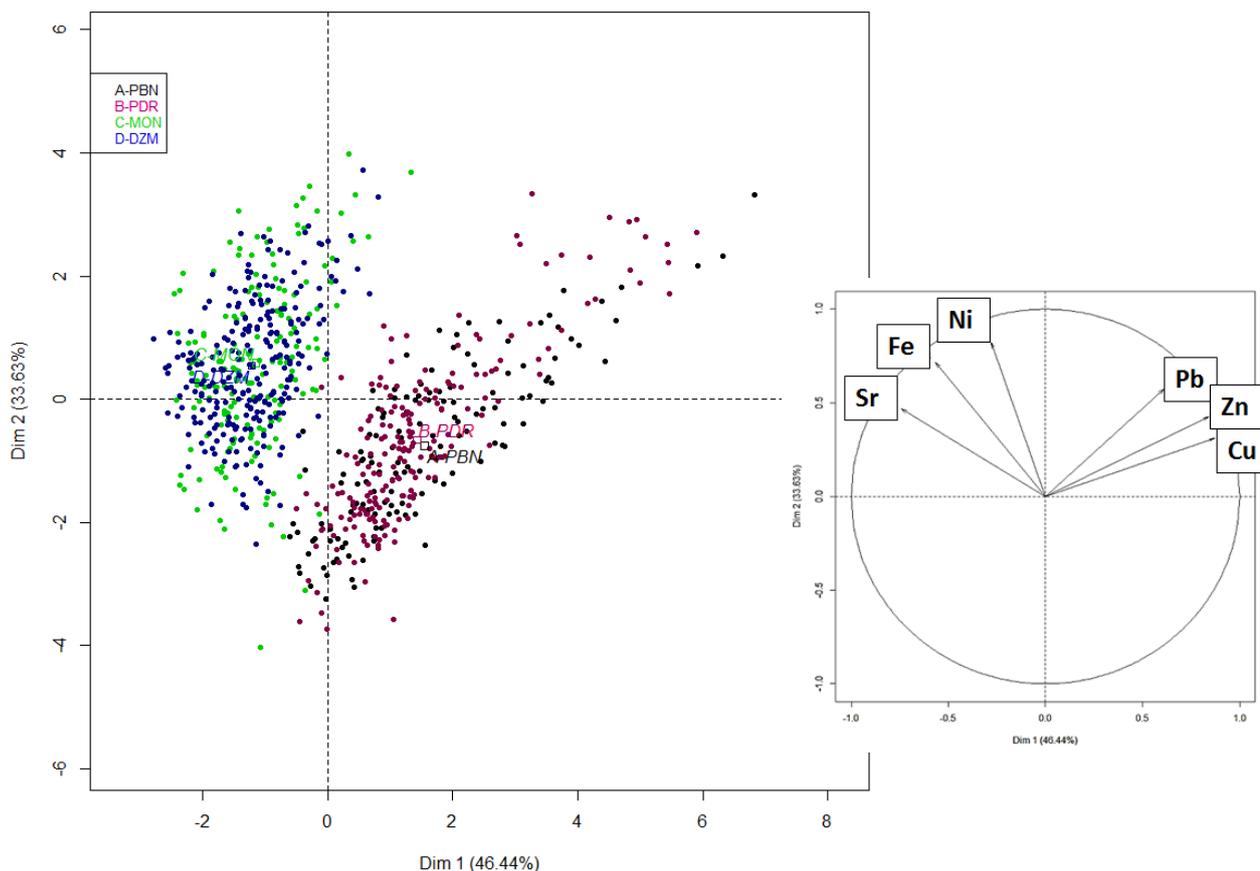


Figure 34. Analyse en Composantes Principales réalisée à partir du Zn, Pb, Ni, Cu, Fe et Sr sur l'ensemble des secteurs

Inertie cumulée des axes : 80,07%

Sur l'ACP, les secteurs à l'amont et à l'aval sont divisés en deux groupes distincts (Figure 31). Les échantillons de MON et DZM sont partiellement corrélés au Nickel, Fer et Strontium (quart supérieur gauche), tandis que PBN et PDR sont surtout corrélés au Plomb, Zinc et Cuivre (quart supérieur droit).

Il est intéressant de noter que le Zinc, le Plomb, et le Cuivre, éléments indicateurs de pollution urbaine, sont associés aux secteurs de PBN et PDR, proche de Lyon et du Giers (apport de la vallée du Giers).

Cette ACP permet d'appréhender une variabilité inter-secteur mais laisse aussi deviner la variabilité intra-secteur abordée dans la section suivante.

6.1.3. Approche comparative inter- et intra-secteurs

Le Zinc, le Plomb, et le Cuivre sont associés aux secteurs de PBN et PDR (Figure 31). Néanmoins, de nombreux échantillons de ces secteurs sont positionnés de manière anti-corrélée à ces éléments. Il existe donc un gradient de « contamination » sur ces deux sites en fonction des points d'échantillonnage. De même que le Ni, le Fe et le Sr sont associés aux secteurs de MON et DZM, de nombreux individus de ces secteurs sont positionnés de manière anti-corrélée à ces éléments. On appréhende alors ici une variabilité inter-secteur mais aussi intra-secteur, dite stationnelle avec des échantillons ponctuellement *plus chargés* en métaux, voire contaminés, au sein de ces mêmes secteurs.

a. Variabilité stationnelle

Afin de mieux comprendre cette variabilité inter et intra-secteur, nous avons réalisé des graphiques permettant d'observer la distribution des concentrations pour les 6 métaux étudiés en fonction de leur secteur, selon un gradient amont-aval (ici représenté par les PK). A chaque PK, correspond un profil vertical découpé selon des segments de 20 cm, prélevés jusqu'au toit de galet. Un individu correspond donc à une teneur (moyenne du triplicata d'analyse) d'un sous-échantillon du segment de 20cm.

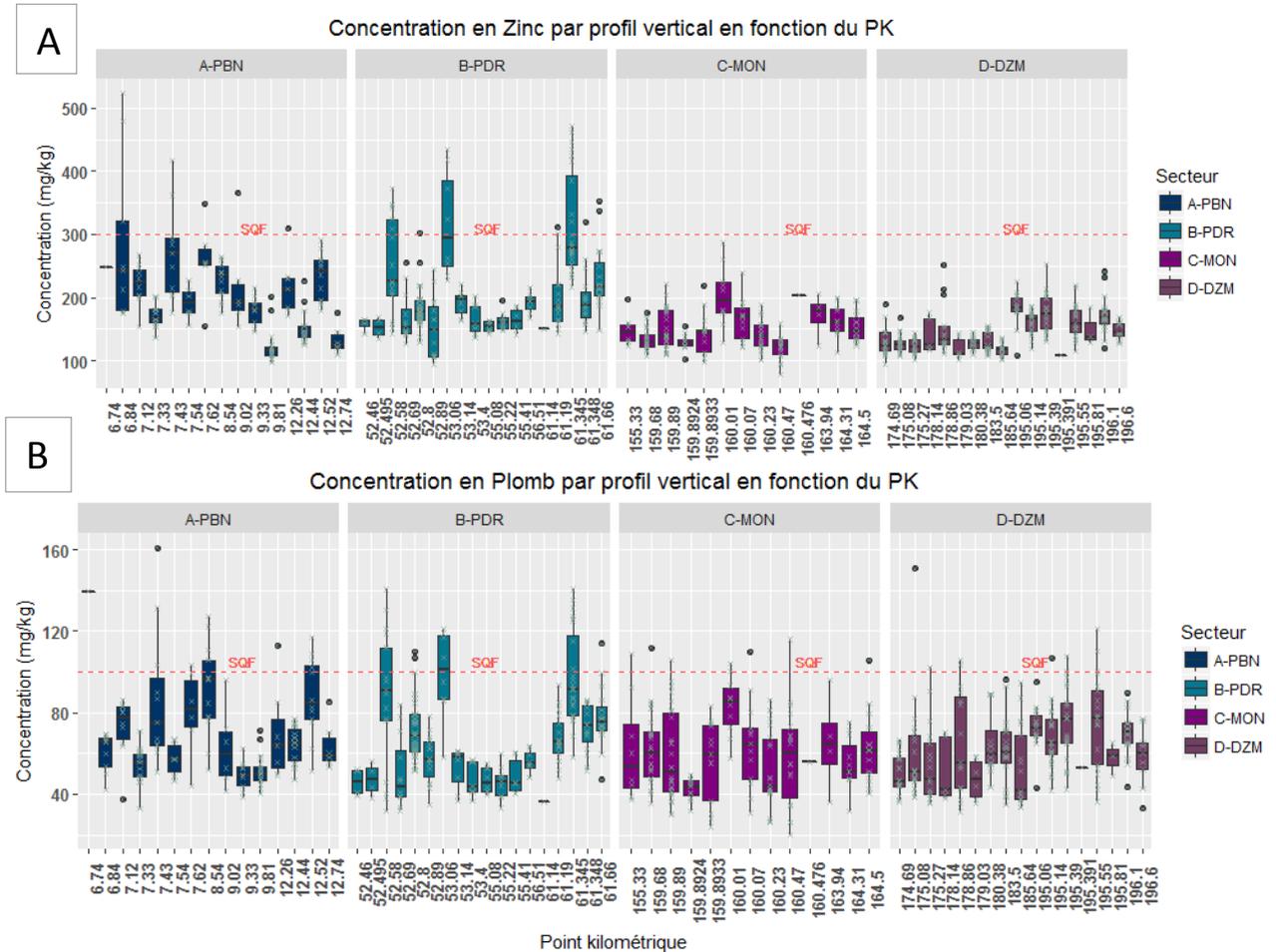


Figure 35. Graphiques représentant les teneurs en Zinc (A) et en Plomb (B) en fonction du secteur, selon un gradient amont-aval, organisé par profil vertical

Les valeurs en Zinc varient beaucoup en intra-RCC sur PBN et PDR, peu sur MON et DZM, témoignant d'une forte variabilité inter-stationnelle (Figure 32-A).

Le S1 n'est dépassé qu'à PBN et PDR. Une différence très sensible des teneurs en Zinc est observée dans les dépôts à l'amont et à l'aval de l'Ardèche (rupture visible entre les PK183,5 et 185,64). Au PK 6,84, le boxplot représente un profil vertical d'1,80 m de profondeur. Dans ce même profil vertical, la teneur en Zinc varie de 174,85 mg/kg (0-20cm) à 523,45 mg/kg (140-160cm). Cela témoigne d'une variabilité intra-profil, donc temporelle, relative au processus de sédimentation.

Les valeurs en Plomb, quant à elles, varient beaucoup en intra-RCC sur PBN et PDR, moins sur MON et DZM, témoignant d'une forte variabilité inter-stationnelle (Figure 32-B). Là encore une différence est observée sur DZM entre les stations à l'amont et à l'aval de l'Ardèche (rupture visible entre les PK183.5 et 185.64). Le S1 est dépassé pour certains échantillons sur les différents secteurs même s'il apparaît plus fortement et fréquemment dépassé sur PBN et PDR. Une variabilité intra-profil comme au PK7,33 ou 61,345 indique des apports en métaux qui varient significativement au cours du temps. Les valeurs sont significativement plus fortes sur les stations de MON et DZM que sur celles de PBN et PDR.

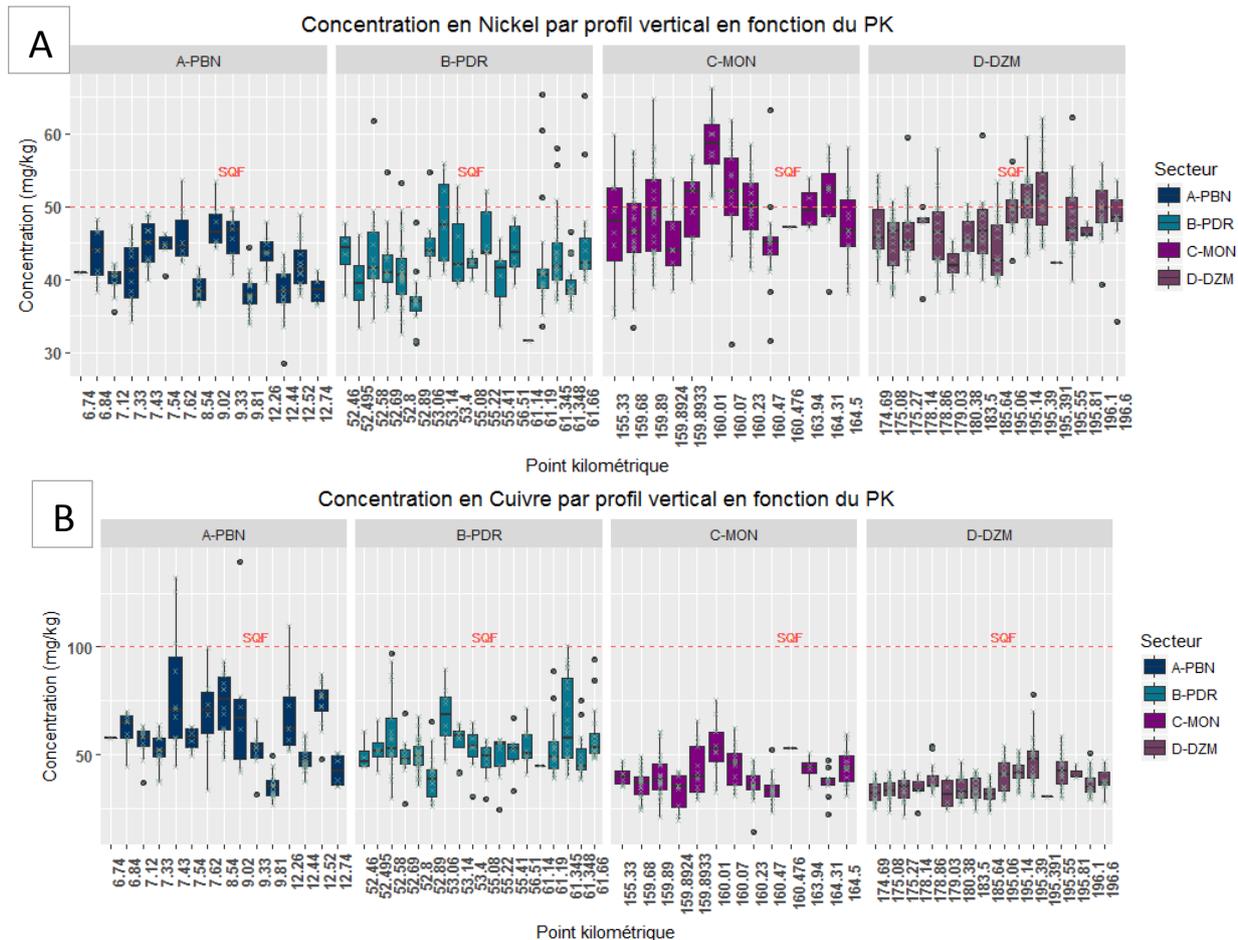


Figure 36. Graphique représentant les teneurs en Nickel (A) et en Cuivre (B) en fonction du secteur, selon un gradient amont-aval, organisé par profil

Les valeurs en Nickel varient entre 30 et 66 mg/kg, témoignant d'une certaine variabilité inter-stationnelle (Figure 28). Le S1 est dépassé pour certains échantillons sur les différents secteurs même s'il apparaît plus fortement et fréquemment dépassé sur MON et DZM. Là encore une différence est observée sur DZM entre les stations à l'amont et à l'aval de l'Ardèche.

A l'aval de l'Ardèche, le S1 est plus fréquemment dépassé (rupture visible entre les PK183.5 et 185.64). La variabilité importante observée par exemple au PK53,06 ou 155,33 témoigne d'une variabilité intra-profil relative à la chronologie de dépôt sédimentaire.

Les teneurs en cuivre semblent diminuer selon un gradient amont-aval entre PBN et DZM.

b. Variabilité selon la profondeur

Afin de mieux comprendre la variabilité des teneurs chimiques intra-profil, nous avons également analysé les concentrations en fonction de la profondeur du prélèvement.

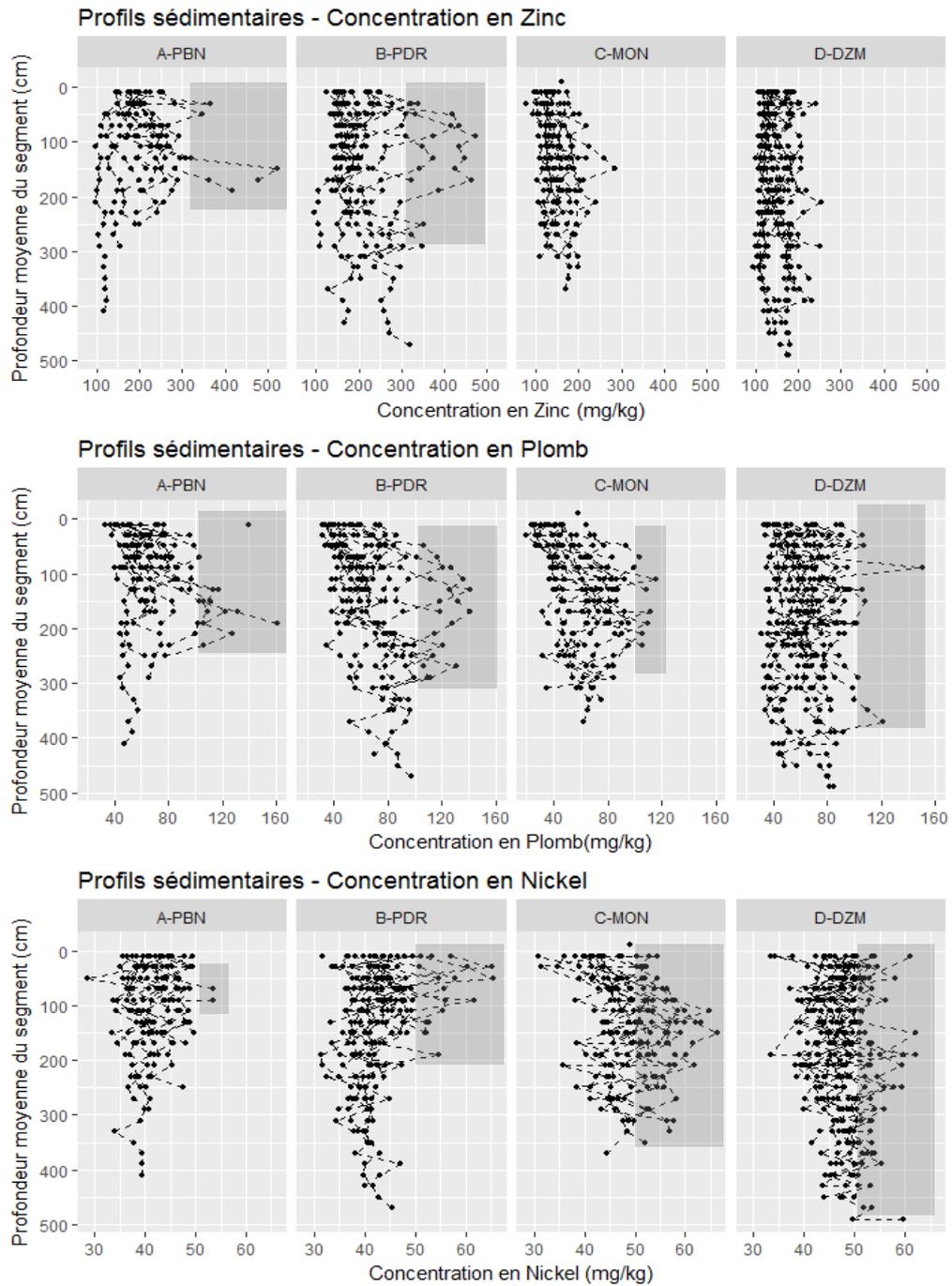


Figure 37. Graphiques représentant les teneurs (mg/kg) en Zinc, Plomb, Nickel selon le profil, le secteur et la profondeur de prélèvement

Les zones grisées caractérisent les dépassements du S1

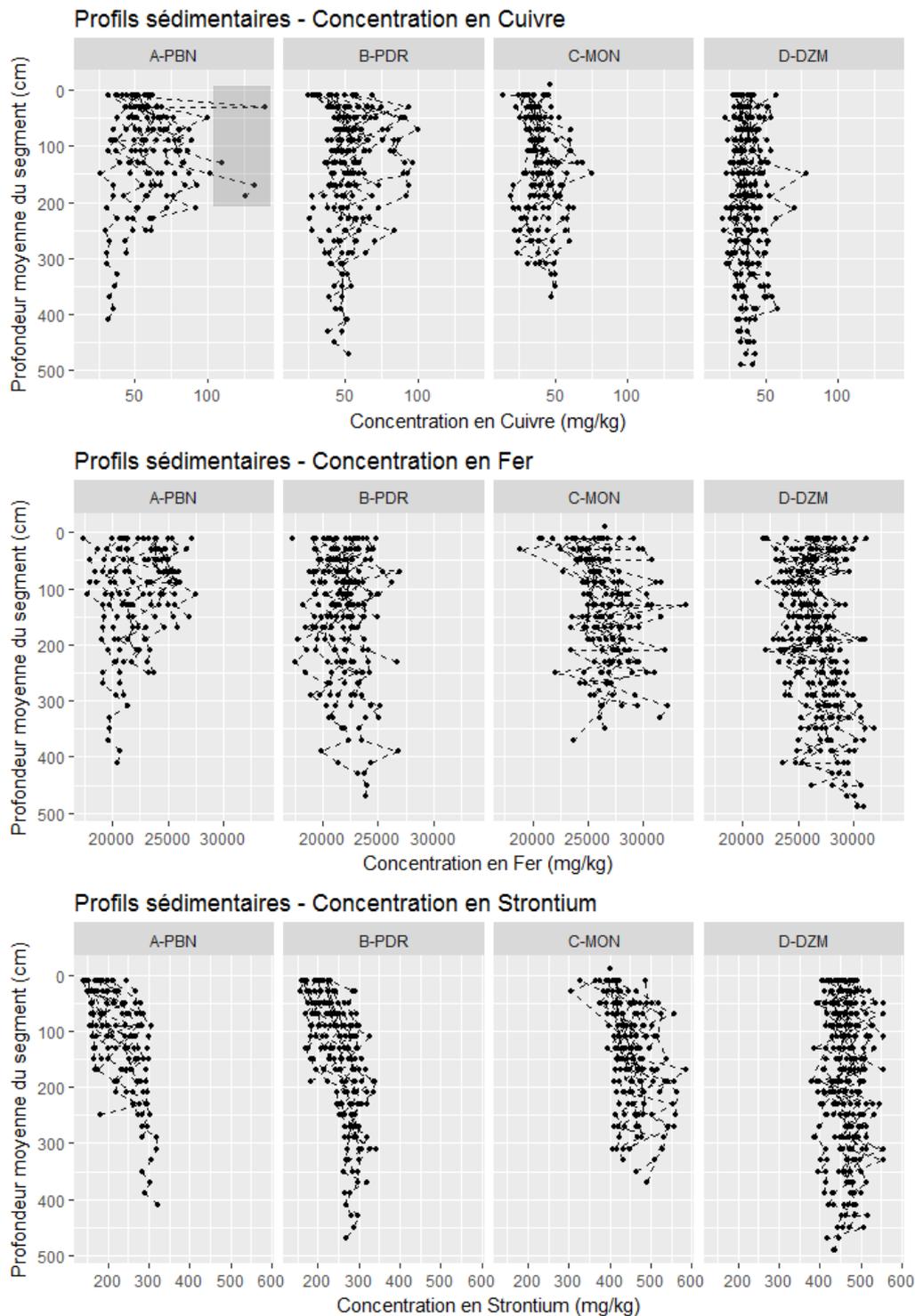


Figure 38. Graphiques représentant les teneurs (mg/kg) en Cuivre, Fer et Strontium selon le profil, le secteur et la profondeur de prélèvement

Les zones grisées caractérisent les dépassements du S1

Concernant le **Zinc** (Figure 34), il y a dépassement du S1 à PBN et à PDR sur la partie haute de quelques profils, entre 40cm et 180cm. A PDR, on distingue clairement un patron « en cloche » sur plusieurs profils. Pour le **Plomb** (Figure 34), on retrouve cette forme en « cloche » à PDR. Pour les autres sites, les dépassements d'avèrent ponctuels au sein des profils sauf à PBN, où on les retrouve entre 1,20m et 2,40m. Un patron en « cloche » s'observe aussi pour le **Nickel** à PDR, entre 0m et 1m (Figure 34). Il y a de nombreux dépassements du S1 à MON et DZM, quelle que soit la profondeur. Le

Cuivre dépasse uniquement le seuil S1 à PBN (Figure 35), de manière ponctuelle sur les 2 premiers mètres. A PDR, il semblerait que quelques profils se distinguent avec des teneurs relativement plus élevées entre 0,2m et 1,80m. A MON et DZM, le cuivre présente une distribution plutôt homogène. Le **Fer** (Figure 35) montre une variabilité assez importante, non associable à une profondeur particulière. A DZM, il semblerait tout de même que les sédiments les plus profonds, donc les plus anciens, soient plus chargés en Fer. Concernant le **Strontium** (Figure 35), il n’y a pas de tendance notable à DZM, contrairement aux trois autres secteurs où les teneurs semblent être plus élevées dans les sédiments les plus profonds.

