



**HAL**  
open science

## Etude morphosédimentaire des marges anciennes des secteurs de Péage-de-Roussillon et de Donzère. OSR4 | Action II.3

Jean-François Berger, Adrien Barra, Hugo Delile, Vincent Gaertner, Laurent Dezileau, Thierry Winiarski, Gwenaëlle Roux

### ► To cite this version:

Jean-François Berger, Adrien Barra, Hugo Delile, Vincent Gaertner, Laurent Dezileau, et al.. Etude morphosédimentaire des marges anciennes des secteurs de Péage-de-Roussillon et de Donzère. OSR4 | Action II.3. [Rapport de recherche] CNRS; ENTPE. 2017. hal-03749274

**HAL Id: hal-03749274**

**<https://hal.science/hal-03749274>**

Submitted on 10 Aug 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

Etude morphosédimentaire des  
marges anciennes des secteurs de  
Péage-de-Roussillon et de Donzère



**O**bservatoire  
**S**édiments  
**du R**hône

## Action II.3

*Version finale provisoire, décembre 2017*

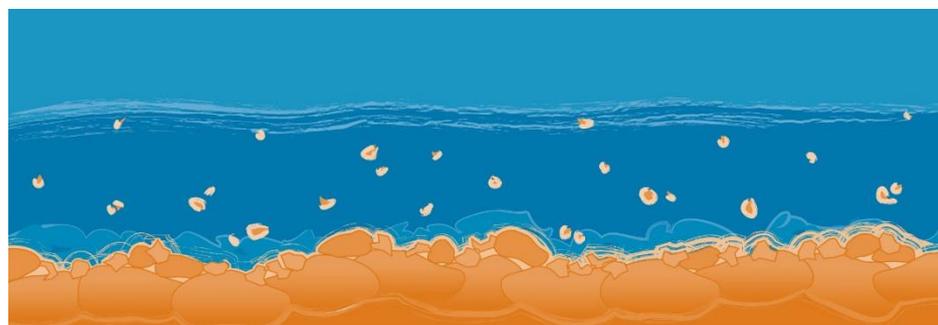


© Bianca Raepple

2015 - 2020



Donnons un avenir à notre fleuve





Personnes impliquées	Equipe de recherche
J.F. Berger, A. Barra, H. Delisle, V. Gaertner	CNRS UMR 5600
L. Dezileau	Université de Montpellier
T. Winiarski	ENTPE
G. Roux	Egeos

Etude morphosédimentaire des marges anciennes, réalisation de carottes dans les lônes du secteur de Péage-de-Roussillon et de Donzère : Rapport d'exécution, analyses sédimentologiques et géochimiques (granulométrie, datation, signatures géochimiques, biomarqueurs)