Ainsi, il n’est pas forcément possible d’associer un type de *contamination* à une profondeur. En effet, ces profils ne sont pas le reflet d’une dynamique de remplissage unique mais correspondent à différents patrons de sédimentation post-corréction, pré et post-dérivation sur les différents secteurs. L’histoire spécifique de ces profils, grâce au décryptage des patrons planimétriques et des radargrammes correspondant devrait permettre de spécifier ces tendances dans le cadre de l’OSR5.

6.1.4. Analyse des teneurs en métaux en fonction des caractéristiques des unités de sédimentation

Grâce à l’ACP de la Figure 31, il est possible de distinguer un gradient chimique sur PDR et PBN, avec des échantillons plus riches en Cu, Pb et Zn et d’autres beaucoup moins chargés. Dans la continuité de cette observation, les coordonnées du premier axe factoriel ont plus spécifiquement été analysées. C’est ainsi que la médiane des coordonnées est calculée pour chacun des profils verticaux et comparée à différents facteurs comme l’âge du dépôt, l’évolution de la ligne d’eau ou du fonds du lit, la fréquence de connexion (Figure 36).

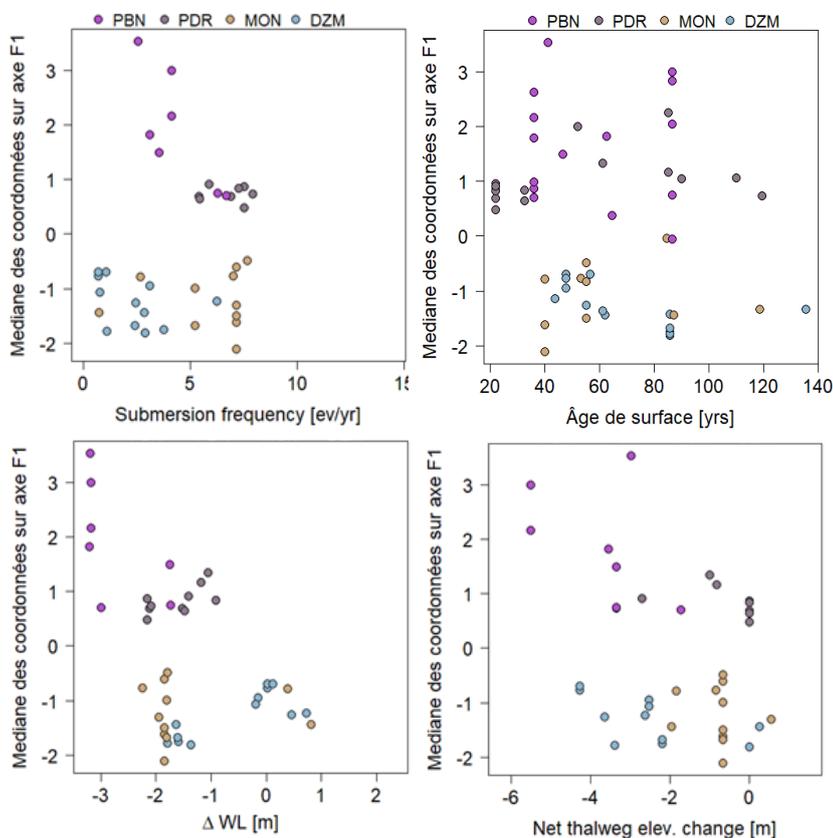


Figure 39. Lien entre la médiane de coordonnées factorielles sur F1 établie par profil vertical en fonction, de la fréquence de submersion de la surface, de l’âge du dépôt, de l’évolution de la ligne d’eau consécutive à la mise en RCC et de l’évolution de l’altitude du talweg depuis la construction des ouvrages Girardon

Sur PDR et PBN, on distingue clairement que les médianes des coordonnées par profil (axe 1) varient en fonction de la connexion des unités. Les unités bien connectées (7 événements/an) présentent des valeurs plus faibles que les unités moins bien connectées (1 à 2 événements par an). Les surfaces peu connectées ont un talweg qui s'est incisé au cours du temps jusqu'à près de 6 m. Les surfaces jeunes (atterrissement observé depuis 20 à 40 ans) présentent des concentrations en Cu/Pb/Zn plutôt faibles. Au-delà, il semble qu'un lien existe entre âge et concentration en Cu/Pb/Zn, les surfaces d'âge intermédiaire présentent des teneurs plus élevées que les plus anciennes. Etant sans doute plus connectées, elles ont bénéficié d'apports un peu plus importants. La variabilité des médianes observée à DZM et MON est en revanche indépendante des facteurs testés.

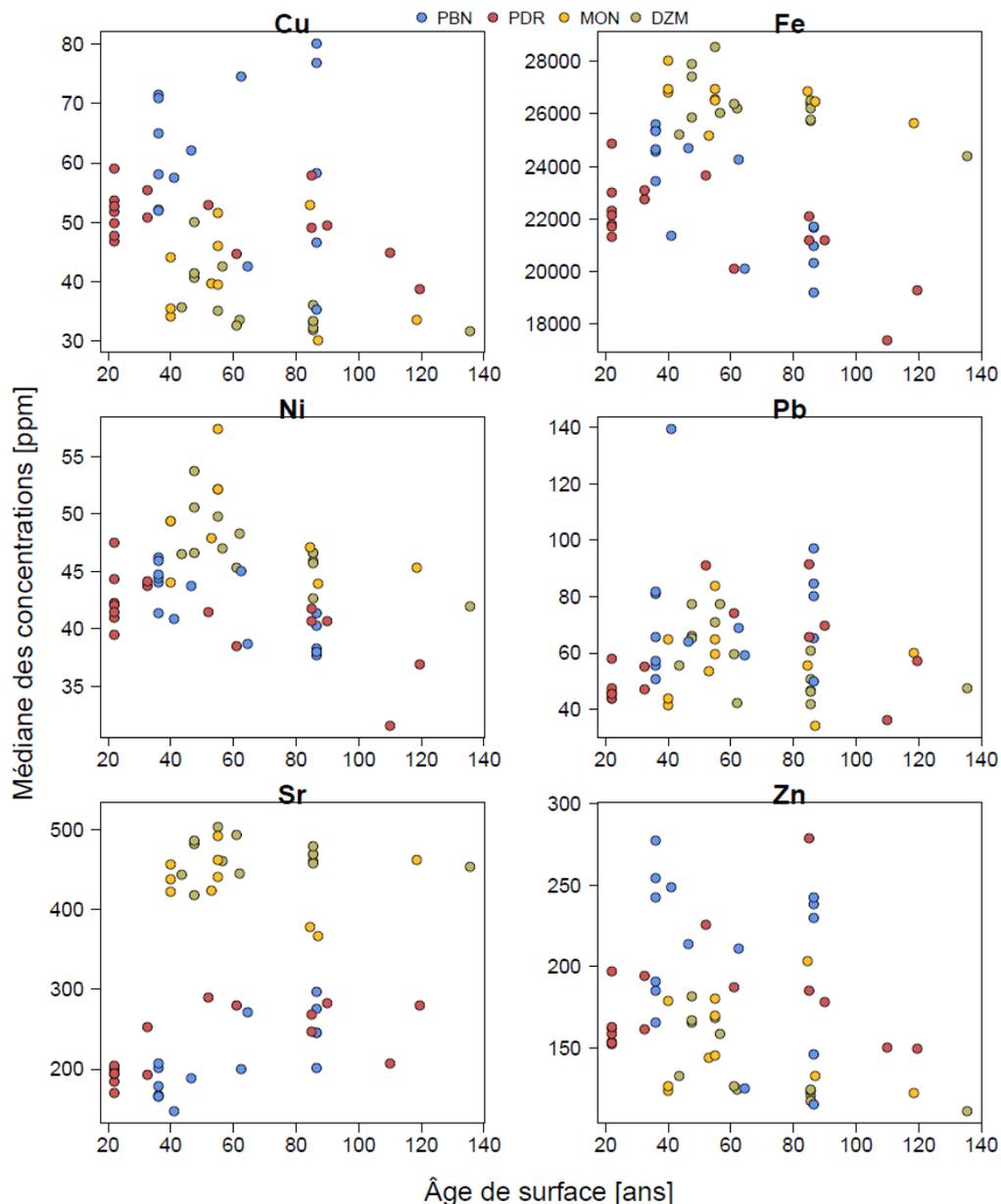


Figure 40. Valeur médiane des teneurs en éléments métalliques (Cu, Fe, Ni, Pb, Sr, Zc) sur les profils verticaux échantillonnés en fonction de l'âge du dépôt

Les médianes des concentrations de chacun des éléments étudiés en fonction de l'âge des dépôts ne montrent pas de tendance évidente.

Pour PBN, il semblerait que les teneurs en Nickel augmentent alors que l'âge du dépôt diminue. Nous avons en effet observé certains profils marqués par des teneurs élevées (Figure 34). On observe cela aussi pour le Fer. En revanche, en ce qui concerne le Plomb, il semblerait que les teneurs élevées soient associées à certains dépôts plus âgés (~80 ans) avec néanmoins une exception forte pour un profil provenant d'un dépôt d'âge intermédiaire (~40ans). Pour le Zinc, on retrouve deux groupes avec des teneurs en Zinc d'une grande variabilité mais aussi comprenant les valeurs médianes les plus hautes : il s'agit de profils provenant des dépôts âgés de 40 et 80 ans.

Ces premiers résultats semblent indiquer que les profils des dépôts pré-dérivation ont capté le pic de Zinc dans le haut des profils alors que les profils post-dérivation le captent dans leur partie inférieure. A noter lors de l'observation des profils selon la profondeur (Figure 34 et 35) que les épaisseurs moyennes de sédiments sont plus faibles en post-dérivation qu'en pré-dérivation : les profils sont donc plus courts en post-dérivation, c'est donc un paramètre qu'il est important de prendre en considération dans l'interprétation globale de ces profils. Il est aussi possible que certains profils correspondent à des contextes particuliers décrits en partie 4.2.2 : ces profils pourraient traverser d'anciennes fosses de dissipation, alors remplies de sédiment fin consécutivement à l'atterrissement post-dérivation, modifiant les paramètres de la matrice sédimentaire. Seul l'approfondissement de l'histoire spécifique à chaque profil prévu dans l'OSR5 permettra d'étoffer les interprétations.

A PDR, on observe des teneurs médianes globalement faibles pour tous les éléments étudiés, à quelques exceptions près : ces dernières témoignent de teneurs plus élevées sur une partie des profils, expliquant une médiane plus élevée.

En outre, l'âge des dépôts ne renseigne que partiellement sur la dynamique sédimentaire. Ainsi que l'on a pu le voir en étudiant les profils et les teneurs chimiques selon la profondeur, il semblerait qu'il existe des sections de certains profils, dans le « patron en cloche » avec des teneurs plus marquées. Là encore, les multiples hypothèses sur la sédimentation (présentées dans le paragraphe ci-dessus) demandent une analyse historique spécifique à chaque profil afin d'étayer les interprétations.

A MON, il ne semble pas y avoir de lien entre l'âge des dépôts et les teneurs en métaux.

A DZM, il semblerait que les profils des dépôts jeunes présentent, relativement aux autres dépôts, des teneurs qui semblent plus élevées en Cuivre, Nickel, Plomb et Zinc.

Enfin, il est important de noter que cette approche analytique décrit des tendances internes au jeu de données : la variabilité évoquée s'inscrit dans une gamme de valeurs plutôt basse : seul le Nickel et le Plomb se rapprochent ponctuellement des seuils S1.

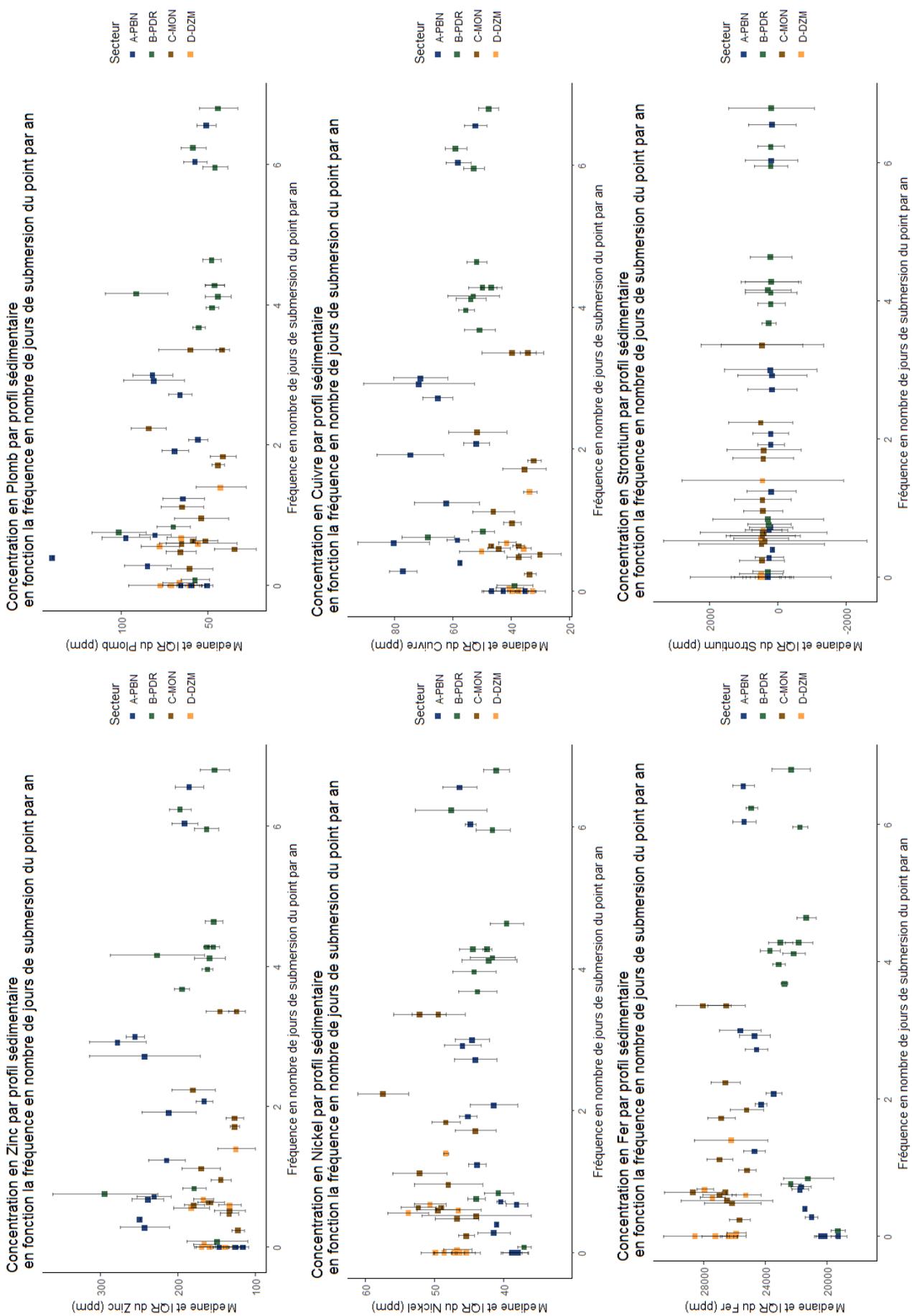


Figure 41. Valeur médiane et interquartiles des teneurs en éléments métalliques (Cu, Fe, Ni, Pb, Sr, Zn) sur les profils verticaux en fonction de leur connexion (fréquence de submersion du point d'échantillonnage)

A PDR et à PBN, le **Zinc**, le **Plomb** et le **Cuivre** présentent globalement des teneurs médianes plus faibles sur les zones les plus connectées (4 à 6 fois par an) et plus élevées sur les zones moins connectées (0, 1 ou deux fois) (Figure 39). Quelques points peu connectés font exception et ne semblent pas avoir enregistré de pic de Zinc, de Plomb ou de Cuivre. A MON et DZM, les teneurs en Zinc demeurent faibles.

En ce qui concerne le **Nickel**, MON et DZM présentent des médianes plus élevées, que la fréquence soit de 0 ou 3jr/an. Les concentrations restent plus faibles à PBN et PBN, quelle que soit la fréquence de connexion du point de prélèvement.

Il n'y a pas de tendance observée particulière en teneur en **Cuivre** et fréquence de connexion. Néanmoins, il est possible de noter que les médianes des teneurs en cuivre par des profils sont plus élevées à PBN que dans les autres secteurs.

A PBN, la concentration médiane en **Fer** est très faible, aux environs de 19 g/kg dans les zones déconnectées (0jr/an), puis augmente avec la fréquence de connexion jusqu'à 25 g/kg (7jr/an). A PDR, on remarque un phénomène équivalent, mais moins marqué (19 à 0jr/an contre 22 ou 23 g/kg à 4 et 6 jr/an).

A MON et DZM, les médianes en **Fer** sont globalement plus élevées, et ce, quelle que soit la connectivité. Les affluents entre PDR et MON (Isère, Drôme, etc...) peuvent expliquer ces différences en lien avec l'évolution associée du fond géochimique contributif.

La signature en **Strontium** ne varie pas selon les secteurs, quelle que soit le niveau de connexion, mais elle présente en revanche une très forte variation intra-profil.

6.2. Analyses chimiques des sédiments de surface au sein de la plaine alluviale et des casiers

Dans cette section, les teneurs en Zn, Ni, Pb et Cu des échantillons prélevés en surface sont analysées en fonction du secteur, et des facteurs morphodynamiques telle que leur situation (casiers Girardon) ou encore l'âge du début de sédimentation.

Sur la Figure 40, le Zinc et le Cuivre semblent montrer un gradient amont-aval, avec des teneurs qui diminuent en s'éloignant du PK0 (Lyon).

Dans les sédiments de surfaces pour chacun des quatre éléments étudiés, le secteur de PBN présente de nombreuses valeurs extrêmes dans le quantile supérieur.

Afin de décrypter plus précisément ces tendances et préciser leur interprétation, nous allons utiliser les seuils de contamination présentés en amont.