**Résumé**

**Mots-clés**



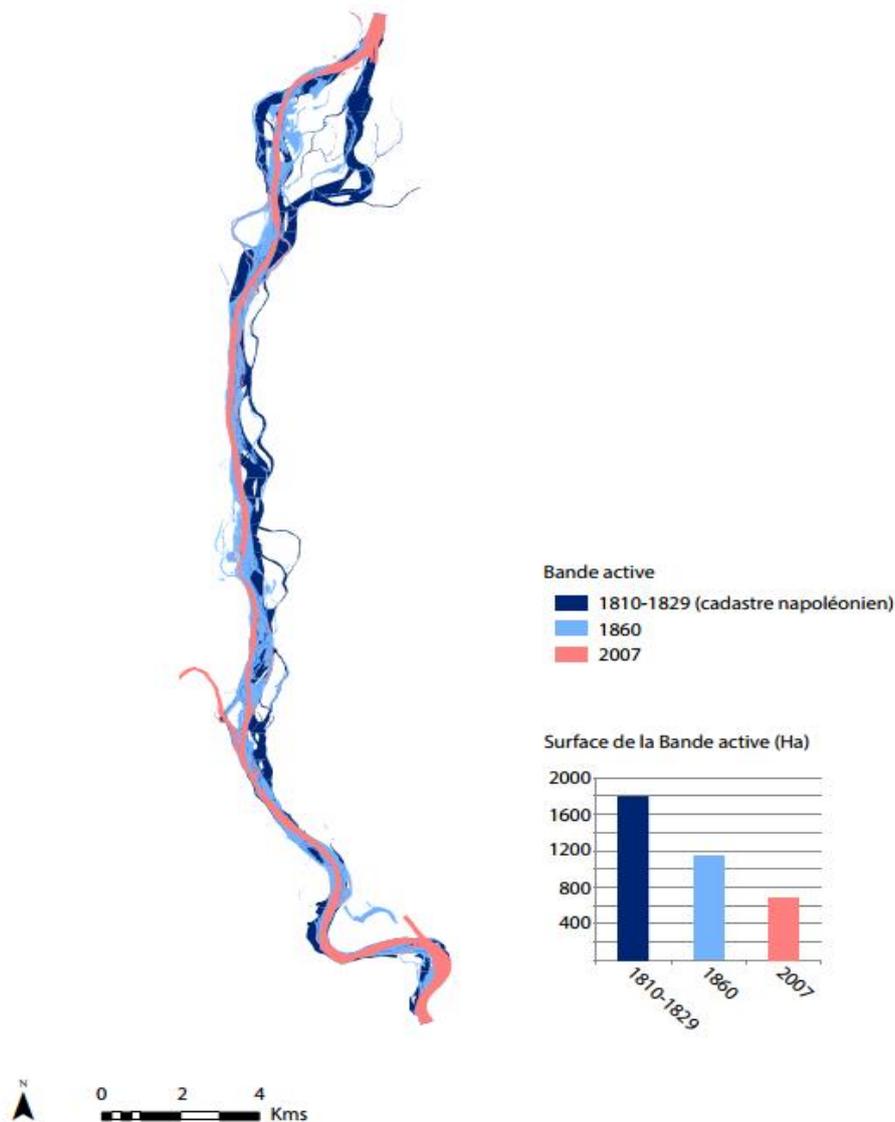
## Table des matières

Introduction.....	5
Campagnes de carottage et phases d'analyses en laboratoire pour caractériser la sédimentation du lit majeur dans les zones distales .....	6
Résultats et discussions.....	2
Evolution des conditions hydrosédimentaires et environnementales dans le bras-mort Ilon 5 .....	2
Historique des flux de contamination dans les marges alluviales de Péage-de-Roussillon.....	4
Evolution des conditions hydrosédimentaires et environnementales dans le bras-mort Ilon 3 .....	6
Evolution des conditions hydrosédimentaires et environnementales dans le bras-mort de DM1 .....	9
Historique des flux de contamination dans les marges alluviales du secteur de Donzère .....	12
Remarques de l'auteur : .....	13

## Introduction

La phase de digitalisation des cadastres napoléoniens est terminée sur deux des secteurs prioritaires : Péage-de-Roussillon (PDR) et Donzère-Mondragon (DZM). La partie du lit du Rhône du cadastre napoléonien qui n'avait pas pu être digitalisée lors du rapport intermédiaire de février 2016 (partie sud du RCC3-Tricastin compris dans le Vaucluse et le Gard) est aujourd'hui intégrée dans le SIG. Ce dernier résultat permet aujourd'hui de comparer le tracé du Rhône depuis 1810-1830 et de mettre en évidence la forte réduction de son lit. Ces nouvelles données permettent de disposer d'un état de référence avant les travaux d'endiguement de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle à la fin du PAG. La réduction de la bande active du Rhône entre 1810 et 1860 est ainsi confirmée autour de 44/45% à l'échelle du RCC3, entre Donzère et Mornas (**Figure 1**).

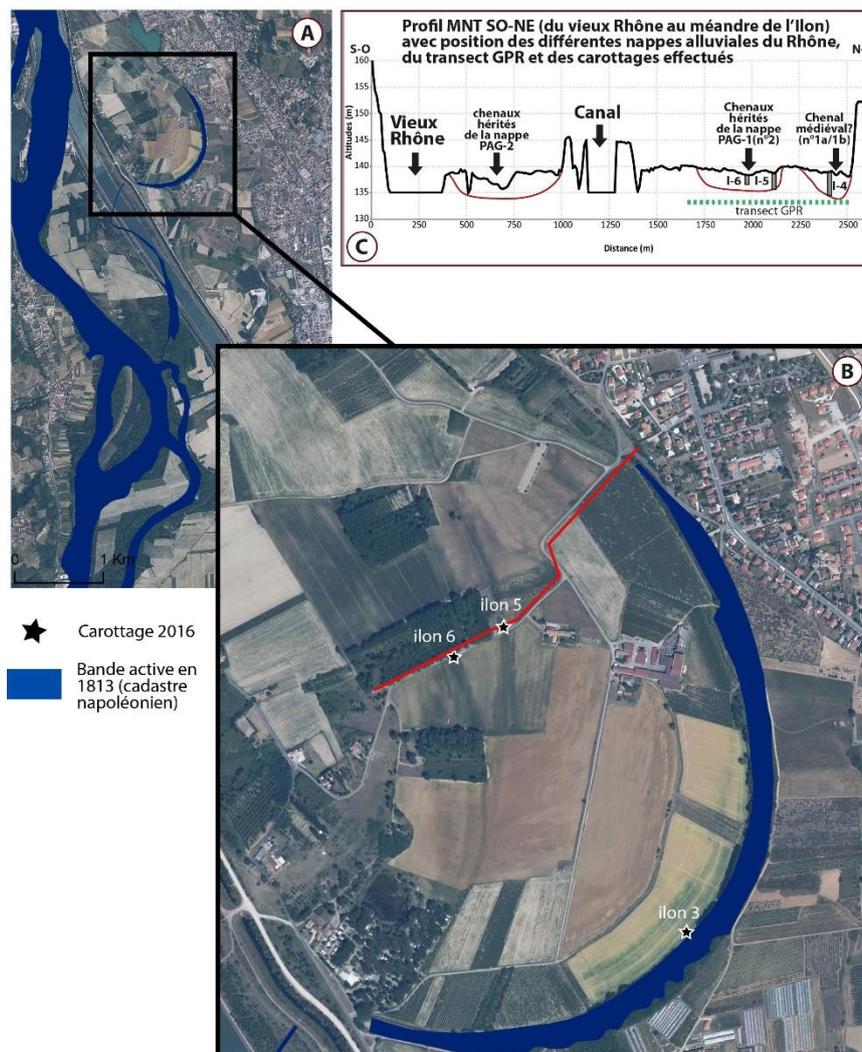
Evolution de la bande active secteur Donzère (DZR) 1810-1829, 1860 et 2007