6.2.1. Approche comparative inter-secteur

a. Sédiment de surface - Résultats bruts par secteurs (plaine alluviale & casiers Girardon confondus)

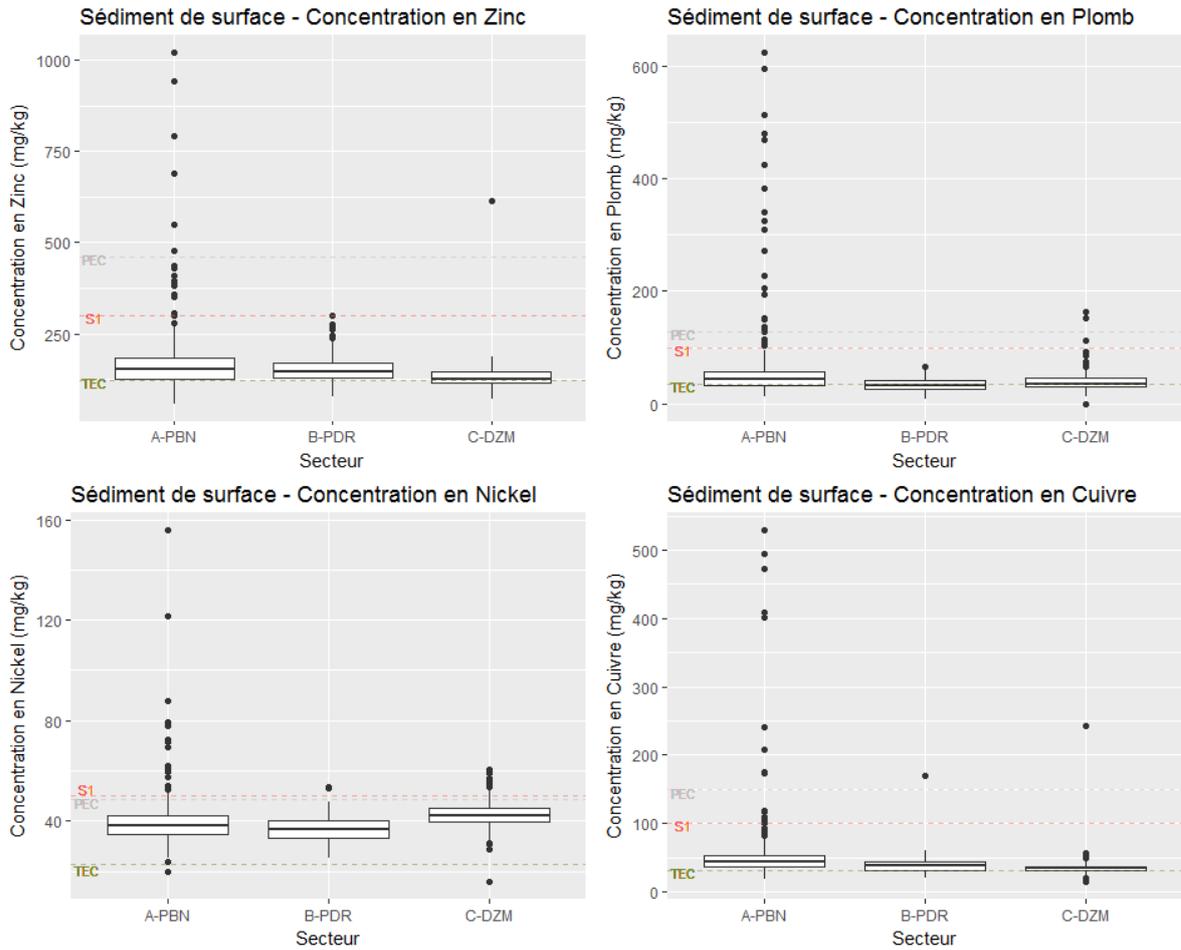


Figure 42. Teneurs en Zinc, Plomb, Nickel et Cuivre dans les sédiments de surface selon le secteur d'étude

S1, TEC et PEC indiqués selon les lignes en pointsillés

b. Sédiment de surface - Interprétation en regard des seuils S1, TEC et PEC

- Plaine alluviale

Dans l'ensemble des échantillons de surface (tableau 10) de la plaine (tous les compartiments alluviaux confondus incluant les casiers), c'est à Pierre-Bénite que les seuils supérieurs (S1 et PEC) sont le plus souvent dépassés. Sur la fraction fine, presque 9% des échantillons dépassent le seuil S1 en Zinc (300 mg/kg), presque 10% dépassent le seuil S1 du plomb (100 mg/kg), 4,5% en ce qui concerne le cuivre (S1 : 100mg/kg), et environ 8% pour dépasse le PEC du Nickel (PEC = 48,6 mg/kg). A Péage-de-Roussillon, les PEC et seuils S1 sont très rarement dépassés, entre 0 et 2% au maximum, quel que soit l'élément. A Donzère, en revanche, on observe des dépassements concernant le Nickel. Presque 11% des échantillons présentent des concentrations en Nickel qui dépassent le PEC (48,6 mg/kg). Les TEC sont très souvent dépassés. Dans la plupart des cas, ils couvrent entre 34,64% et 98,88% des occurrences quel que soit le secteur ou l'élément : la classe [TEC-S1] est alors quasiment tout le temps le mode de la série statistique (excepté pour le plomb à PDR et DZM).

Concernant l'interprétation de ces données, il est important de noter que nous concentrons le signal de l'échantillon. Aussi, le TEC est un seuil en dessous duquel aucun effet indésirable dû aux contaminants ne devrait se produire (McDonald, 2000) alors que le PEC est un seuil au-dessus duquel des effets indésirables sont à priori observés. Les classes [TEC-PEC] ou [TEC-S1] sont donc des classes difficiles à interpréter, elles témoignent de valeurs moyennes, n'entraînant par exemple, pas de mesures particulières lors d'opérations de gestion de sédiments.

D'autres parts, il faut aussi rappeler que le fond géochimique peut aussi faire varier les teneurs naturelles en métaux lourds. Ainsi, les teneurs plus élevées en Nickel dans les sédiments de surface de Donzère - *tendance aussi observée sur les sédiments des profils verticaux provenant des casiers de Montélimar et Donzère* – pourraient aussi être imputables à l'apport d'affluents.

Néanmoins, le Rhône étant un fleuve qui a été affecté par des flux de polluants durant la seconde moitié du XXème siècle, des teneurs dépassant le TEC ne sont pas forcément surprenantes.

- **Cas spécifique des Casiers**

Les échantillons de surface provenant des casiers montrent des pourcentages de dépassement des seuils globalement plus élevés qu'à l'échelle de la plaine, notamment dans les secteurs où l'on retrouve les concentrations les plus marquées (tableau 11) : par exemple, 19% des échantillons dépassent le S1 du Plomb et le PEC du Nickel à Pierre-Bénite (contre 10% à l'échelle de la plaine totale). De même, presque 17% des échantillons de Donzère sont au-dessus du PEC en Nickel (contre 8 % à l'échelle de la plaine totale). Ainsi, les casiers semblent plus susceptibles de contenir des sédiments contaminés dans les zones les plus concernées.

Tableau 10 : Seuils TEC, PEC et S1 - dénombrement des dépassements dans l'ensemble des échantillons de surface pour chaque secteur d'étude
Analyses sur la fraction (<63µm), par XRF portatif xSort

Zinc				Plomb				Cuivre				Nickel			
PBN															
Seuils	Zn (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Pb (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Cu (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Ni (mg/kg)	N	Part%
0-TEC	0-121	63	19,38	0-TEC	0-35,8	111	34,15	0-TEC	0-31,6	38	11,69	0-TEC	0-22,7	1	0,31
TEC-S1	121-300	243	74,77	TEC-S1	35,8-100	181	55,69	TEC-S1	31,6-100	270	83,08	TEC-PEC	22,7-48,6	294	90,46
S1-PEC	300-459	10	3,08	S1-PEC	100-128	10	3,08	S1-PEC	100-149	5	1,54	PEC-S1	48,6-50	4	1,23
PEC-SUP	459-sup	8	2,46	PEC-SUP	128-sup	22	6,77	PEC-SUP	149-sup	10	3,08	S1-SUP	50-sup	23	7,08
Valeur NA	NA	1	0,31	Valeur NA	NA	1	0,31	Valeur NA	NA	2	0,62	Valeur NA	NA	3	0,92
Total		325	100	Total		325	100	Total		325	100	Total		325	100
PDR															
Seuils	Zn (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Pb (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Cu (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Ni (mg/kg)	N	Part%
0-TEC	0-121	33	18,44	0-TEC	0-35,8	117	65,36	0-TEC	0-31,6	41	22,91	0-TEC	0-22,7	0	0
TEC-S1	121-300	146	81,56	TEC-S1	35,8-100	62	34,64	TEC-S1	31,6-100	137	76,54	TEC-PEC	22,7-48,6	177	98,88
S1-PEC	300-459	0	0	S1-PEC	100-128	0	0	S1-PEC	100-149	0	0	PEC-S1	48,6-50	0	0
PEC-SUP	459-sup	0	0	PEC-SUP	128-sup	0	0	PEC-SUP	149-sup	1	0,56	S1-SUP	50-sup	2	1,12
Valeur NA	NA	0	0	Valeur NA	NA	0	0	Valeur NA	NA	0	0	Valeur NA	NA	0	0
Total		179	100	Total		179	100	Total		179	100	Total		179	100
DZM															
Seuils	Zn (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Pb (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Cu (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Ni (mg/kg)	N	Part%
0-TEC	0-121	92	34,46	0-TEC	0-35,8	131	50,56	0-TEC	0-31,6	92	34,46	0-TEC	0-22,7	1	0,37
TEC-S1	121-300	174	65,17	TEC-S1	35,8-100	132	49,44	TEC-S1	31,6-100	174	65,17	TEC-PEC	22,7-48,6	237	88,76
S1-PEC	300-459	0	0	S1-PEC	100-128	1	0,37	S1-PEC	100-149	0	0	PEC-S1	48,6-50	12	4,49
PEC-SUP	459-sup	1	0,37	PEC-SUP	128-sup	2	0,75	PEC-SUP	149-sup	1	0,37	S1-SUP	50-sup	17	6,37
Valeur NA	NA	0	0	Valeur NA	NA	1	0,37	Valeur NA	NA	0	0	Valeur NA	NA	0	0
Total		N	Part%	Total		267	100	Total		267	100	Total		267	100

Tableau 11 : Seuils TEC, PEC et S1 - dénombrement des dépassements dans l'ensemble des échantillons de surface des casiers pour chaque secteur d'étude

Analyses sur la fraction (<63µm), par XRF portatif xSort

Zinc				Plomb				Cuivre				Nickel			
PBN															
Seuils	Zn (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Pb (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Cu (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Ni (mg/kg)	N	Part%
0-TEC	0-121	24	16,44	0-TEC	0-35,8	56	38,36	0-TEC	0-31,6	11	7,53	0-TEC	0-22,7	0	0
TEC-S1	121-300	100	68,49	TEC-S1	35,8-100	63	43,15	TEC-S1	31,6-100	111	76,03	TEC-PEC	22,7-48,6	115	78,7671233
S1-PEC	300-459	5	3,42	S1-PEC	100-128	5	3,42	S1-PEC	100-149	3	2,05	PEC-S1	48,6-50	4	2,73972603
PEC-SUP	459-sup	8	5,48	PEC-SUP	128-sup	22	15,07	PEC-SUP	149-sup	10	6,85	S1-SUP	50-sup	23	15,7534247
Valeur NA		9	6,16	Valeur NA		0	0,00	Valeur NA		11	7,53	Valeur NA		4	2,73972603
Total		146	100,00	Total		146	100,00	Total		146	100,00	Total		146	
PDR															
Seuils	Zn (mg/kgmg/kg)	N	Part%	Seuils	Pb (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Cu (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Ni (mg/kg)	N	Part%
0-TEC	0-121	10	15,63	0-TEC	0-35,8	52	81,25	0-TEC	0-31,6	12	18,75	0-TEC	0-22,7	0	0
TEC-S1	121-300	52	81,25	TEC-S1	35,8-100	10	15,63	TEC-S1	31,6-100	50	78,13	TEC-PEC	22,7-48,6	62	96,875
S1-PEC	300-459	0	0,00	S1-PEC	100-128	0	0,00	S1-PEC	100-149	0	0,00	PEC-S1	48,6-50	0	0
PEC-SUP	459-sup	0	0,00	PEC-SUP	128-sup	0	0,00	PEC-SUP	149-sup	1	1,56	S1-SUP	50-sup	2	3,125
Valeur NA		2	3,13	Valeur NA		2	3,13	Valeur NA		1	1,56	Valeur NA		0	0
Total		64	100,00	Total		64	100,00	Total		64	100,00	Total		64	100
DZM															
Seuils	Zn (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Pb (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Cu (mg/kg)	N	Part%	Seuils	Ni (mg/kg)	N	Part%
0-TEC	0-121	51	32,90	0-TEC	0-35,8	77	49,68	0-TEC	0-31,6	49	31,61	0-TEC	0-22,7	0	0
TEC-S1	121-300	100	64,52	TEC-S1	35,8-100	73	47,10	TEC-S1	31,6-100	102	65,81	TEC-PEC	22,7-48,6	131	84,516129
S1-PEC	300-459	0	0,00	S1-PEC	100-128	0	0,00	S1-PEC	100-149	0	0,00	PEC-S1	48,6-50	7	4,51612903
PEC-SUP	459-sup	1	0,65	PEC-SUP	128-sup	2	1,29	PEC-SUP	149-sup	1	0,65	S1-SUP	50-sup	17	10,9677419
Valeur NA		3	1,94	Valeur NA		3	1,94	Valeur NA		4	2,58	Valeur NA		0	0
Total		155	100,00	Total		155	100,00	Total		155	100,00	Total		155	100

c. **Cartographie des teneurs en Zinc, Plomb, Nickel et cuivre dans les sédiments de surface des quatre secteurs d'études**

Pour chaque élément, des cartes ont été produites afin de mieux comprendre les processus à l'échelle de la plaine. Parmi celles-ci, nous avons sélectionné celles montrant les éléments qui ont le plus fort pourcentage de dépassement. Les autres cartes sont disponibles en annexe (15 à 22).

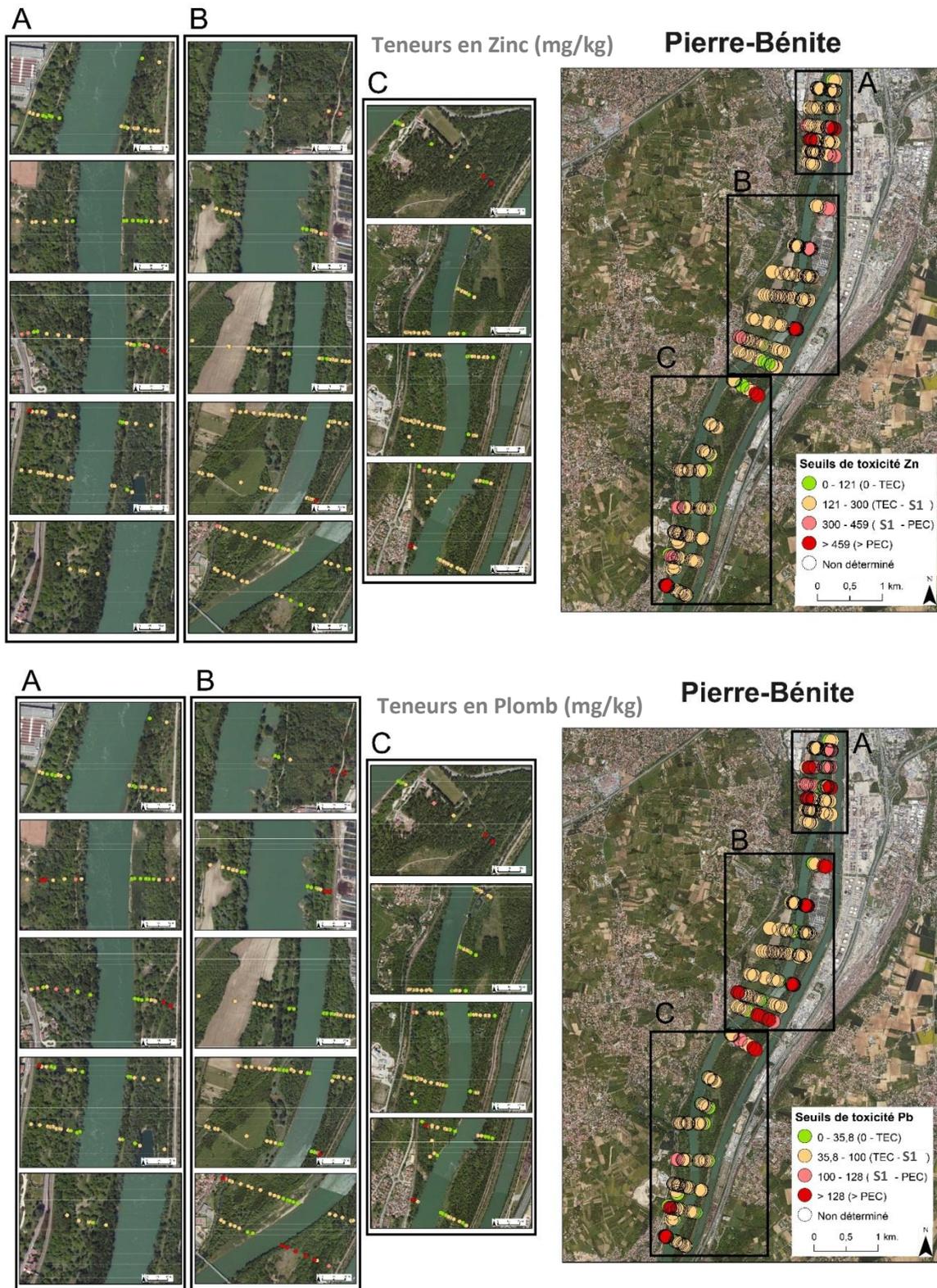


Figure 43. Concentration en Zinc (Zn) et en Plomb (Pb) dans les échantillons superficiels à Pierre-Bénite (mg/kg) Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)

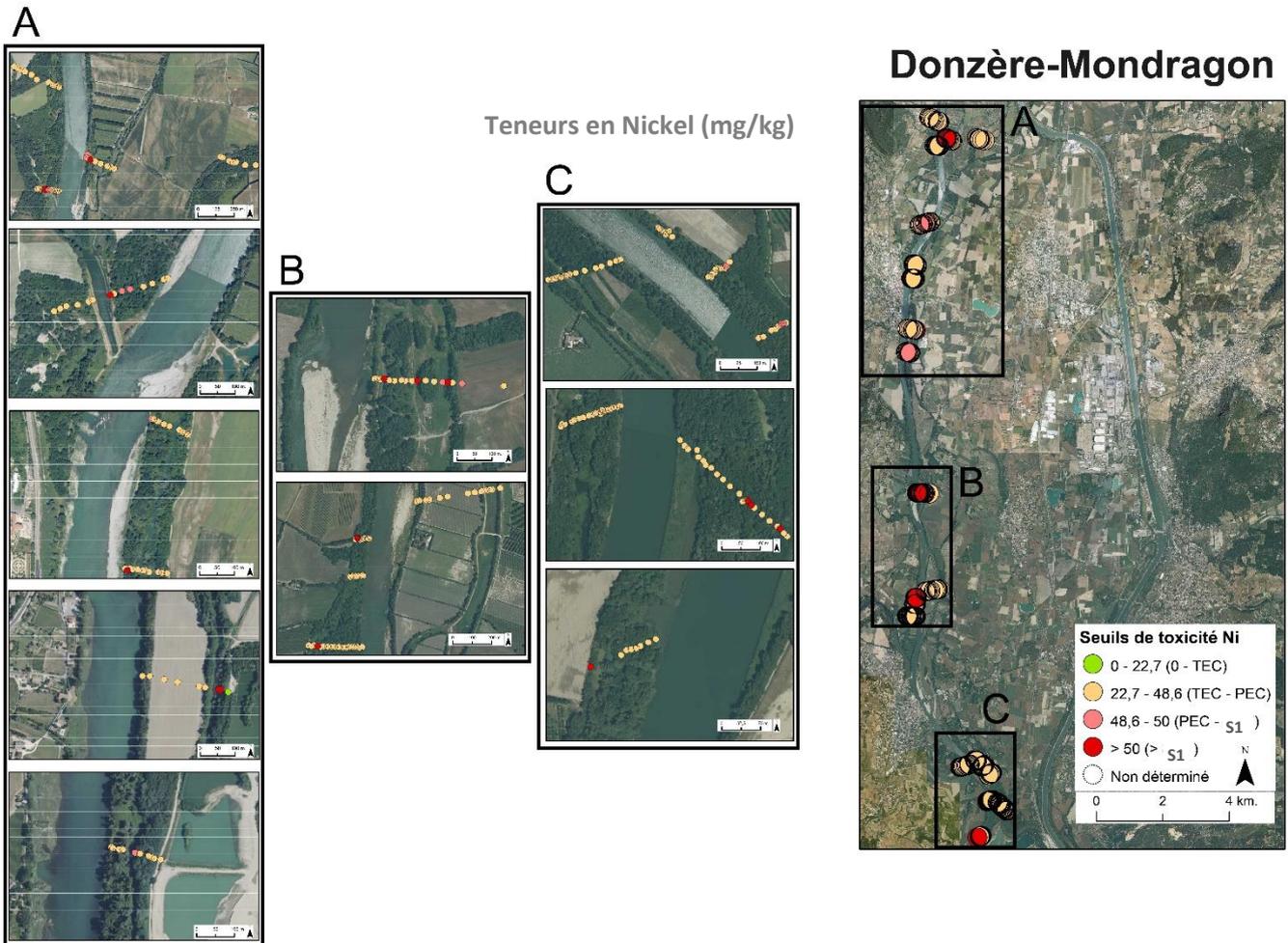
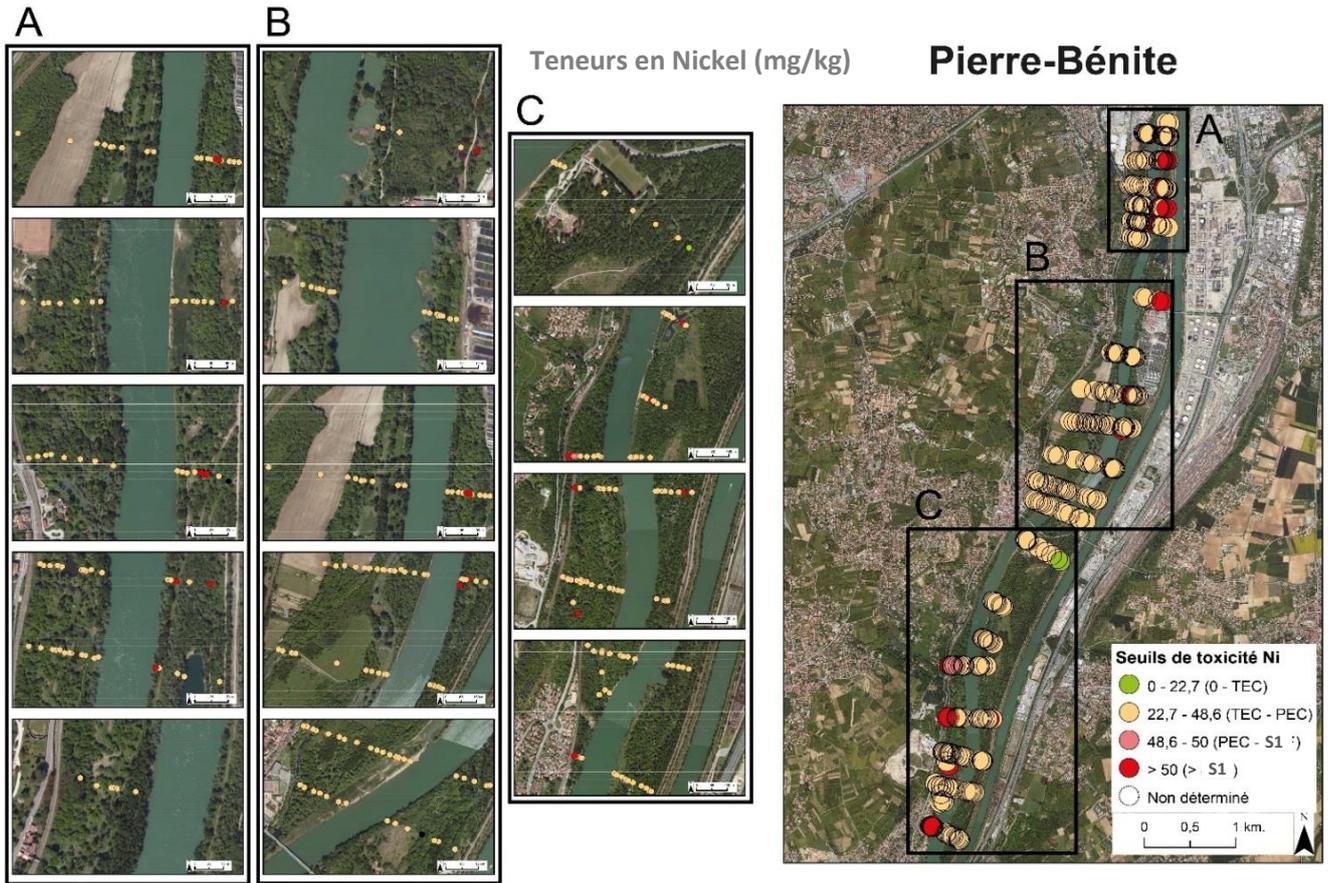


Figure 44. Concentration en Nickel (Ni) dans les échantillons superficiels à Pierre-Bénite et à Donzère-Mondragon (mg/kg)
 Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)

Les concentrations en Zinc observées dans le sédiment de surface sur le site de Pierre-Bénite sont d'une manière générale inférieures au seuil de qualité français (S1), et majoritairement comprises entre les seuils TEC et S1 (74,77%, en jaune sur la Figure 41). Les concentrations les plus élevées (> PEC) se situent à proximité des activités anthropiques sur les marges du fleuve à distance du chenal.