**Figure 1.** Digitalisation du lit du Rhône à partir du cadastre Napoléonien dans le RCC3-plaine du Tricastin et comparaison avec les bandes actives de 1860 et 2007.

## Campagnes de carottage et phases d'analyses en laboratoire pour caractériser la sédimentation du lit majeur dans les zones distales

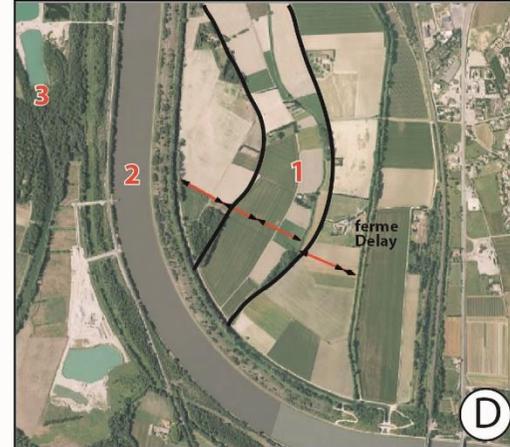
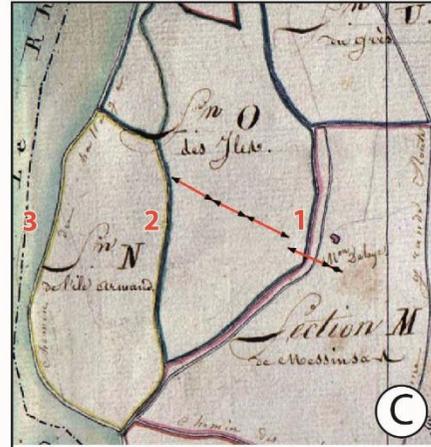
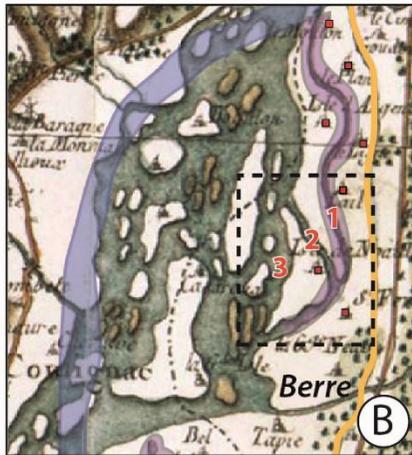
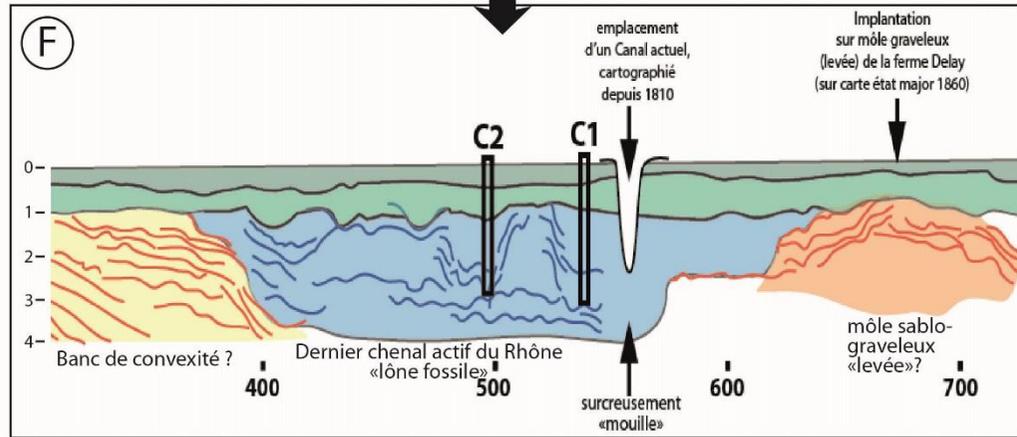
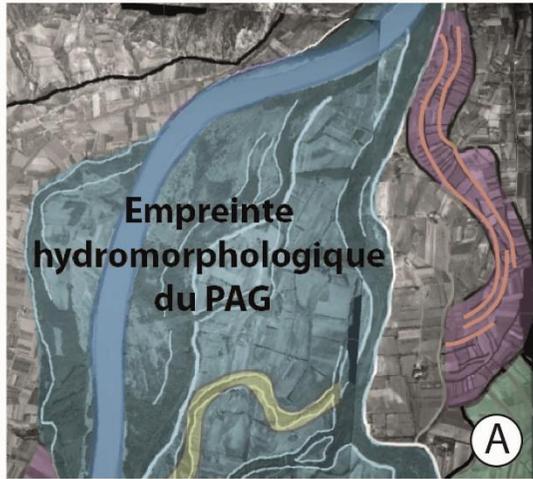
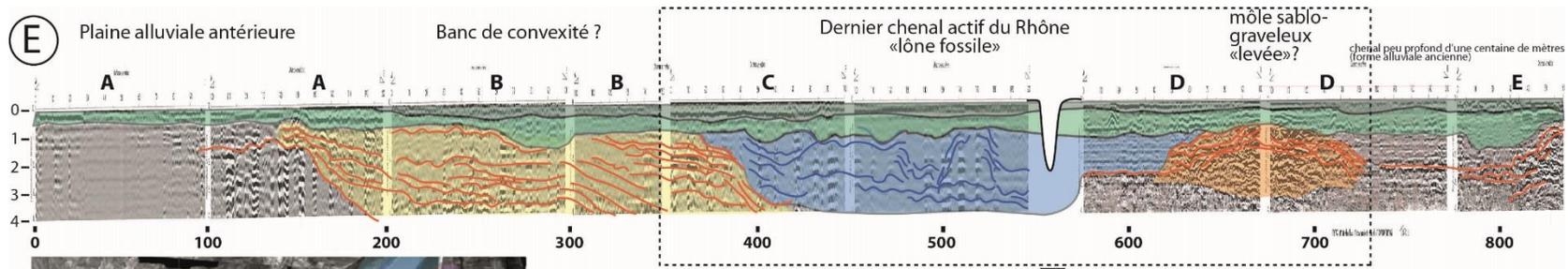
L'analyse des radargrammes (i.e. profils GPR) réalisée par le bureau d'étude Egeos et l'ENTPE a permis d'identifier de nombreuses structures alluviales préalablement identifiées par analyse régressive et de documenter leur épaisseur et leurs variations morpho-granulométriques à l'échelle de la forme fluviale. On retrouve ainsi des chenaux (larges et méandriques à tressés, de taille réduite et peu profonds), des zones de sédimentation monotone de plaine d'inondation et des bandes alluvionnaires décimétriques plus grossières, probablement associées aux phases de tressage du PAG et à un fort élargissement de la bande active. Les radargrammes permettent également de positionner les carottes à réaliser en fonction de leur environnement de dépôt et de leur potentiel à représenter une sédimentation récente et fine. Dans les marges de la plaine du Rhône, localisées à l'est des canaux de Péages (secteur du paléochenal d'Illon) (**Figure 2**) et de Donzère-Mondragon (secteur du Paléochenal du Massinsard-DZ1), deux campagnes de carottages ont été effectuées en juin et décembre 2016 à l'aide du carottier thermique « Cobra » de l'UMR 5600.



**Figure 2.** Exploration des marges alluviales à Péage-de-Roussillon. A/Fond orthophotographique IGN avec projection de la bande active du Rhône de 1813 (sources cadastre napoléonien), B/Zoom sur le paléochenal de l'Illon en rive gauche du canal du Rhône avec position du transect GPR (trait rouge) et des trois carottes réalisées en 2016.

Trois carottes géologiques ont alors été réalisées dans les marges de la plaine alluviale de PDR, en complément de carottages préexistants (Ilon 3, 5 et 6), et deux carottes dans les marges de la plaine alluviale de DZM (DZ-1 et 2) (**Figure 2**) sur la base d'indices paléohydrologiques et morphologiques du Rhône issues d'une analyse régressive des paysages alluviaux (cartes anciennes, photo-interprétation, transects GPR).

Ainsi, l'analyse menée dans la partie nord du RCC de DZM a permis de positionner au mieux les carottages géologiques dans les marges alluviales actives à la charnière XVIIIe-XIXe s. Le choix de la localisation a également reposé sur l'analyse combinée d'une photographie IGN de 1947 (série Aubenas-Bourg St-Andéol) antérieure à la construction du canal de Donzère-Mondragon, de la carte d'état-major de 1860, du cadastre napoléonien (1810) et de la carte de Cassini de Viviers (1772-1779) (**Figures 3A, 3B, 3C, 3D**). L'isolement d'un train de méandres, au lieu-dit les Massinsards (commune de Donzère) encore bien visible dans le parcellaire actuel, et sans doute un peu antérieur à la période correspondant à la carte de Cassini (dernier quart du XVIIIe s.), nous a guidé pour l'implantation d'un transect GPR en travers de cette paléoforme fluviale. Réalisé à l'automne 2016 sur plus de 800m, cette exploration par GPR a clairement permis d'identifier et localiser les différents corps sédimentaires du paléolith du Rhône (**Figures 3E, 3F**). Le profil des radargrammes obtenu montre une dissymétrie classique avec un surcreusement à l'est au niveau de la mouille et un relèvement du fond du chenal vers l'ouest du côté de la berge convexe. Les barres d'accrétion légèrement obliques à l'ouest soulignent le sens de la progradation du méandre et la construction du banc de convexité (en jaune). Le dernier chenal actif du Rhône dans le secteur présente une largeur de près de 200m (**Figure 3F**, en bleu). De petits chenaux secondaires d'une vingtaine de mètres sont soulignés dans l'épaisseur de son colmatage terminal par les structures sédimentaires du GPR. Cette étude nous a permis de réaliser deux nouveaux carottages de 3 m (DZ1-DZ2) en décembre 2016.