En ce qui concerne le Plomb sur le site de Pierre-Bénite (Figure 41), les teneurs sont globalement comprises entre le TEC et le S1 (55,69%, en jaune sur la carte) mais sont inférieures au seuil TEC à proximité immédiate du chenal (en vert) sauf au sud du secteur B où elles dépassent même le PEC. Quelques concentrations supérieures au seuil PEC apparaissent aux extrémités des transects au sein de la ripisylve, dans les casiers et à proximité des espaces marqués par des activités anthropiques.

Les concentrations en Nickel observées en surface sur le site de Pierre-Bénite (Figure 42), sont d'une manière générale comprises entre le TEC et le PEC (90,40%, en jaune sur la carte). Les concentrations les plus élevées (> S1) se situent soit dans les casiers, soit aux extrémités des transects et à proximité des activités anthropiques sur les marges du fleuve aussi bien à l'amont qu'à l'aval du secteur.

A Donzère (Figure 42), les concentrations en nickel observées dans les sédiments de surface sont globalement comprises entre les seuils TEC et PEC (88,76%). Quelques concentrations supérieures aux seuils de qualité français (S1) apparaissent sur les transects au sein des casiers, ainsi qu'au sein de la ripisylve aussi bien à l'amont, au centre et à l'aval du secteur.

6.2.2. Analyse des teneurs en métaux en fonction de l'âge du début de sédimentation et la fréquence de submersion

Dans la section précédente, les teneurs en polluants dans les sédiments superficiels ont été spatialisés pour les trois secteurs. Cela nous a permis d'observer une variabilité inter-secteur mais aussi de discerner une variabilité intra-secteur. Il semble donc pertinent d'étudier ces teneurs en fonctions d'autres variables illustratives témoignant de la dynamique alluviale afin de voir si celle-ci influencent les patrons chimiques de surface. Pour aborder l'effet de la dynamique, l'âge du début de sédimentation et la fréquence de submersion associée à la localisation des prélèvements ont été utilisés.

La Figure 43 présente pour les trois secteurs une comparaison des teneurs moyennes en éléments métalliques contenus dans les sédiments en fonction des différentes dates/périodes de début d'atterrissement.

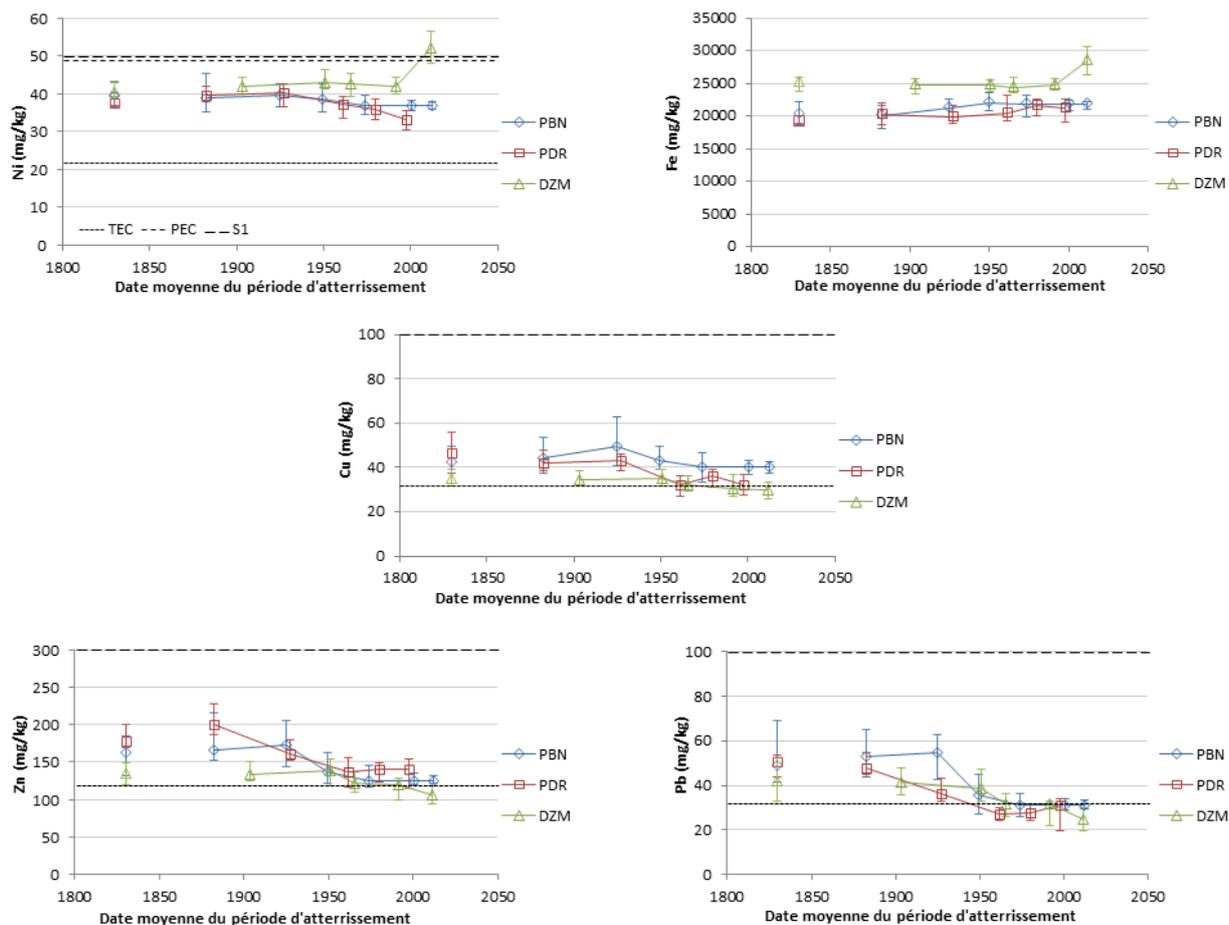


Figure 45. Comparaison des teneurs moyennes en éléments métalliques contenus dans les sédiments en fonction de la date du début de la sédimentation fine (centre de la période identifiée par photo-interprétation) sur les secteurs de Pierre Bénite, Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon

Les dates marquant le début de la sédimentation fine ont été estimées par photo-interprétation. Ces surfaces datées ont été associées à des teneurs moyennes en éléments métalliques.

Les concentrations en Zinc, Nickel et Plomb sont relativement plus élevées dans les sédiments de surface du lit majeur qui ont commencé à sédimenter avant 1860.

Le cuivre, le Zinc et le plomb enregistrent des concentrations élevées au cours de la période 1800-1860 puis enregistre une baisse progressive, et irrégulière jusqu'aux années 2000. On observe donc une diminution des teneurs en Zinc, Plomb et Cuivre alors que l'âge des dépôts décroît.

Ainsi, les concentrations déclinent progressivement pour les dépôts datant de la période 1905-2009 sauf dans le cas du Fer et du Nickel, où l'augmentation apparaît très nettement sur les dépôts des dernières décennies.

Le comportement du Zinc est légèrement différent sur chacun de trois secteurs. On observe une légère augmentation des concentrations à Pierre Bénite sur les surfaces commençant à sédimenter au cours de la période 1860-1900, puis une diminution et stabilisation des teneurs au niveau des dépôts plus jeunes. La diminution est plus progressive à Donzère-Mondragon. Les patrons chimiques sont plus

irréguliers et variables à Péage-de-Roussillon, avec une tendance à la diminution des teneurs dans les dépôts jusqu'aux années 50 suivi d'une légère augmentation dans les sédiments de surface des dépôts plus récents (sauf pour le cuivre).

Dans les sédiments de surface des trois secteurs, les concentrations moyennes par période de début d'atterrissement dépassent rarement les S1 et les PEC.

Les seuils S1 et PEC ont été dépassés seulement dans le cas du Nickel, sur les dépôts les plus jeunes du site de Donzère. Pour le Nickel et le Cuivre, le TEC est quasi tout le temps dépassé quel que soit le secteur. En revanche, pour le Zinc et le plomb, c'est uniquement au niveau des dépôts antérieurs à 1950 que les concentrations moyennes dépassent le TEC. Rappelons que ces interprétations sont à considérer avec les précautions déjà évoquées (fraction fine analysée, constitution du fond géochimique).

Une relation statistique existe entre la concentration de certains ETM dans les sédiments de surface et la fréquence de connexion (Džubáková, 2015). C'est le cas pour Zn et le Pb qui montrent une relation statistiquement significative au 0,05. Les concentrations de Zn et Pb les plus élevées sont associées à une faible fréquence de connexion et vice versa.

Cette tendance à la corrélation négative entre les concentrations la fréquence annuelle de connexion est aussi observée pour Ni et Cu sans qu'elle soit cependant significative. Ces surfaces sont peu connectées et sédimentent peu, ce qui impliquerait qu'elles gardent en mémoire les flux de contaminants des années 1970 dans les 20 premiers centimètres des dépôts.

L'analyse des concentrations en métaux en fonction des périodes de début d'atterrissement et de la fréquence de submersion semble confirmer l'idée que les zones les plus connectées enregistrent en surface des apports de sédiments récents peu chargés en contaminants. Il est probable qu'elles enregistrent en profondeur des valeurs plus élevées si elles 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. Logiquement, les unités anciennes et déconnectées présentent une signature géochimique qui n'est pas marquée par les flux récents.

7. Conclusions générales

Réalisée sur plusieurs secteurs ayant enregistré deux principales phases d'aménagement (réalisation des ouvrages Girardon et mise en RCC dans les années 50 à 70), l'analyse comparée de l'évolution morphologique de la plaine alluviale du Rhône permet de souligner à la fois des similitudes entre les secteurs mais aussi des spécificités associées notamment à une chronologie des aménagements et à des contextes géographiques différents.

Dans les trois principaux cas étudiés (PBN, PDR, DZM), l'impact cumulé des aménagements sur la diminution de largeur moyenne de la bande active est d'environ 60%, 40% étant associé à la phase Girardon et 20% à la mise en RCC. Ceci correspond à une perte de surface de bande active de l'ordre de 200 ha pour PBN et PDR et de 1200 ha pour DZM. La même évolution temporelle est observée sur chacun des 3 secteurs. Cette rétraction s'accompagne d'une sédimentation et d'une végétalisation de

ces surfaces. Cette réduction touche les marges du chenal principal et notamment les casiers mais également les bras secondaires. De fait, le cours du Rhône, plutôt à lits multiples au 19^e siècle évolue vers un lit unique.

Les sondages à la perche couplés aux données topographiques issues de la BDT ont permis d'estimer les volumes de sédiments stockés dans les différents compartiments de la plaine. La plupart des unités sont perchées de plusieurs mètres au-dessus du chenal actif, du fait de l'incision du lit au cours du 20^e siècle dans ses alluvions grossières. Ceci est particulièrement le cas à PBN. Ainsi, les unités stockent une quantité importante de graviers sur lesquels une sédimentation fine est observée. Celle-ci a été principalement déposée avant le 20^e siècle dans la plaine ancienne et au 20^e siècle dans les autres compartiments progressivement déconnectés au cours de cette période.

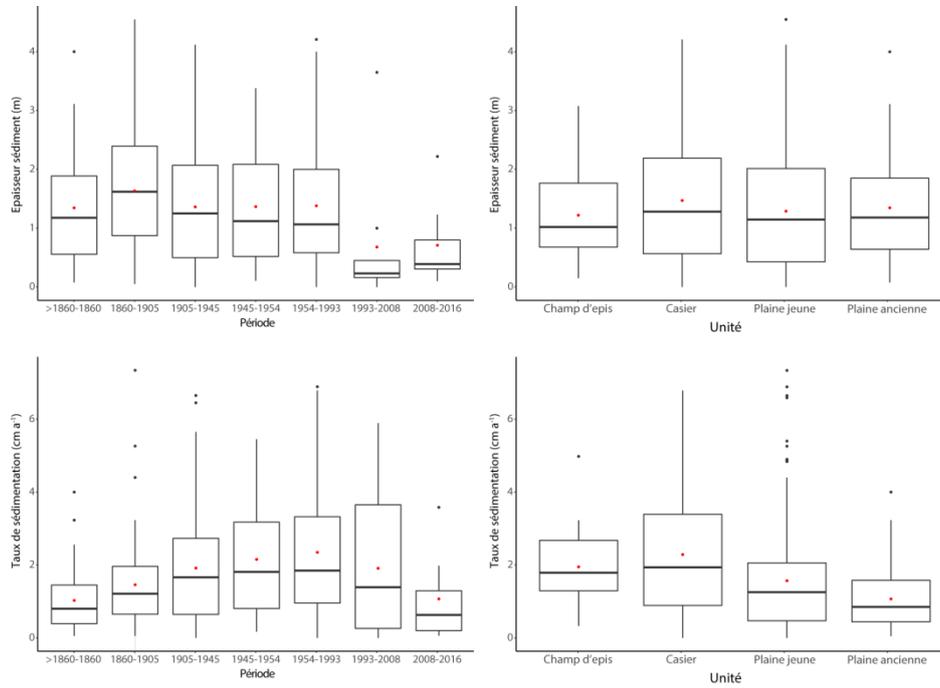
Les taux de sédimentation estimés au 20^e siècle varient selon les sites de 1,3 cm/an à 1,9 cm/an. Les carottes localisées sur les marges externes enregistrent à priori une sédimentation plus faible (0,2 à 0,45 cm/an) alors que certains casiers peuvent enregistrer une sédimentation de 2 à 7 cm/an.

Sur PDR et DZM, la sédimentation semble particulièrement forte sur les unités déconnectées au début du 20^e siècle et se ralentit ensuite. Sur PBN le patron temporel semble un peu différent, avec une sédimentation plus marquée sur les périodes récentes que sur les plus anciennes. La sédimentation observée dans les casiers après la mise en RCC est complexe, à la fois sablo-limoneuse et parfois graveleuse. Ceci confirme que les graviers présents dans les casiers correspondent pour partie à des remaniements du fond des casiers mais aussi à des apports sédimentaires. Il est donc probable que ces graviers soient plutôt de petite taille comparativement à ceux qui constituent le lit. Cette sédimentation se marque par deux phases principales, une première phase consécutive à la mise en place des casiers qui s'exprime souvent par une sédimentation sur la partie distale des casiers et une seconde phase consécutive à la dérivation qui s'exprime cette fois sur la partie plus proximale à la digue submergée. Si ces grandes phases sont bien mises en évidence, les facteurs contrôlant cette sédimentation sont régis par les conditions hydrauliques locales qui ont pu varier significativement au cours du temps et expliquent une très forte variabilité de la sédimentation entre les casiers. Les taux de sédimentation observés dans les casiers fluctuent le long du continuum selon un patron qui peut être graduel voire parfois périodique. Ces patrons sont en lien avec l'évolution longitudinale des forces tractrices et la fréquence de connexion.

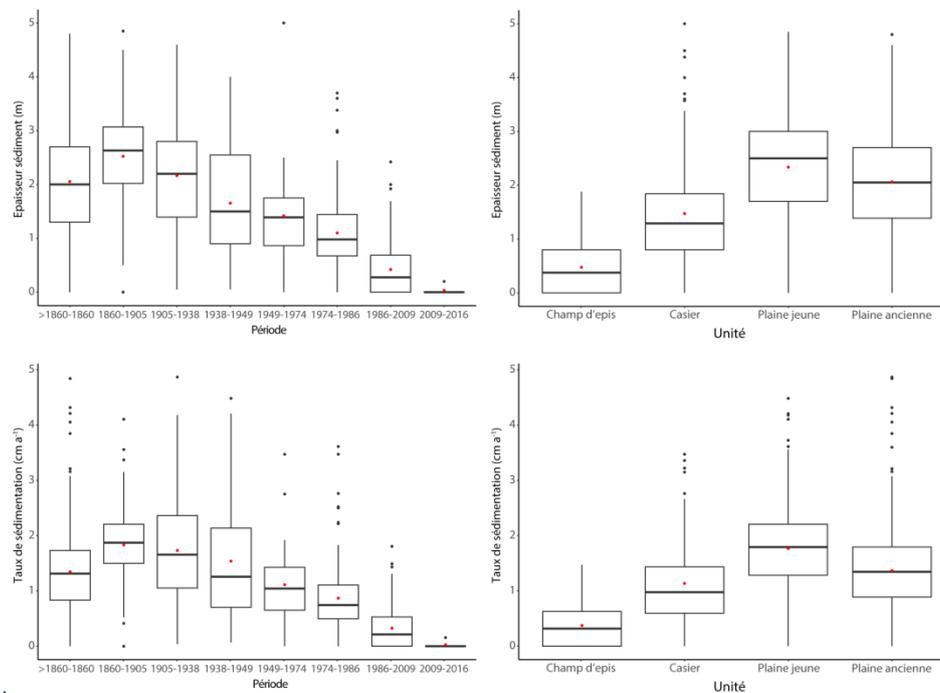
Les analyses chimiques montrent un gradient décroissant des teneurs pour le Plomb, le Zinc et le Cuivre, des secteurs les plus urbains (PBN et PDR) aux secteurs les plus ruraux (MON, DZM). Les secteurs aval sont caractérisés également par des teneurs en Nickel, Fer, et Strontium significativement plus importantes que les deux secteurs amont, ce qui pourrait s'expliquer par une origine géogénique. Les contaminations les plus fortes (seuil S1 dépassés) sont observées très localement à Péage-de-Roussillon et à Pierre Bénite. Elles sont particulièrement marquées en surface sur les unités les plus anciennes et les plus déconnectées. L'histoire sédimentaire des dépôts alluviaux présentant ces contaminations ponctuelles sera approfondie lors de l'OSR5.

8. Annexes

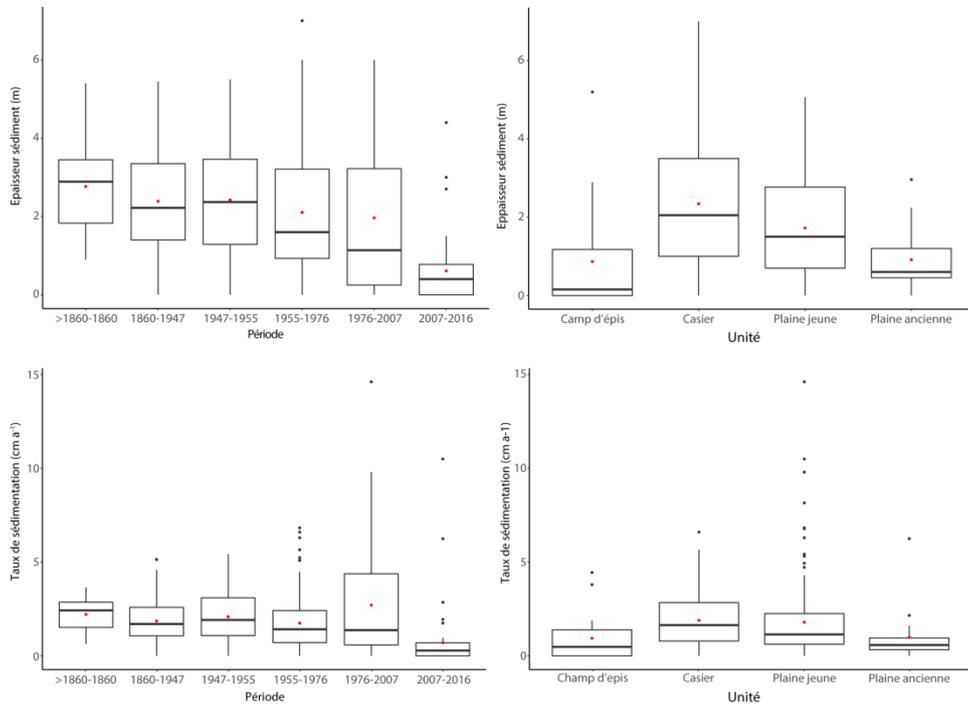
Annexe 1. Boite à moustache montrant les épaisseurs et taux de sédimentation aux différentes unités et périodes de sédimentation pour le secteur de Pierre Bénite



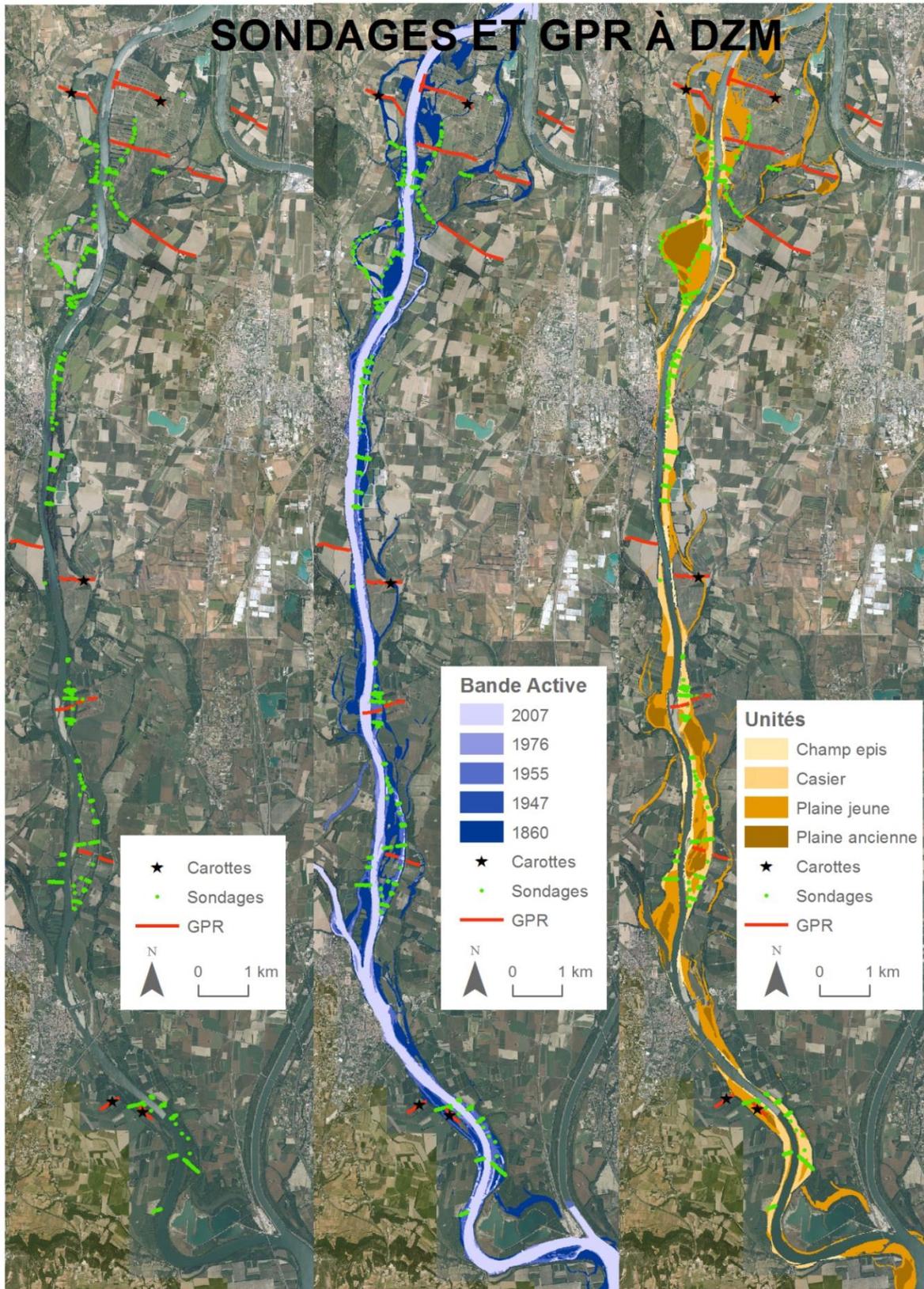
Annexe 2. Boite à moustache montrant les épaisseurs et les taux de sédimentation aux différentes unités et périodes de sédimentation pour le secteur de Péage-de-Roussillon



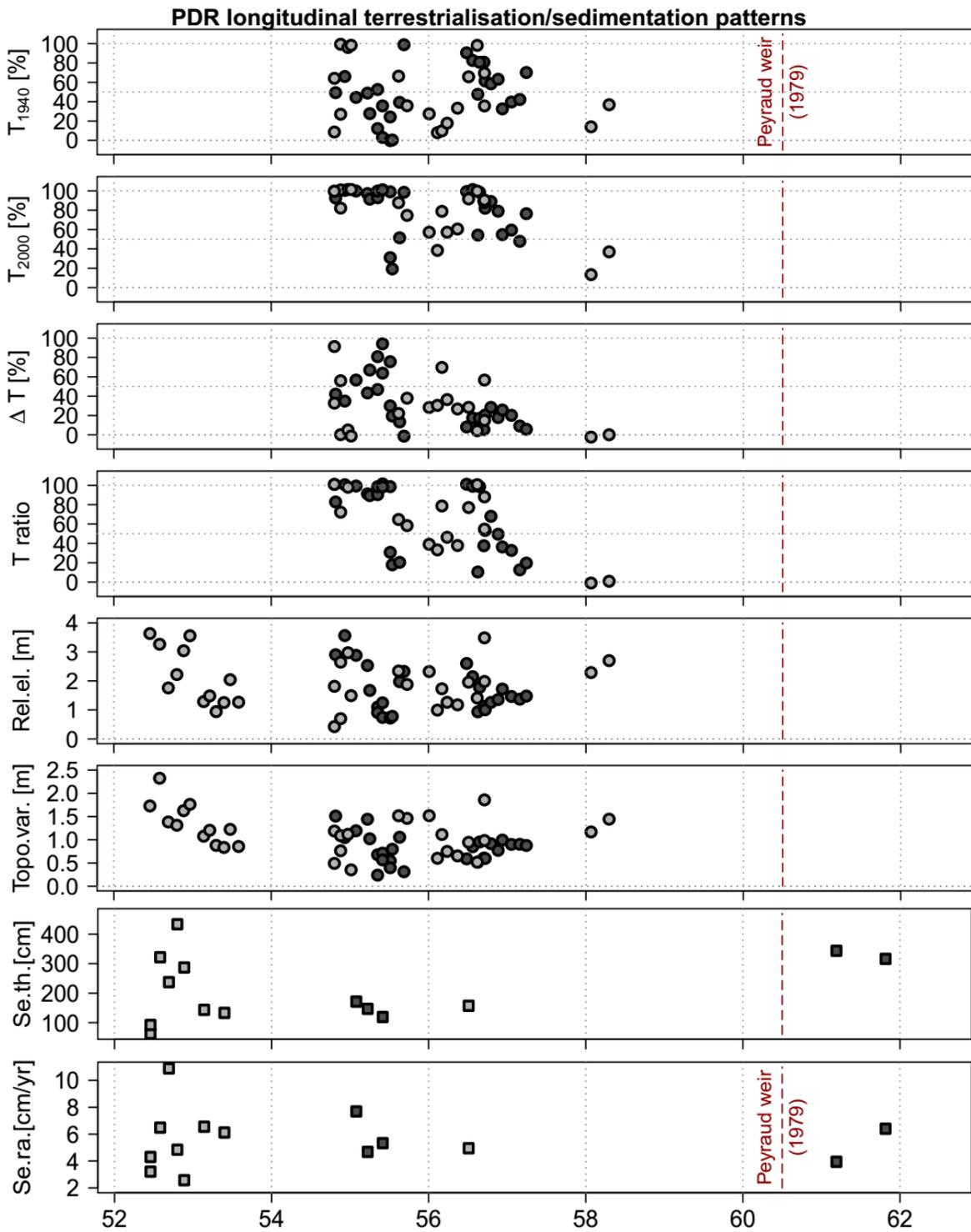
Annexe 3. Boîte à moustache montrant les épaisseurs et les taux de sédimentation aux différentes unités et périodes de sédimentation pour le secteur de Donzère-Mondragon



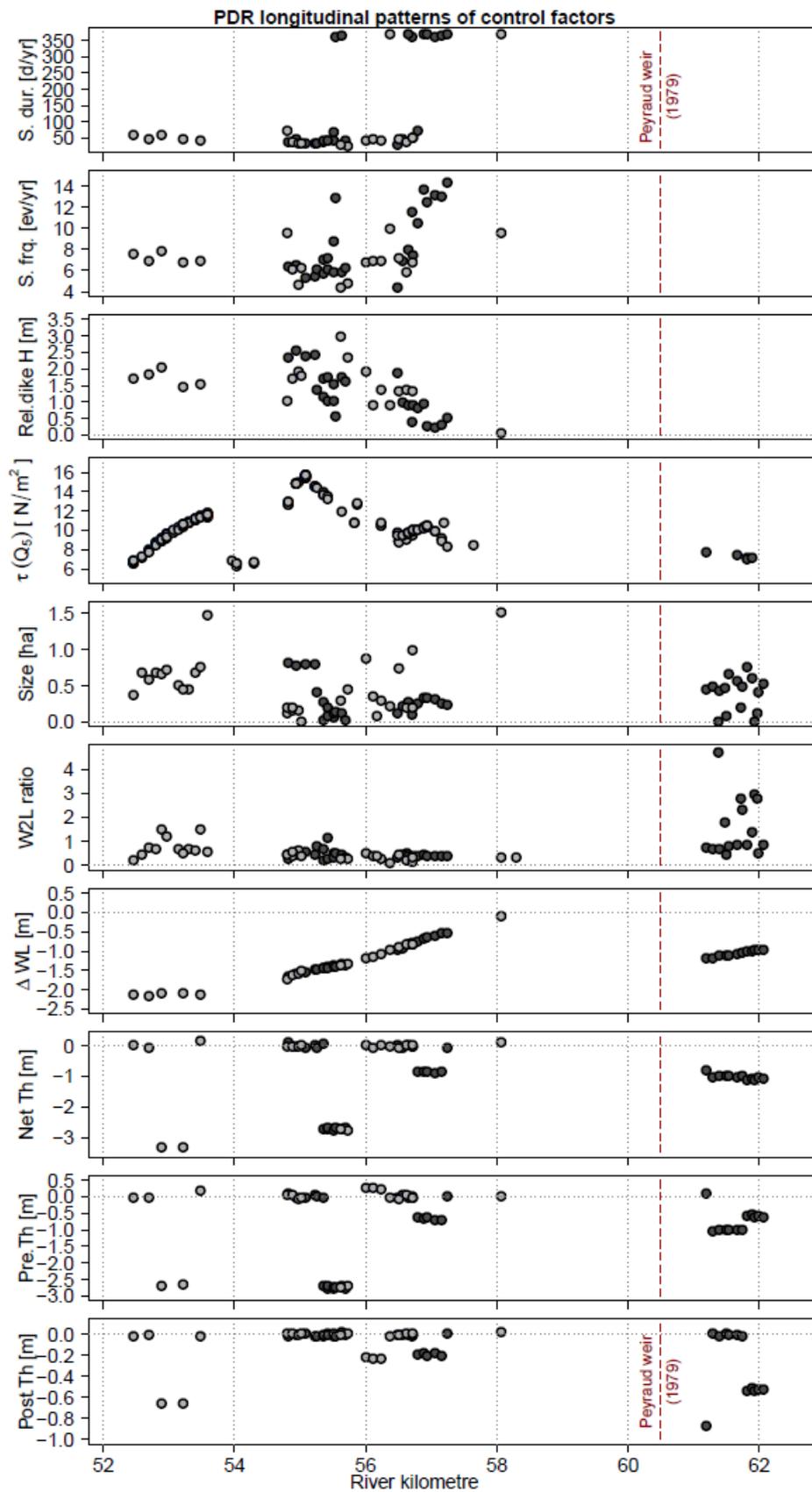
Annexe 4. Localisation sur le site de Donzère des profils GPR, des carottes sédimentaires et des sondages à la perche



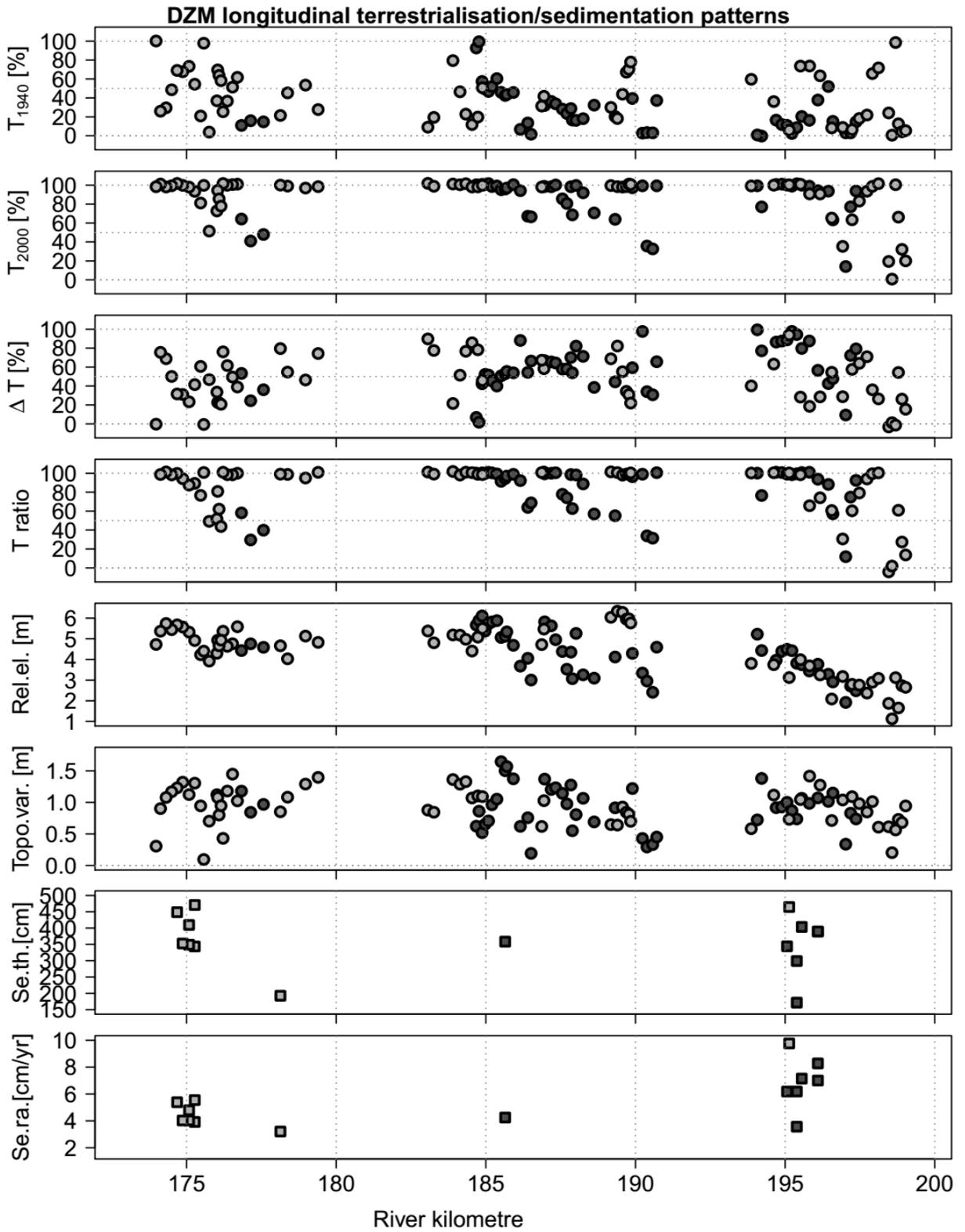
Annexe 5. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation dans le secteur de PDR. Voir légende de la Figure 28 pour les abréviations



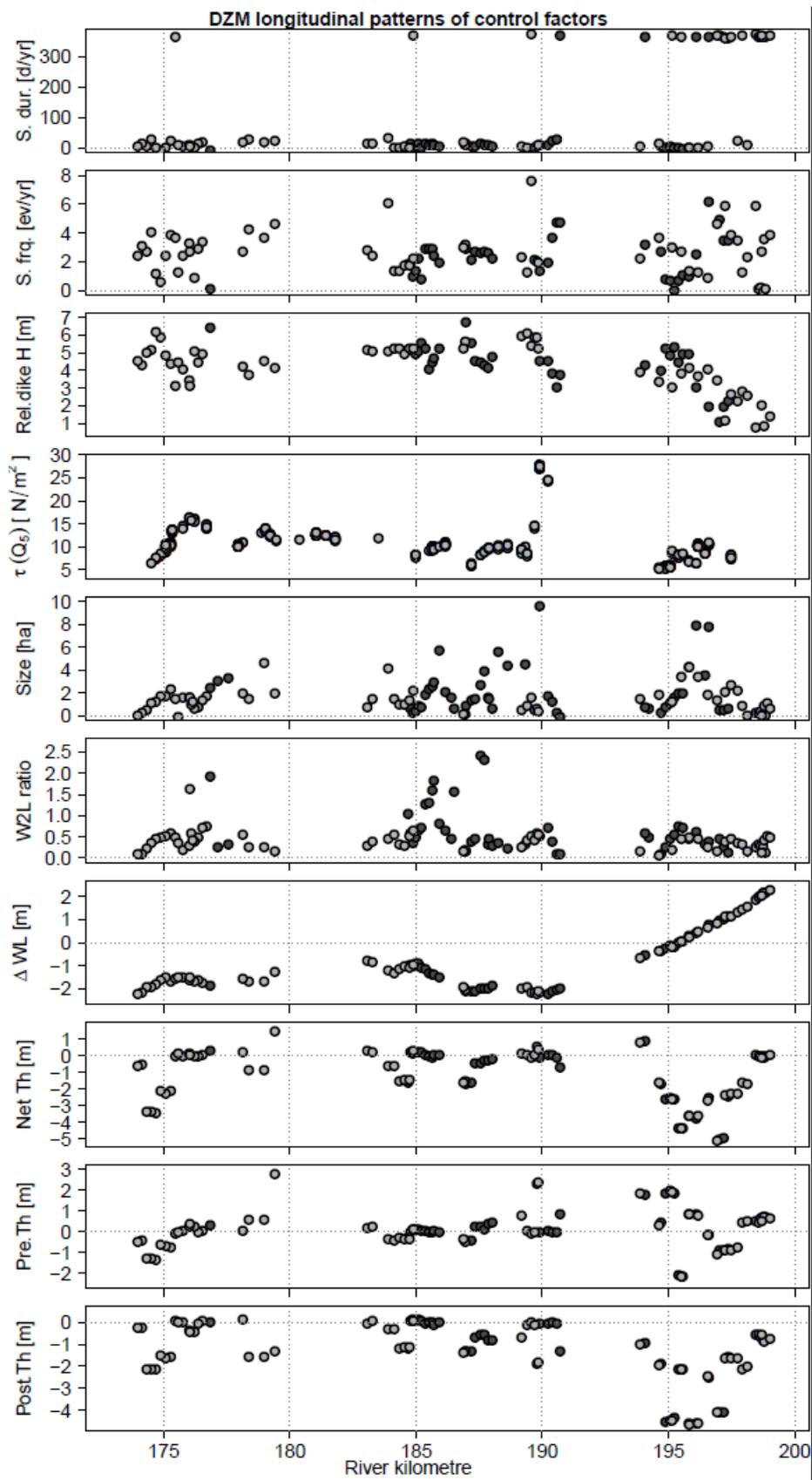
Annexe 6. Patrons longitudinaux des conditions environnementales dans le secteur de PDR.
 Voir légende de la Figure 28 pour les abréviations



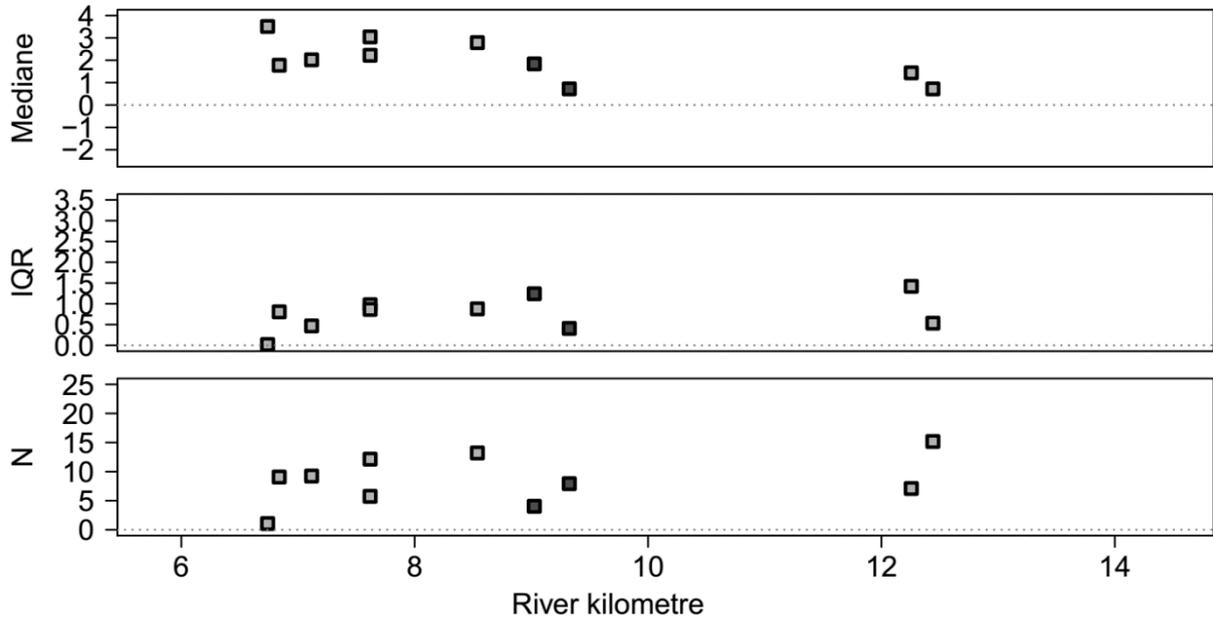
Annexe 7. Patrons longitudinaux de l'atterrissement et de la sédimentation dans le secteur de DZM. Voir légende de la Figure 28 pour les abréviations