**Figure 3. A/** Photo-interprétation des formes fluviales d'un cliché IGN de 1947 de la partie nord du RCC 3 (plaine du Tricastin), illustrant la très forte empreinte hydrogéomorphologique de la seconde partie du Petit Age de glace (PAG 2) en bleu, et le train de méandres de Messinsard en rose (début XVIIIe s. ou antérieur – datation en cours), qui fait l'objet de la présente étude. **B/** Position de la partie nord du RCC 2 (entre la confluence de la Berre et Donzère) sur la carte de Cassini de Viviers (1772-1779). Le lit tressé du Rhône alors très élargi, montre deux principaux bras, encombrés de nombreuses îles. Le train de méandres du Messinsard est représenté en violet (1). Il est alors encore connecté au Rhône tressé fortement métamorphosé (en amont comme en aval) et bordé d'un nombre important de mas agricoles (carrés rouges), distribués sur ses levées ou ses berges concaves. Trois évolutions rapides du tracé du Rhône dans le secteur sont enregistrées au XVIIIe s. et sans doute un peu avant (chiffres en rouge). 1. Tracé méandriforme à sinueux, 2. Défluviation antérieure à 1772, isolant le train de méandres n°1, 3. Défluviation du Rhône entre 1772 et 1779, associée à la progradation d'une charge gravelo-caillouteuse du Rhône et à sa métamorphose vers un lit tressé (nouveau cours très élargi). Pour information, le lit actuel du vieux Rhône est ajouté en bleu à l'extrémité de la partie occidentale du cours fin XVIIIe s. Le zoom du secteur d'étude est matérialisé par un rectangle en pointillés noirs. **C/** Secteur de la lône fossile de Messinsard sur fond de cadastre napoléonien (1810) avec projection du transect GPR réalisé par l'ENTPE (segments rouges). Les lônes 1 et 2 sont encore connectées au Rhône, mais leur largeur est réduite (canaux ?). **D/** Le bras-mort de Messinsard sur fond ortho-photographique actuel avec projection du transect GPR réalisé par l'ENTPE (segments rouges). L'ancien chenal est matérialisé par un canal, son lit est occupé par des parcelles agricoles. Le paléochenal n°2 a été totalement détruit lors de la construction du canal de Donzère-Mondragon. Le chenal du XIXe s. apparaît sous forme d'étangs dans les zones de gravières sur la gauche. **E/** Proposition d'interprétation du transect GPR réalisé sur plus de 800m perpendiculairement au bras-mort de Messinsard par l'ENTPE (G. Roux, T.Winiarski) avec les principaux corps sédimentaires du lit fluvial fossile. **F/** Zoom sur la partie centrale du transect GPR illustrant le dernier chenal actif dans ce secteur, son banc de convexité et sa levée. Les deux carottes prélevées en décembre 2016 (C1, C2) sont positionnées dans la partie la plus creusée et constituée des sédiments les plus fins (limons, argiles et sables fins).

La profondeur des carottages oscille entre 1 et 3,5 m. Les carottes Ilon 3 et 5 ont été sélectionnées pour des analyses sédimentologiques et géochimiques systématiques à haute résolution réalisées en grande partie à la plateforme OMEAA de l'UMR 5600 EVS (**Tableau 1**). Elles ont concerné les deux mètres supérieurs du carottage Ilon 5 et le mètre supérieur du carottage Ilon 3.

A Donzère, sur les deux carottes réalisées à l'automne 2016, la carotte DZ-1 (3m) a été sélectionnée pour des analyses sédimentologiques et géochimiques systématiques (**Tableau 2**).