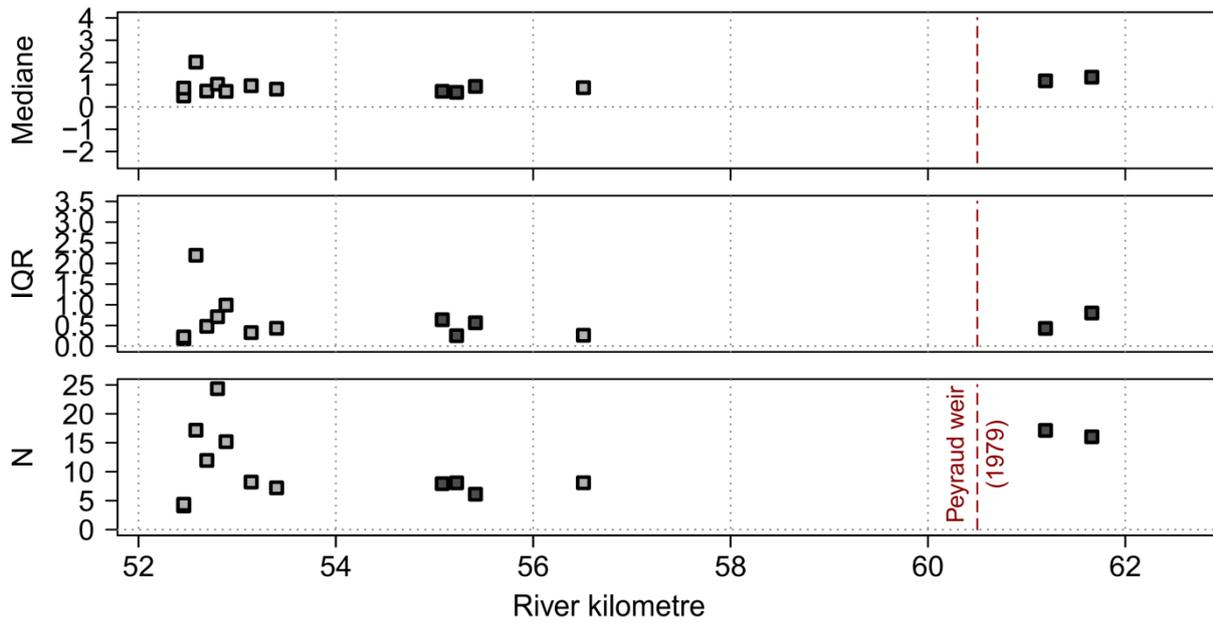
Annexe 8. Patrons longitudinaux des conditions environnementales dans le secteur de DZM. Voir légende de la Figure 28 pour les abréviations



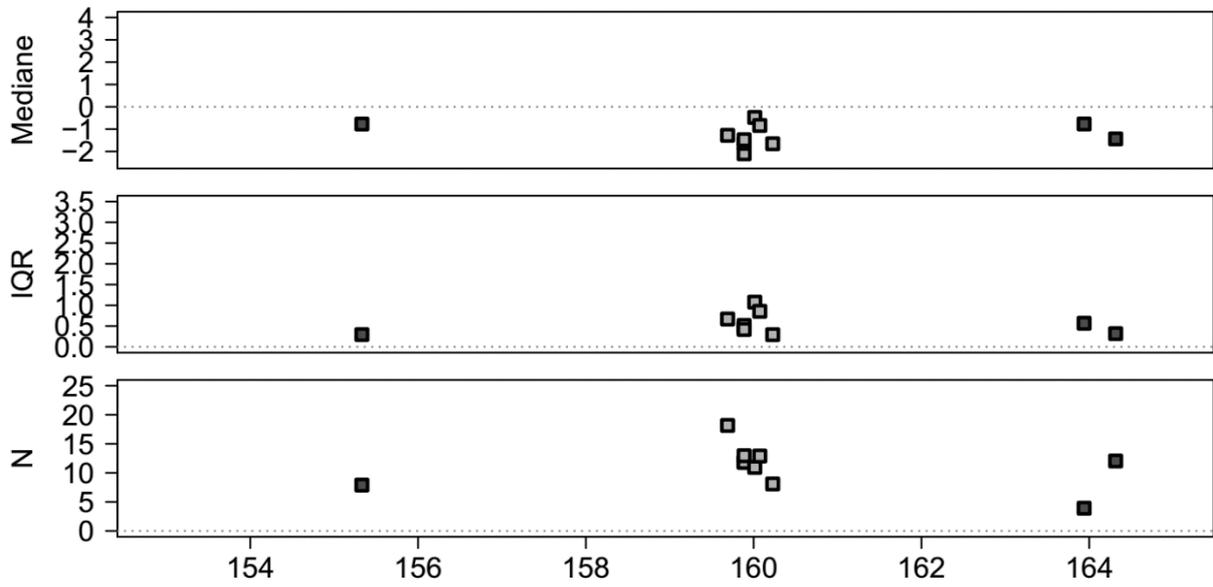
Annexe 9. Secteur PBN : analyse longitudinale de la médiane de coordonnées des individus sur l'axe 1 de à l'ACP de la Figure 31, des écarts-interquartiles. N correspond aux effectifs



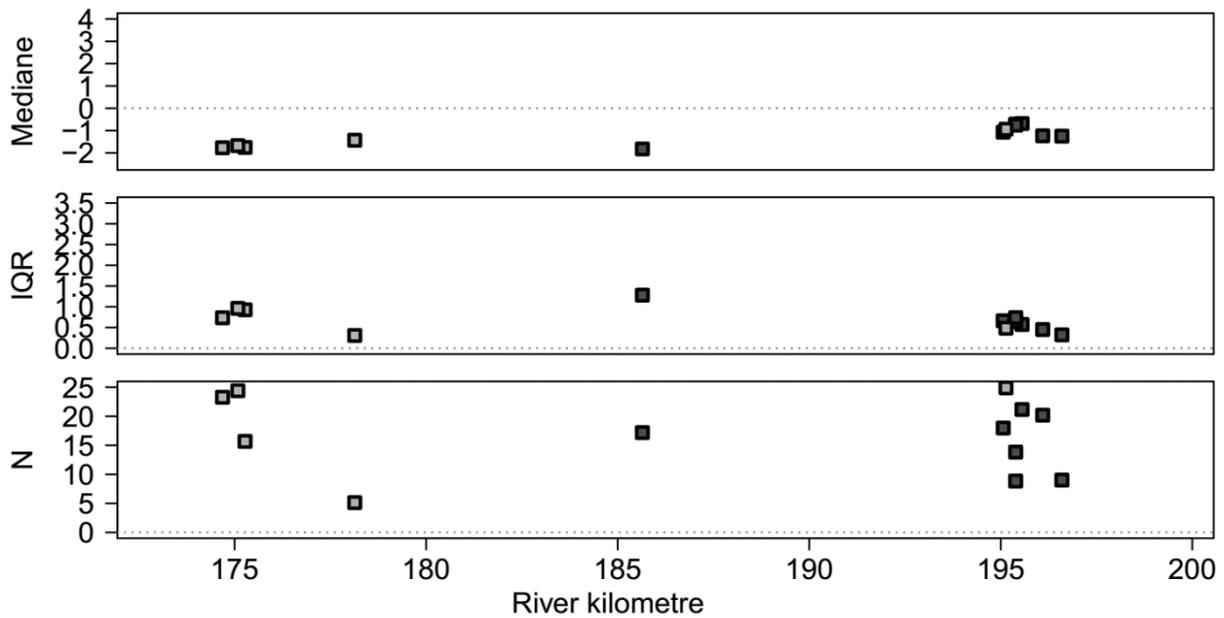
Annexe 10. Secteur PDR : analyse longitudinale de la médiane de coordonnées des individus sur l'axe 1 de à l'ACP de la Figure 31, des écarts-interquartiles. N correspond aux effectifs



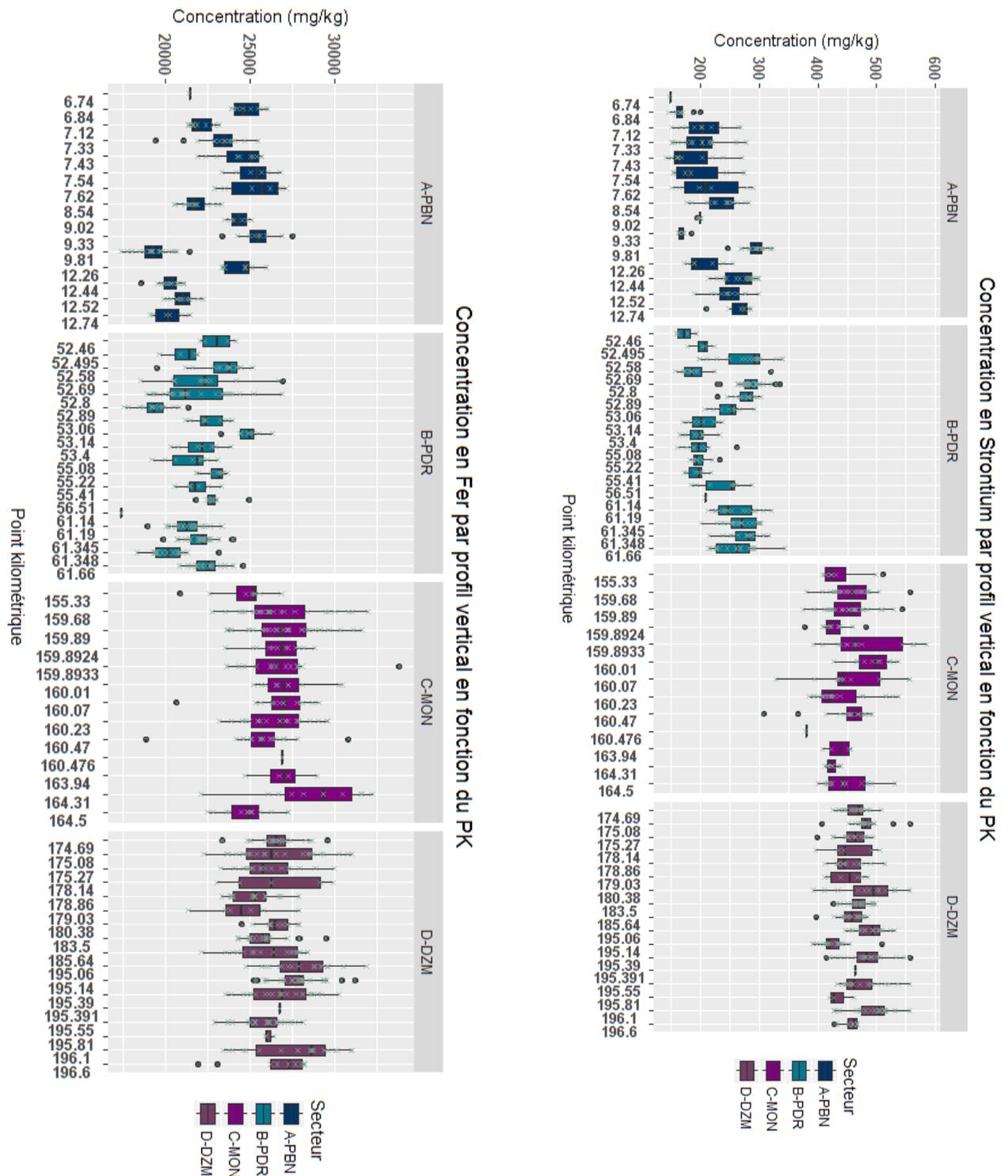
Annexe 11. Secteur MON : analyse longitudinale de la médiane de coordonnées des individus sur l'axe 1 de à l'ACP de la Figure 31, des écarts-interquartiles. N correspond aux effectifs



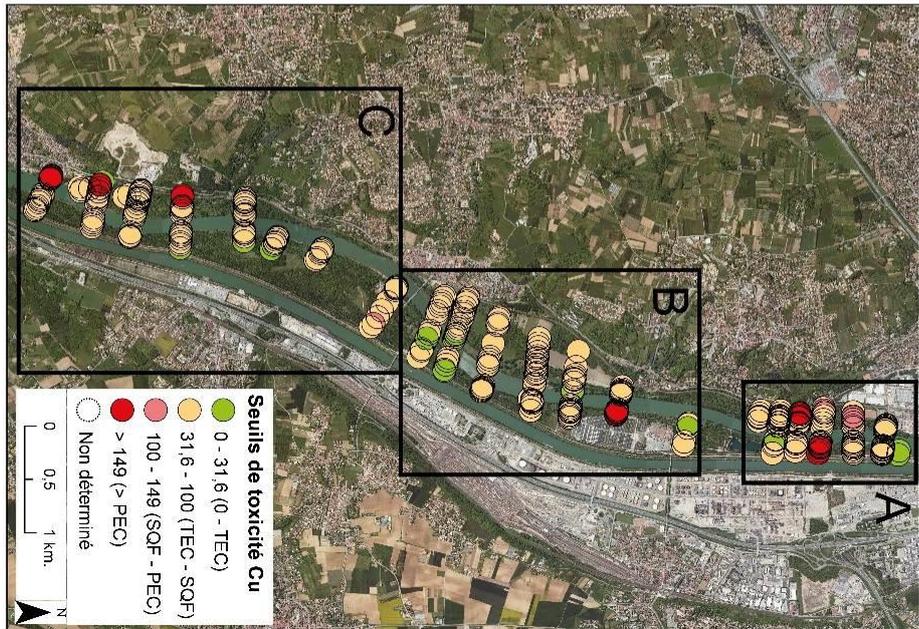
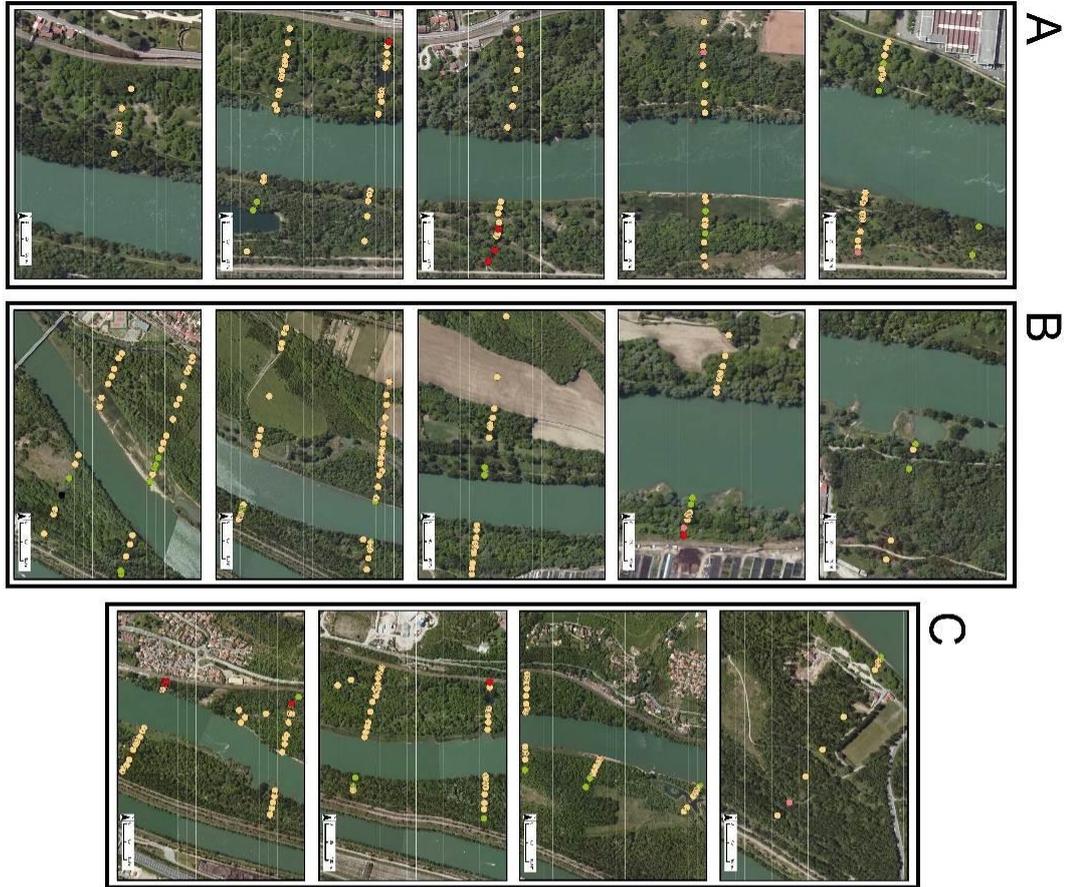
Annexe 12. Secteur DZM : analyse longitudinale de la médiane de coordonnées des individus sur l'axe 1 de à l'ACP de la Figure 31, des écarts-interquartiles. N correspond aux effectifs



Annexe 13. Graphique représentant les teneurs en Fer (à gauche) et en Strontium (à droite) en fonction du secteur, selon un gradient amont-aval, organisé par profil

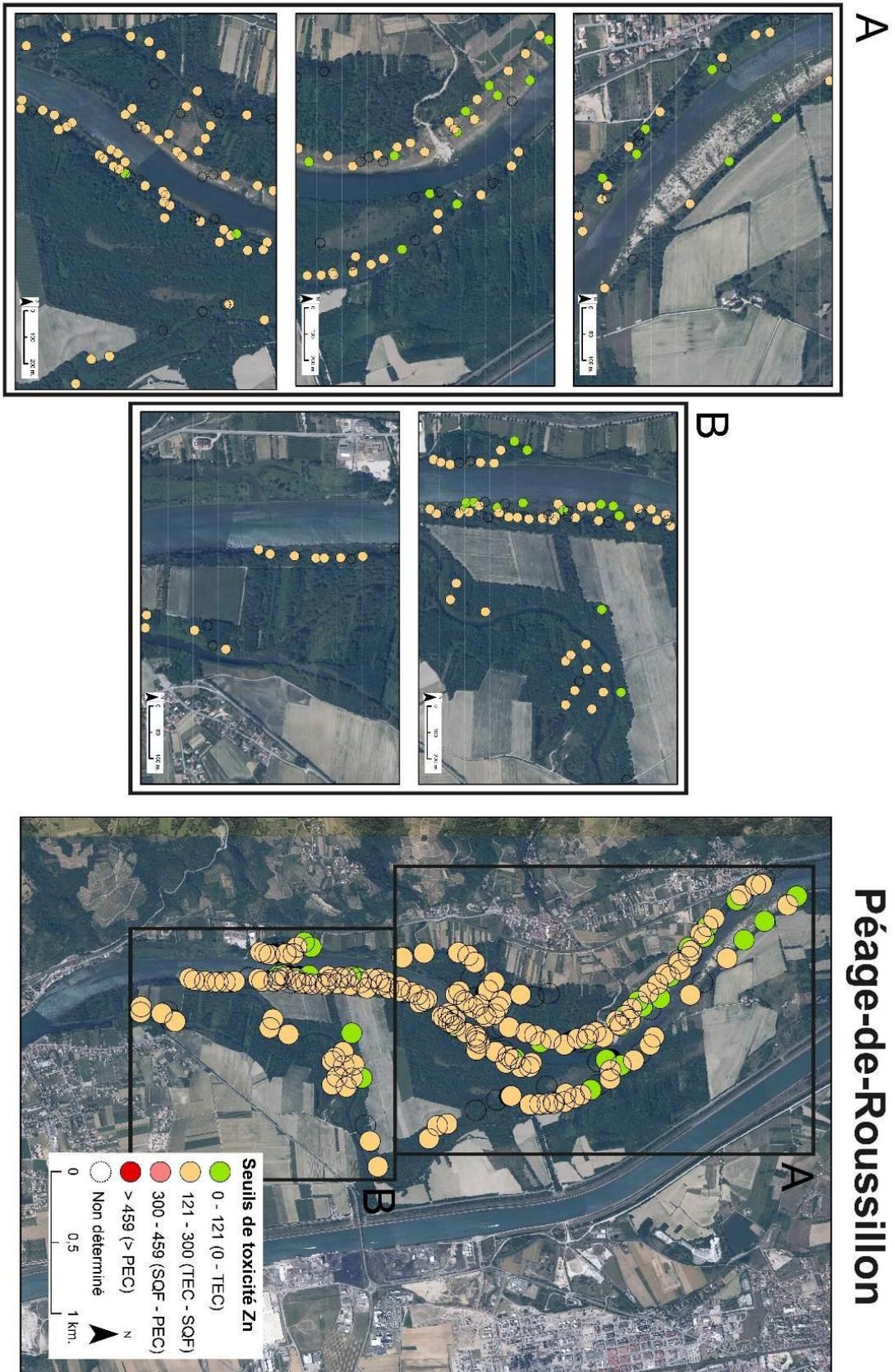


Annexe 14. Carte - Concentration en Cuivre dans les échantillons superficiels à Pierre-Bénite (mg/kg)
 Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)