La carotte DZ-2, localisée dans le même bras-mort, n'a fait l'objet que d'une analyse XRF afin de comparer l'homogénéité géochimique de son remplissage sédimentaire supérieur à celui de la carotte DZ-1. Le passage au core scanner a été sous-traité au laboratoire Edytem (Chambéry). Les échantillons isolés pour des datations au Plomb 210, et au Césium 137 (10 sur Ilon 5 et 5 sur Ilon 3) ont été traités au laboratoire Géosciences de l'Université Montpellier 2 (L. Dezileau). Les résultats nous sont parvenus pour la carotte du paléo-méandre Ilon 3 (RCC Péage) et nous permettent d'isoler la partie de la séquence et cibler les pollutions métalliques à l'échelle d'un profile correspondant aux 150 dernières années. *Les résultats sont encore en attente pour le premier mètre de la carotte Ilon 5.*

Les analyses radionucléides sur la carotte du RCC-Donzère-Mondragon (10 mesures sur le mètre supérieur) permettent de compléter dans les 45 cm supérieurs de la carotte, la chronologie radiocarbone obtenue par datation de micro-charbons et de graines de carex dans le mètre inférieur. Les échantillons de charbons de bois et de graines terrestres envoyés en avril 2017 au laboratoire <sup>14</sup>C de Poznan pour dater la base des carottes et construire des modèles âge-profondeur sur les deux derniers siècles, nous sont parvenus durant l'été 2017. Ils ont apporté des résultats contrastés sur les deux principales carottes datées (cohérents sur DZ-1, incohérents et beaucoup trop vieillis sur Ilon 5 et 3) et ont donc fait l'objet de datations complémentaires durant l'automne. Après une observation approfondie à la binoculaire des charbons de bois récupérés après tamisage fin à 500 et 100 microns, parfois très concentrés dans les sédiments du méandre d'Ilon, nous pensons que des charbons de bois fossiles ont été intégrés dans les premiers échantillons des carottes Ilon 3 et 5 envoyés à Poznan (résultats situés à la limite inférieure des possibilités de la méthode radiocarbone (45/50000 ans) ou même au-delà !). Notre diagnostic se fonde sur l'aspect des micro-charbons, systématiquement vitrifiés, brillants à lustrés, à cassures fraîches de type conchoïdale et à leur association à des résidus ferreux natifs, de coloration argentée, à l'aspect souvent poreux ou bulleux. Ces vestiges correspondent à l'injection dans les alluvions du Rhône de probables grandes quantités de débris d'usines sidérurgiques, implantées en amont sur les berges même du Rhône ou de ses affluents de rive droite (Massif Central d'après la richesse en paillettes micacées des alluvions associées). La même association vient d'être identifiée sur les carottes localisées en rive droite du Rhône autour de Limony (cf. rapport « Détermination de la dynamique sédimentaire spatiale et temporelle de la plaine alluviale »). Cette injection massive de résidus charbonno-ferreux industriels probablement dès le XIXe s., devra faire l'objet d'études analytiques plus poussées (densité/volume, origine des matière premières, répartition dans les zones de stockage transitoire du corridor rhodanien aval).

La caractérisation granulométrique tous les 2 cm de chaque carotte permet de retracer l'historique des dépôts, et d'interpréter l'évolution des processus associés. Elle est complétée par des ratios géochimiques indicateurs de l'énergie des flux hydrosédimentaires (Zr/Al, Rb/Sr). Cette caractérisation apporte des éléments clés pour établir une chronologie relative des évènements environnementaux, de la variabilité interdécennale des crues, du lien entre dépôts de crue et paléopollution et pour discuter des variations des conditions du milieu dans les bras-morts.

**Tableau 1** : rappel de la liste des carottages réalisés dans les marges alluviales des RCC Péage de Roussillon (PDR), et des analyses réalisées sur les carottes de l'Ilon 3 et 5 en 2016.

Site	Type d'analyses	Nombre d'échantillons / Analyses
ILON 5	Core Scanner / Géochimie (maille 5mm)	379
ILON 5	Susceptibilité magnétique (maille 1cm)	192
ILON 5	Perte au feu (matière organique)	89
ILON 5	Perte au feu (CaCO3)	89
ILON 5	Tamisage	89
ILON 5	Granulométrie laser	89
ILON 5	Datations Pb 210, Cs 137	5
ILON 5	Tri biomarqueurs (charbons, mollusques, macrorestes végétaux, concrétions carbonatées)	89
ILON 3	Core Scanner	185
ILON 3	Susceptibilité magnétique	51
ILON 3	Perte au feu (matière organique)	35
ILON 3	Perte au feu (CaCO3)	35
ILON 3	Tamisage	35
ILON 3	Granulométrie laser	35
ILON 3	Datation Pb <sup>210</sup> , Cs <sup>137</sup>	10
ILON 3	Tri biomarqueurs (charbons, mollusques, macrorestes végétaux, concrétions carbonatées)	35
ILON 5	Carottage sédimentaire tubé	3 mètres
ILON 3	Carottage sédimentaire tubé	1 mètre
ILON 6	Carottage sédimentaire tubé	3,5 mètres

**Tableau 2** : rappel de la liste des carottages réalisés dans les marges alluviales du RCC DZM, et des analyses réalisées sur les carottes DZ-1 et DZ-2 entre fin 2016 et juin 2017.