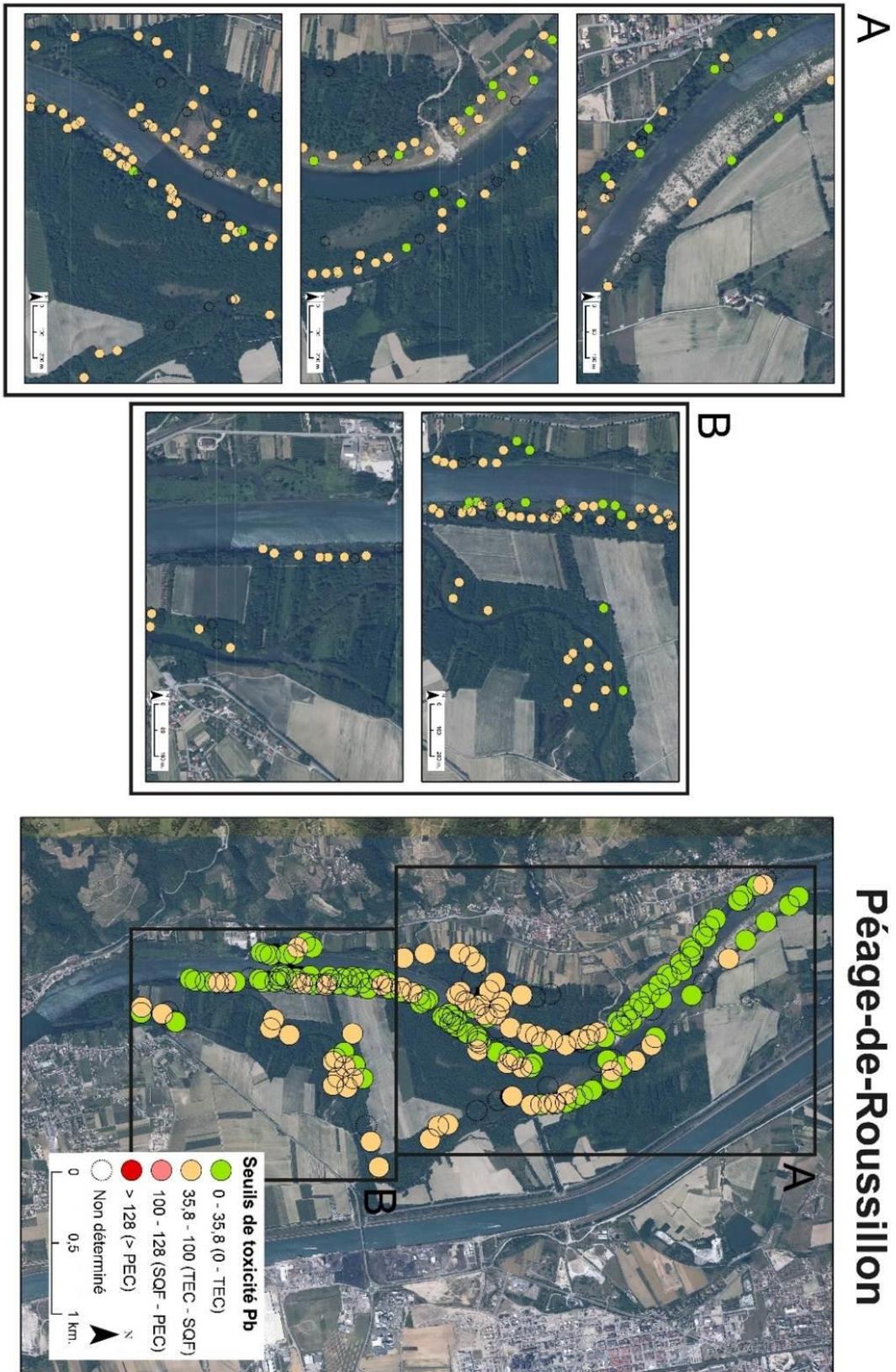


Pierre-Bénite

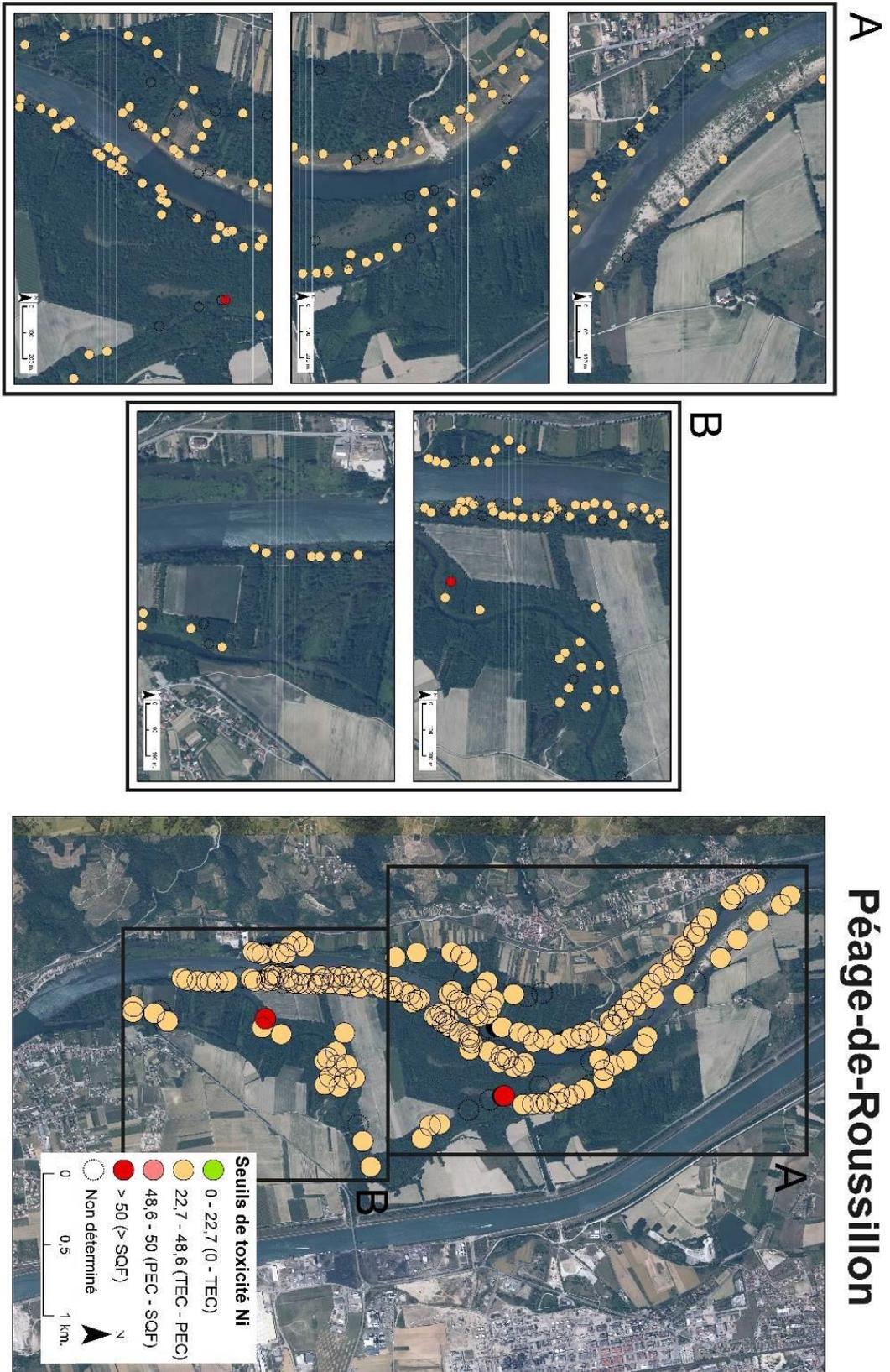
Annexe 15. Carte - Concentration en Zinc dans les échantillons superficiels à Péage-de-Roussillon (mg/kg)
 Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)



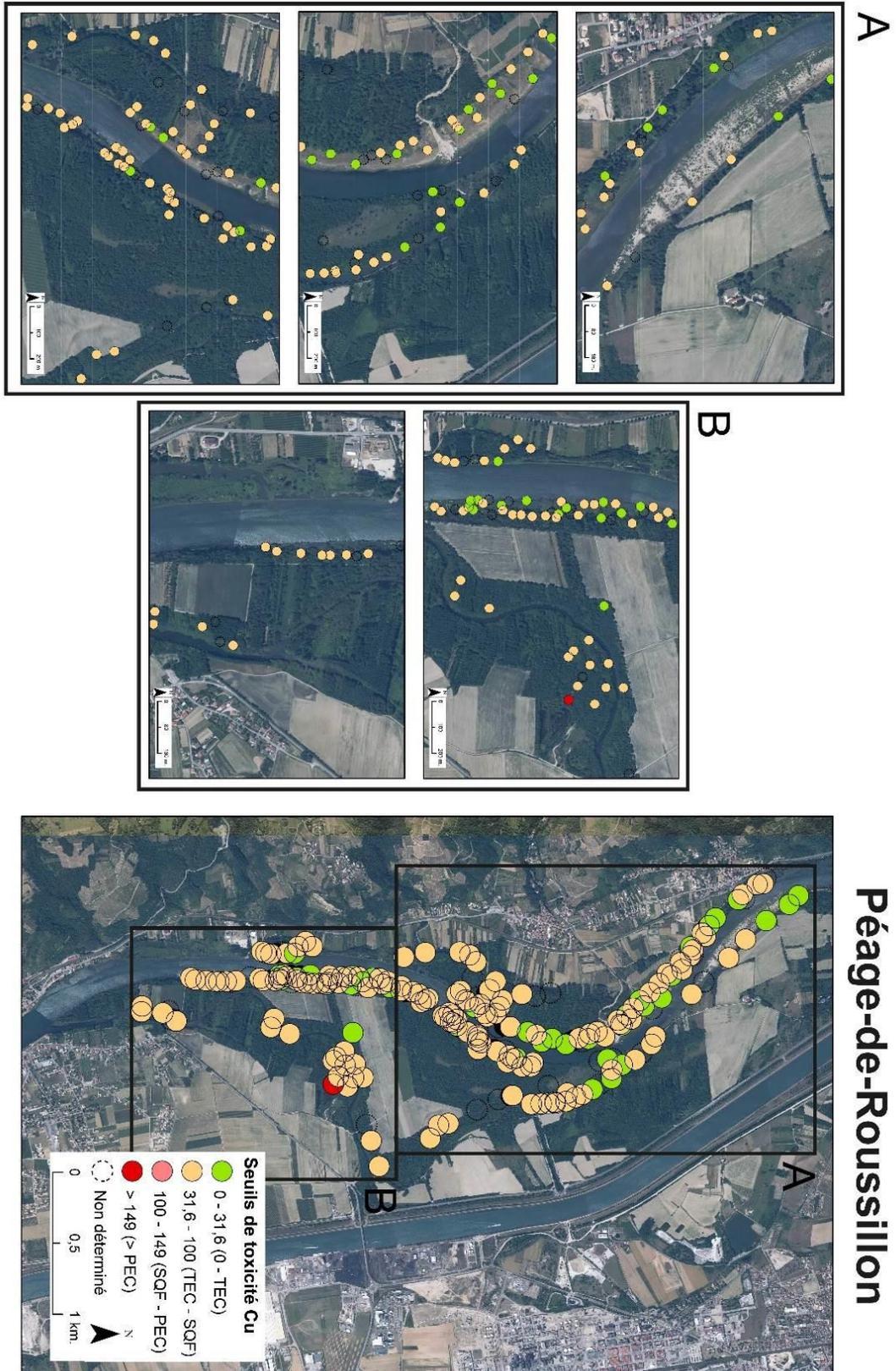
Annexe 16. Carte - Concentration en Plomb dans les échantillons superficiels à Péage-de-Roussillon (mg/kg)
 Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)



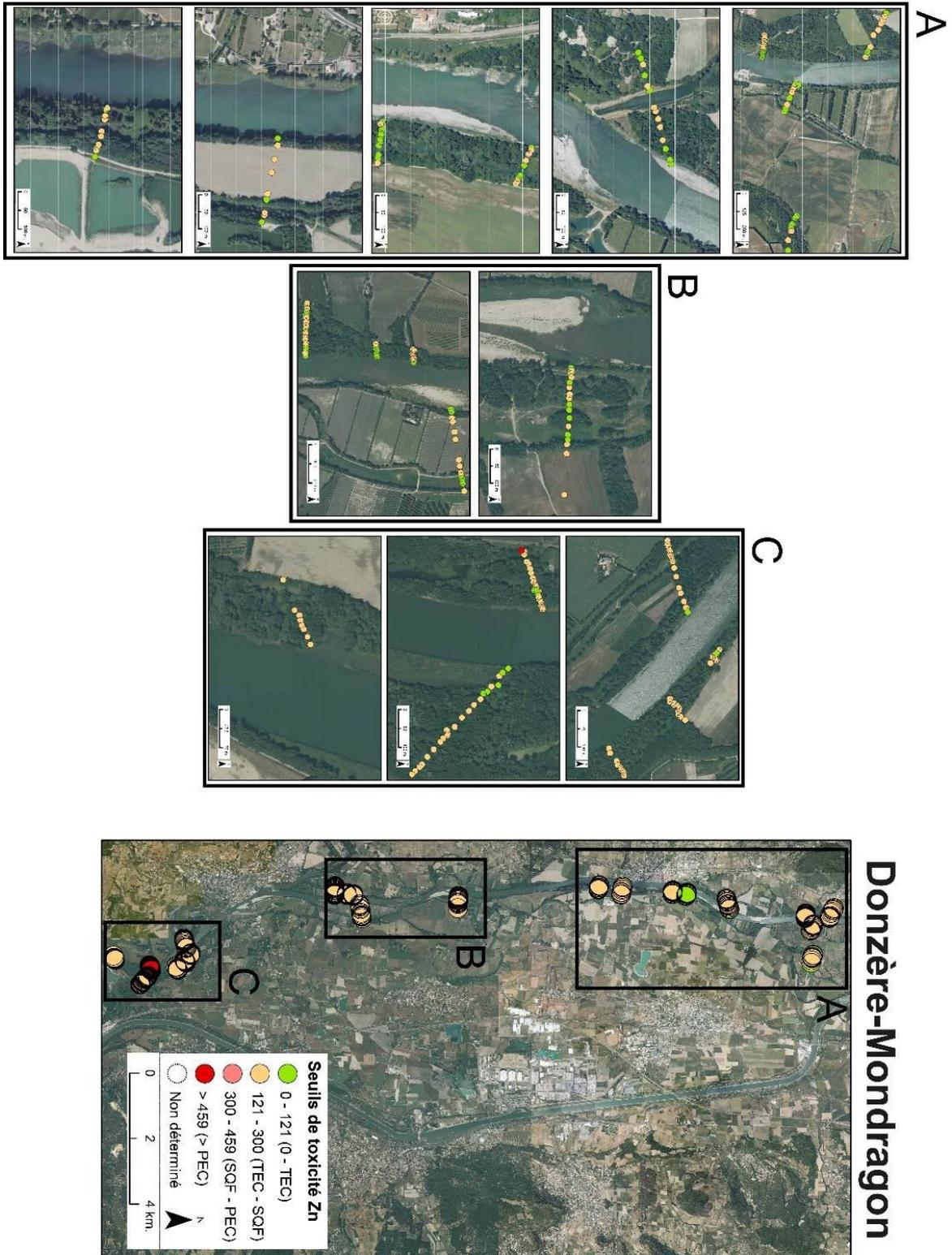
Annexe 17. Carte - Concentration en Nickel dans les échantillons superficiels à Péage-de-Roussillon (mg/kg)
 Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)



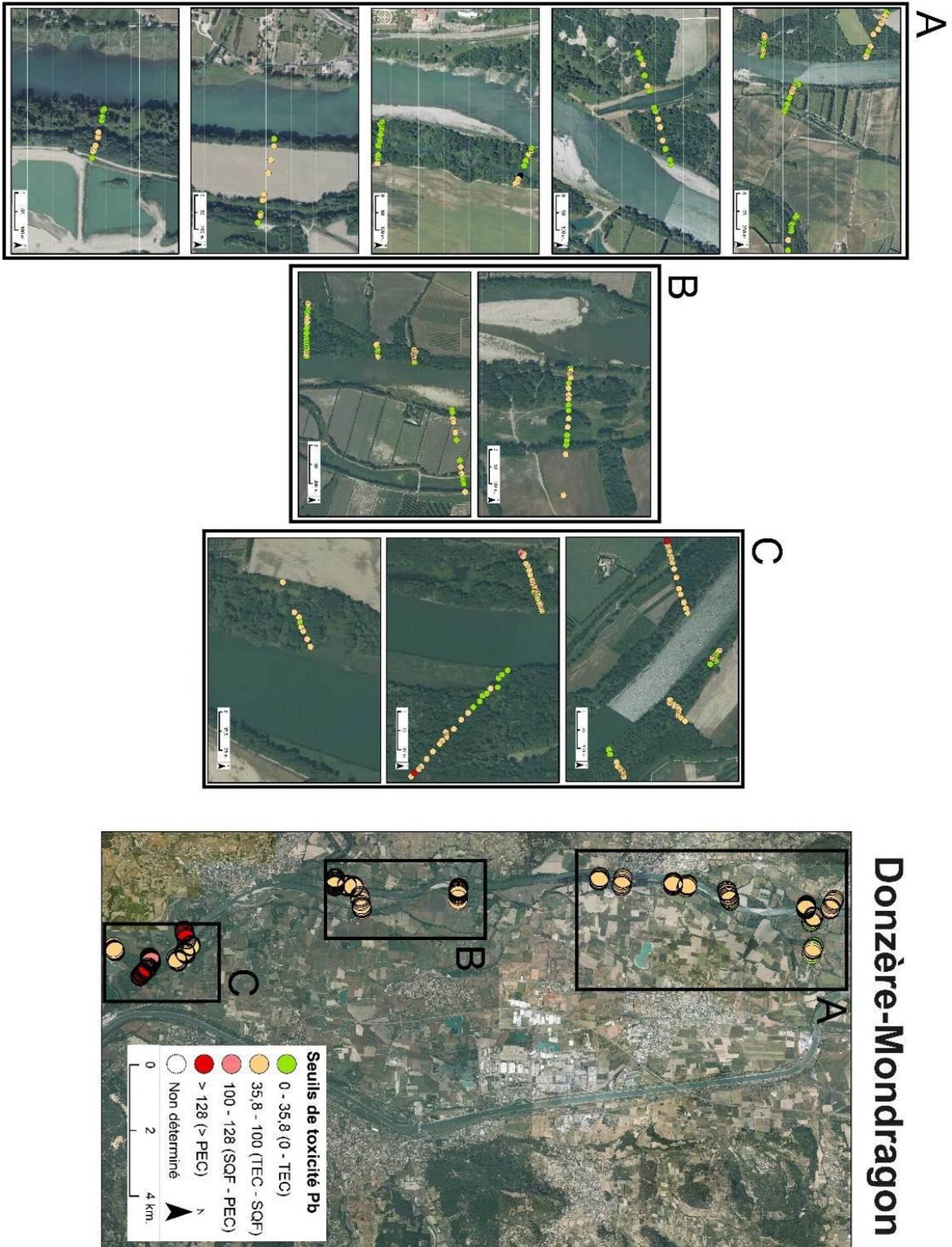
Annexe 18. Carte - Concentration en Cuivre dans les échantillons superficiels à Péage-de-Roussillon (mg/kg)
 Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)



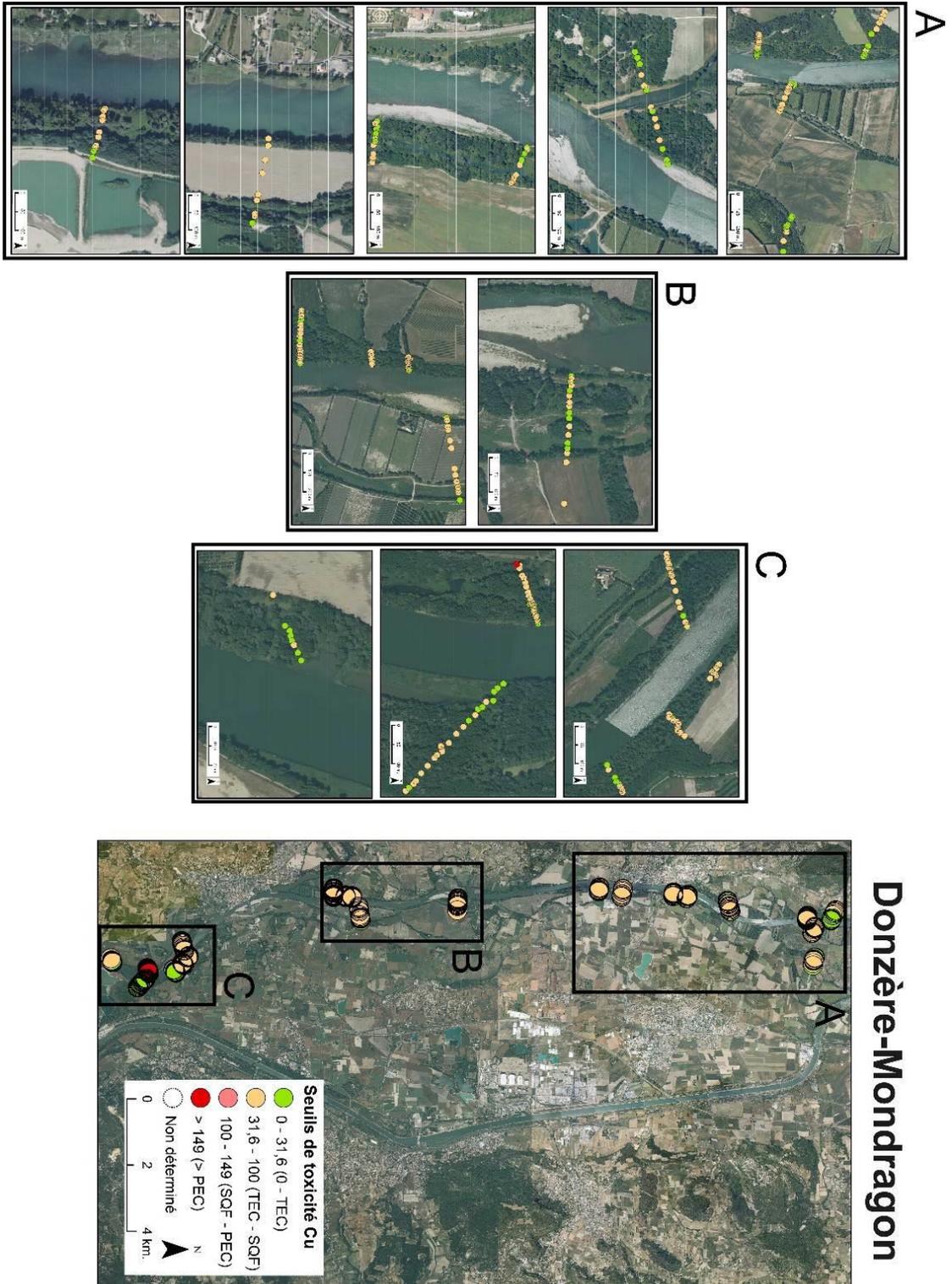
Annexe 19. Carte - Concentration en Zinc dans les échantillons superficiels à Donzère (mg/kg)
 Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)