Site	Type d'analyses	Nombre d'échantillons / Analyses
DZ1	Carottage sédimentaire tubé	3,00 mètres
DZ1	Core Scanner / Géochimie	399 (2 mètres)
DZ1	Susceptibilité magnétique	294
DZ1	Perte au feu (matière organique)	144
DZ1	Perte au feu (CaCO3)	144
DZ1	Tamisage	144
DZ1	Granulométrie laser	144
DZ1	Datation (en cours)	1 C <sup>14</sup> , 10 PB <sup>210</sup> et CS <sup>237</sup>
DZ1	Tri biomarqueurs (charbons, mollusques, macrorestes végétaux, concrétions carbonatées)	144
DZ2	Carottage sédimentaire tubé	3,00 mètres
DZ2	Core Scanner	200 (1 mètre)
DZ2	Susceptibilité magnétique	100

## Résultats et discussions

Des analyses chimiques fines (XRF) et magnétiques (Susceptibilité magnétique volumique) complémentaires et des datations au Cs137, Pb210 et C14 sur les carottes permettent de retracer l'historique des contaminants (métaux), l'évolution des sources sédimentaires, l'hydrodynamisme et l'évolution des conditions de milieu dans les bras-morts (redox, taux de matière organique). Les premières analyses montrent une influence anthropique significative dans les derniers décimètres des remplissages étudiés (de 0.40 à 0.75m), tous les éléments métalliques augmentant vers la surface à partir de 135 cm dans le bras-mort du RCC Donzère (Donzère Massinsard-1), de respectivement 75 et 130 cm dans ceux de Péage-de-Roussillon (Ilon 3 et 5). Les concentrations en polluants métalliques sont identifiées sous formes de pics plus ou moins rythmés, de différentes amplitudes, dont la chronologie fine et évènementielle reste encore à discuter compte tenu des délais nécessaires pour l'obtention d'une seconde série de dates Pb210 et Cs137 (résultats définitifs en septembre 2017 par le labo de Géosciences Montpellier) et d'un renvoi d'un ou deux échantillons radiocarbone à Poznan. La courbe s'infléchit vers des valeurs maximales quasi-constantes à partir de 40 cm, qui pourraient bien représenter les pollutions post-années 50.

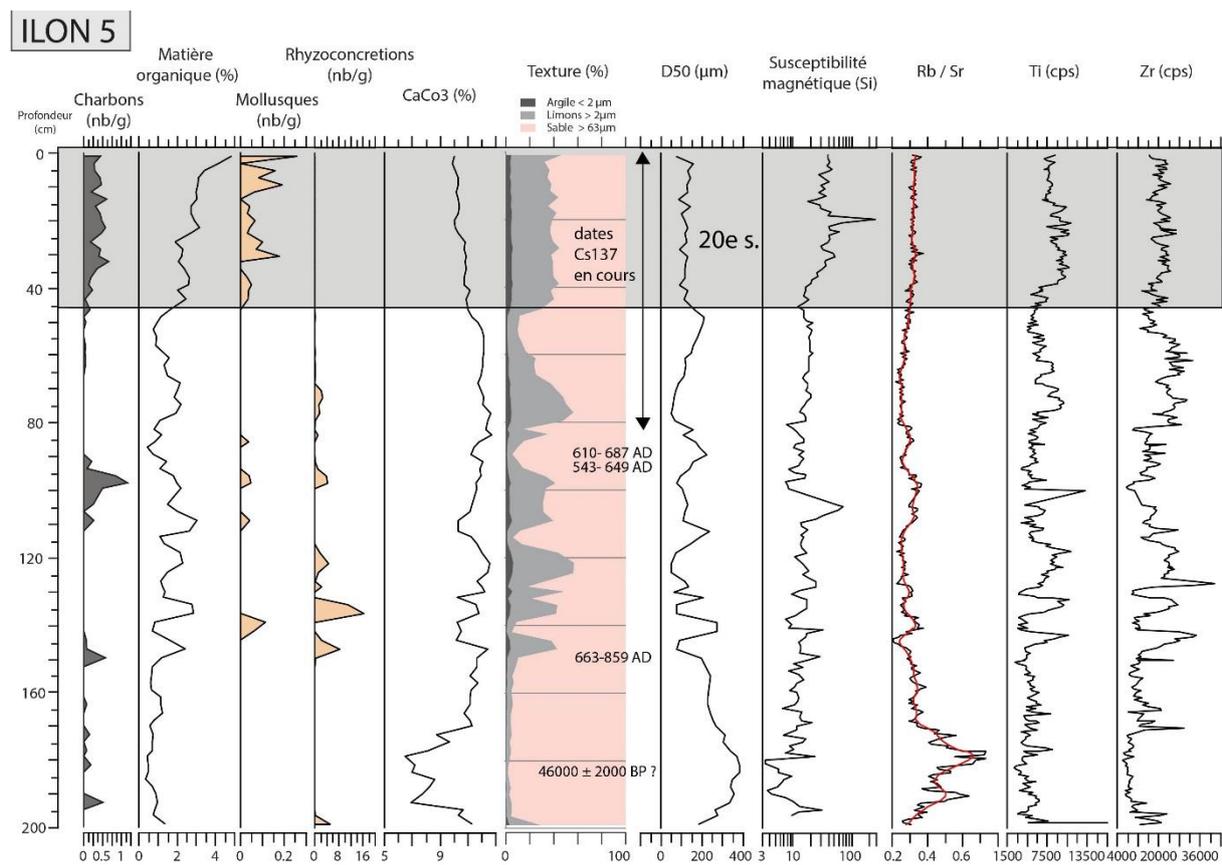
## Evolution des conditions hydrosédimentaires et environnementales dans le bras-mort Ilon 5