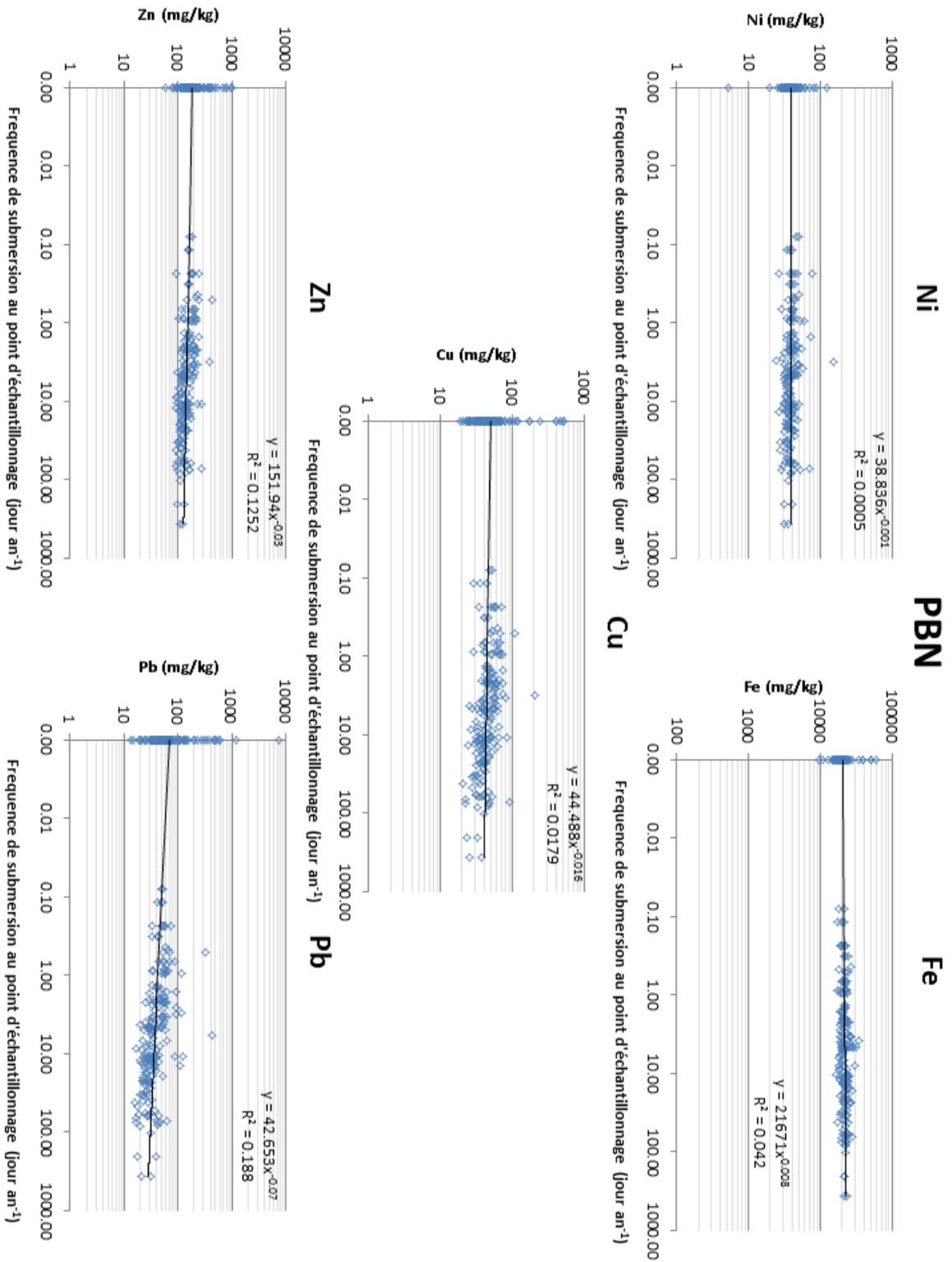
Annexe 20. Carte - Concentration en Plomb dans les échantillons superficiels à Donzère (mg/kg)
 Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)



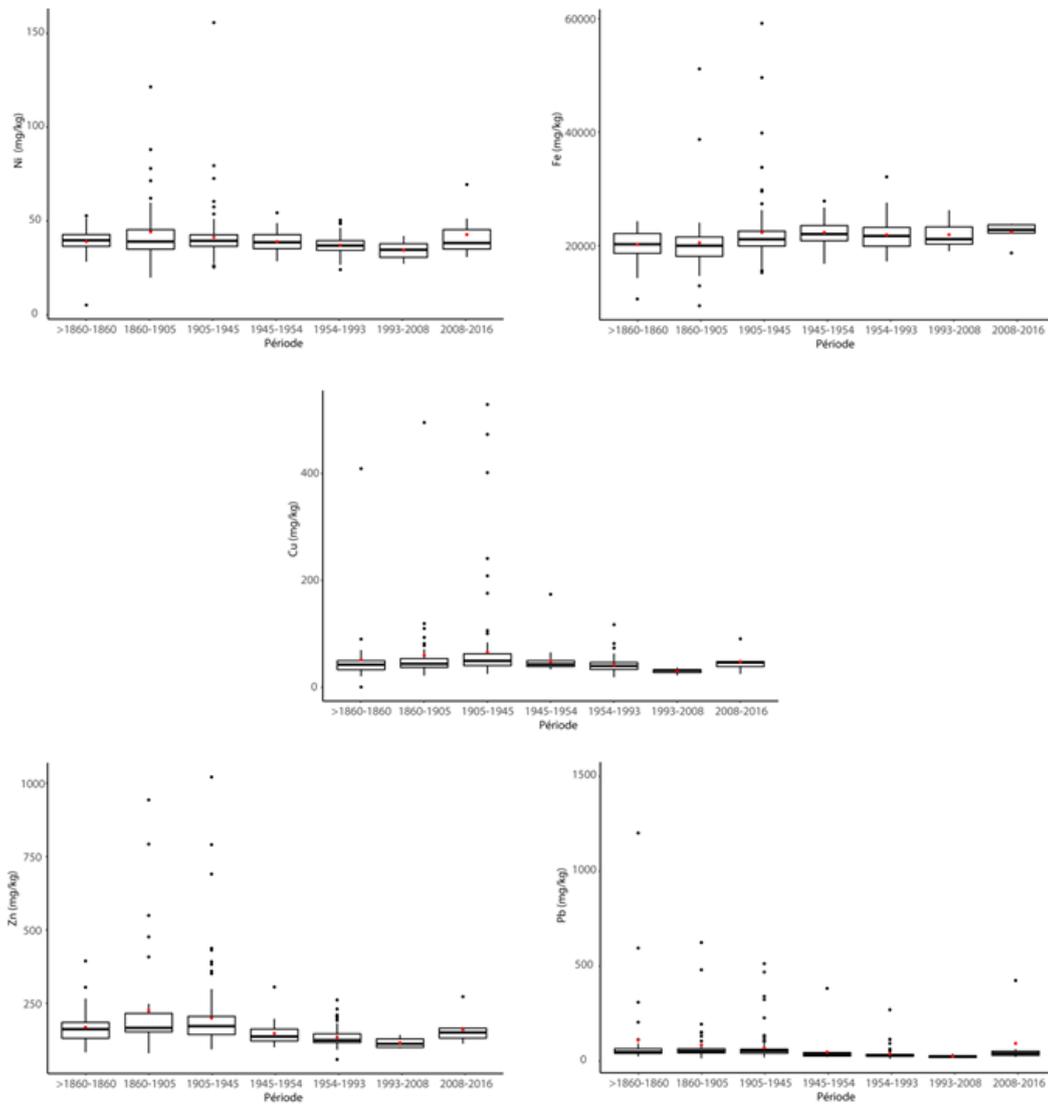
Annexe 21. Carte - Concentration en Cuivre dans les échantillons superficiels à Donzère (mg/kg)
 Seuils de qualité S1 (d'après l'arrêté du 9 août 2006) et les TEC et PEC d'après MacDonald (2000)



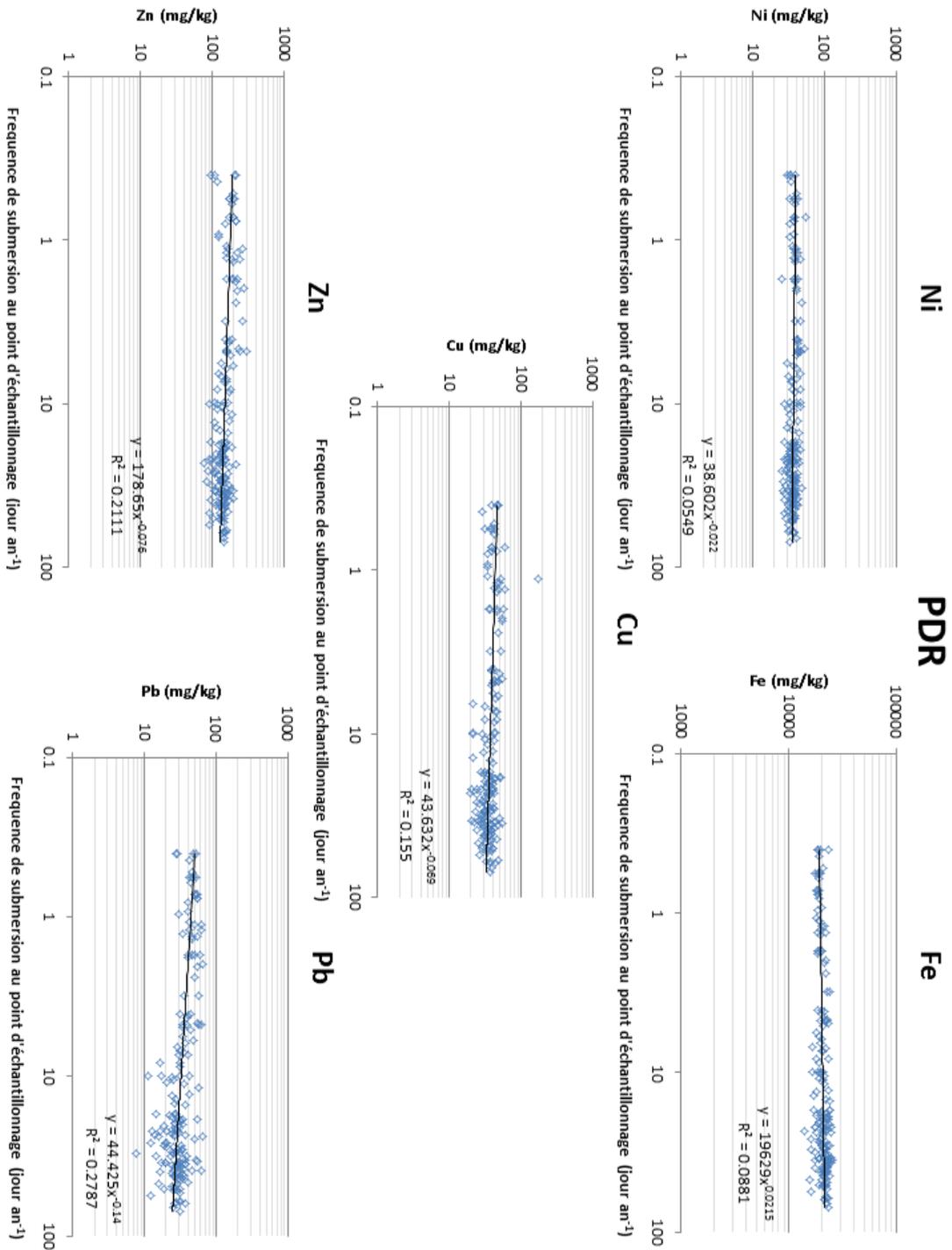
Annexe 22. Sédiments de surface - Relation entre la concentration des teneurs en éléments métalliques et la fréquence annuelle de connexion à Pierre Bénite



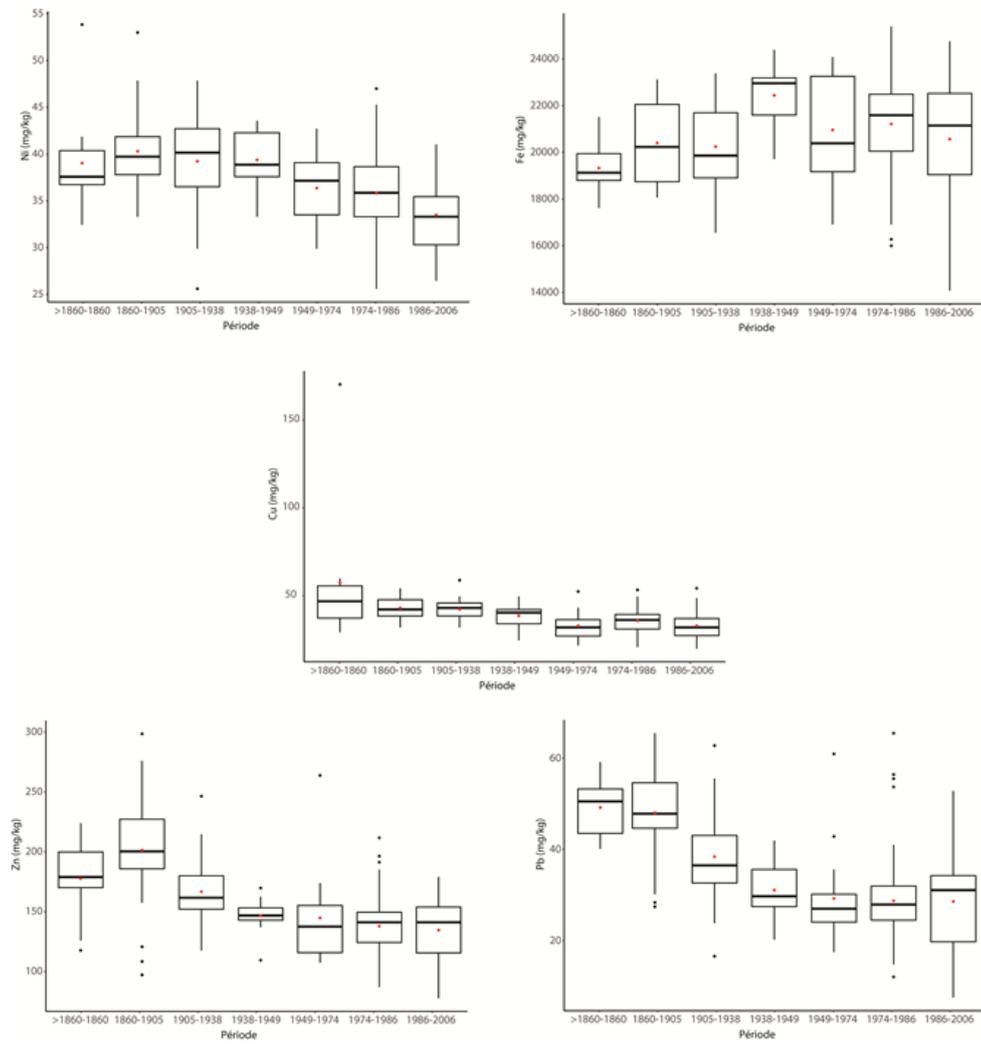
Annexe 23. Sédiments de surface - boîte à moustaches montrant les teneurs en éléments métalliques aux différentes périodes de sédimentation pour le secteur de Pierre Bénite



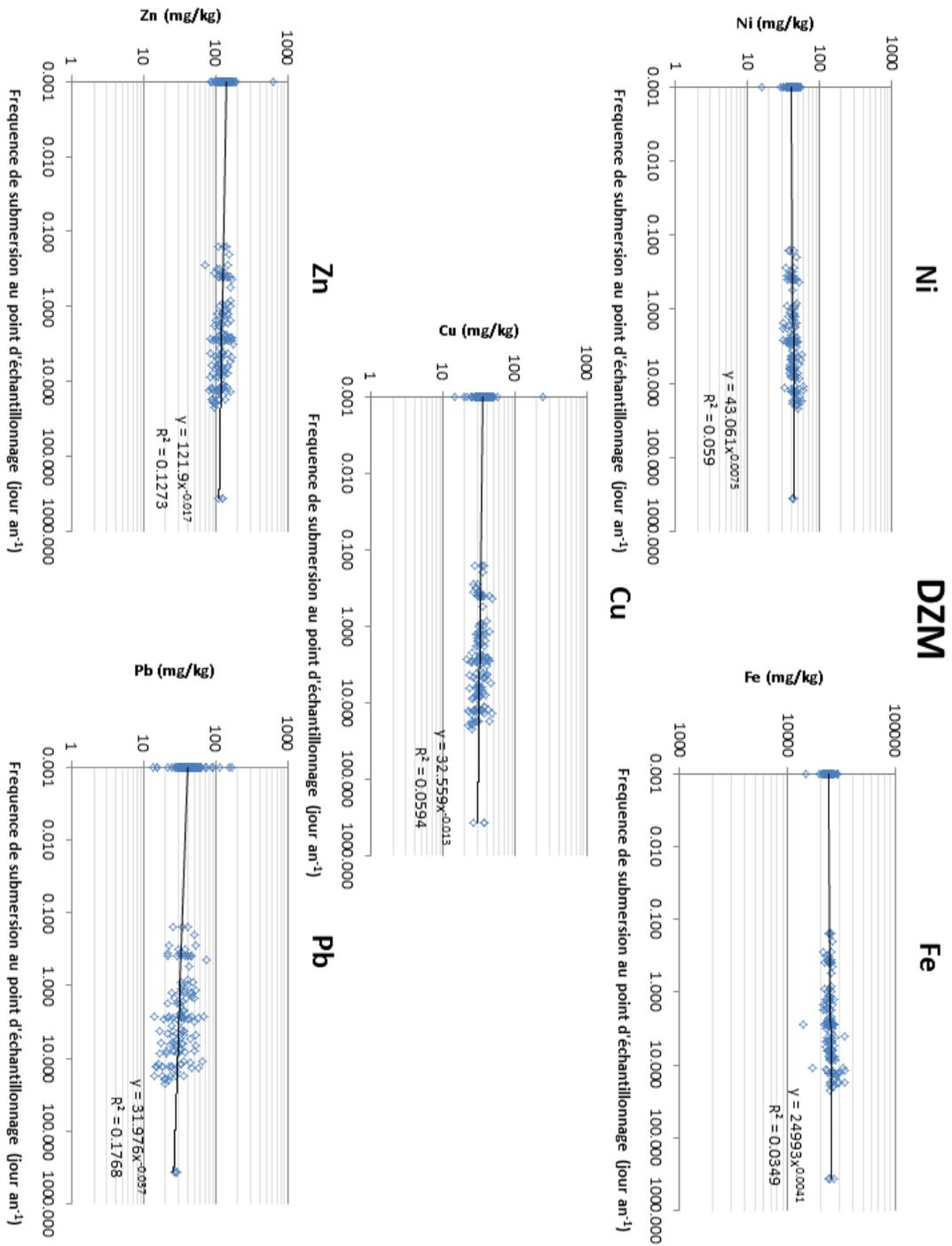
Annexe 24. Relation entre la concentration des teneurs en éléments métalliques et la fréquence annuelle de connexion à Péage-de-Roussillon



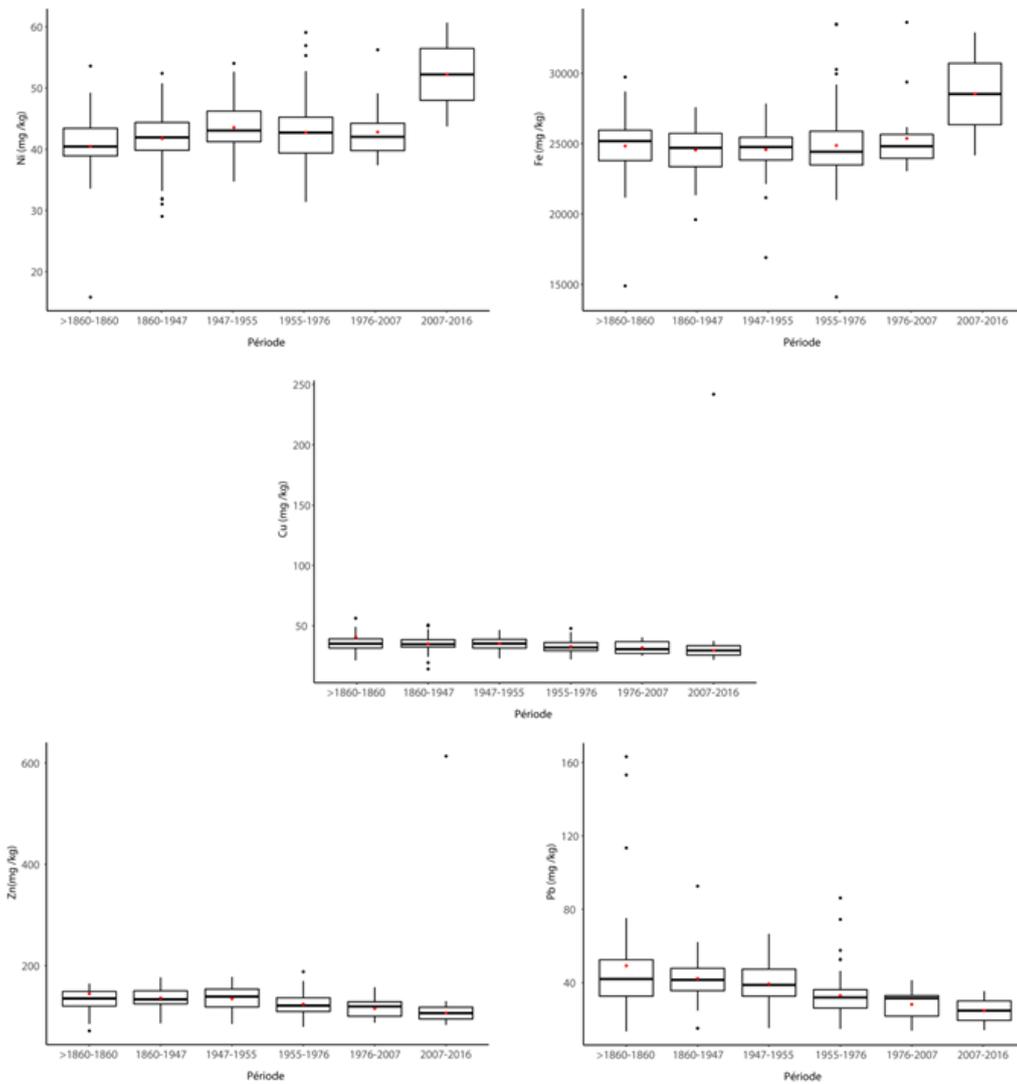
Annexe 25. Boite à moustache montrant les teneurs en éléments métalliques aux différentes périodes de sédimentation pour le secteur de Péage-de-Roussillon

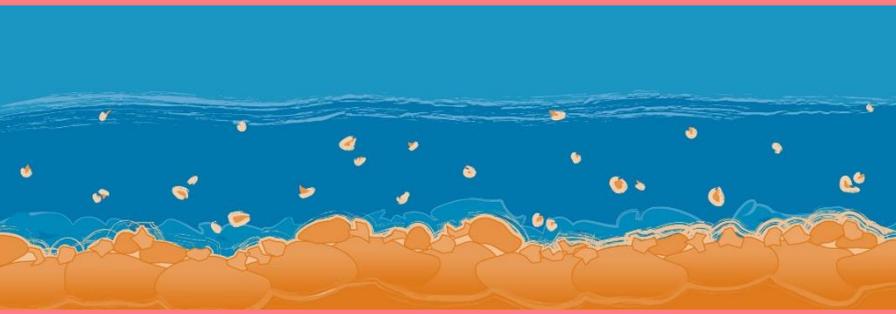


Annexe 26. Relation entre la concentration des teneurs en éléments métalliques et la fréquence annuelle de connexion à Donzère-Mondragon



Annexe 27. Boite à moustache montrant les teneurs en éléments métalliques aux différentes périodes de sédimentation pour le secteur de Donzère-Mondragon





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

Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône
66 bd Niels Bohr – CS 52132
69603 Villeurbanne Cedex