Le bras-mort Ilon 5, est localisé à l'est du canal de Péage-de-Roussillon, dans un axe de chenaux tressés encore prégnant dans la topographie actuelle, et à la limite entre une lande et un bois de chênes pubescents (cf. rapport OSR4-2016). Il a archivé plus de 3m d'archives hydrosédimentaires en marge de la plaine alluviale de la Platière, dont la chronologie est en cours de documentation. Les résultats des 5 analyses de radionucléides réparties sur le 1er mètre ne sont pas encore connus. La chronologie radiocarbone a été effectuée en deux fois, à la suite de premiers résultats surprenants et probablement très vieillis. Le second envoi d'échantillons 14C à l'automne 2017 a confirmé un probable âge médiéval de la série de chenaux tressés recoupant le large méandre d'Ilon, par un resserrement de 3 dates radiocarbone entre 550 et 850 AD. La date très ancienne identifiée à la base du second mètre de remplissage (46000 +/- 2000 BP) est donc une pollution par des charbons fossiles, dont la présence a été confirmée dans les résidus de tamisage. Elle a été réfutée.

Quatre principales périodes d'hydrologie abondante, associées à une fréquence de crues énergiques (PCE avec >80% de sable, D50>150 microns et ratio Rb/Sr >0,3 sauf pour PCE4), se placent entre 195 et 45 cm (**Figure 4**). Le taux de M.O. descend alors sous les 1%. Aucune chronologie ne peut être proposée pour le moment de cette périodisation des crues du Rhône dans le RCC Péage-de-Roussillon, à l'exception de la PCE 4, qui se situe entre les deux propositions de datation au Cs137 (1955 et 1986). L'épisode PCE1 illustre une phase inférieure très énergique (95% de sables, D50 entre 300 et 400 microns, ratio Rb/Sr entre 0,4 et 0,7) qui pourrait représenter une réactivation temporaire du bras-mort. La chute des valeurs en CaCO3 (sous les 6%) révèle dans le même temps un changement de source sédimentaire. Une première baisse de l'énergie des dépôts est observée vers 1.50m de profondeur (baisse des sables et augmentation des taux de limon jusqu'à 35-40%). Son rapport avec la mise en place des casiers Girardon reste à discuter. Une forte baisse de l'hydrodynamisme des crues est observée dans le bras-mort à partir de 46 cm, la contribution des sables fins oscille alors entre 65-55% (contre 90% au cours de la phase précédente) et le D50 entre 100 et 150 microns (contre 200 à 250 microns au cours de la phase précédente). Le taux d'argile augmente alors autour de 7/8%, et les limons autour de 30-35%, le taux de M.O. remonte entre 3 et 4,5%. La variation du ratio Rb/Sr est également très faible (0,3 à 0,35). L'ensemble des courbes indicatrices de l'énergie des crues ne montre

quasiment plus d'oscillations (aspect aplati), ce qui tendrait à démontrer alors un effet tampon de l'ouvrage hydraulique de la CNR à partir des années 70 environ. Cette évolution pourrait être liée à la mise en service du barrage du Péage de Roussillon en 1977, avec un rôle d'écrêtement des crues en partie distale de la plaine de la Platière, en berge gauche du Rhône et du canal. L'hypothèse est plausible sur la base de la chronologie Cs137 proposée (Episode Chernobyl ou 1963 à 40 cm).

A l'échelle de la carotte, de courtes phases de développement pédologique (Fluvisols) associées à une augmentation du taux de M.O. (de 2,5 à 3,5%) et de la formation de rhizoconcrétions carbonatées, corrélées à des pics de  $\text{CaCO}_3 > 10\%$  (DF1 à DF6) s'observent entre les phases de plus haute fréquence de crues énergiques (PCE) (**Figure 4**). Elles marquent des épisodes de plus forte stabilité du paléochenal et sont parfois associées à des pics de charbons qui signalent des feux locaux (agropastoraux ?). Ces récurrences de feux sont systématiquement associées à de fortes augmentations de la valeur magnétique volumique des sédiments (pics de 30 à 60 S.I., et pic majeur à 300 S.I. à 20cm) qui confirment la présence locale des feux. La dernière phase de développement pédologique est de type cumulique et comprend les 45 centimètres supérieurs de la séquence. Elle présente les plus hautes valeurs en M.O., mais paradoxalement pas de  $\text{CaCO}_3$  secondaires (rhizoconcrétions). La présence importante et continue de coquilles de mollusques documente une présence constante de biomasse végétale (prairie ou bois) en surface du chenal, sur le site sondé.

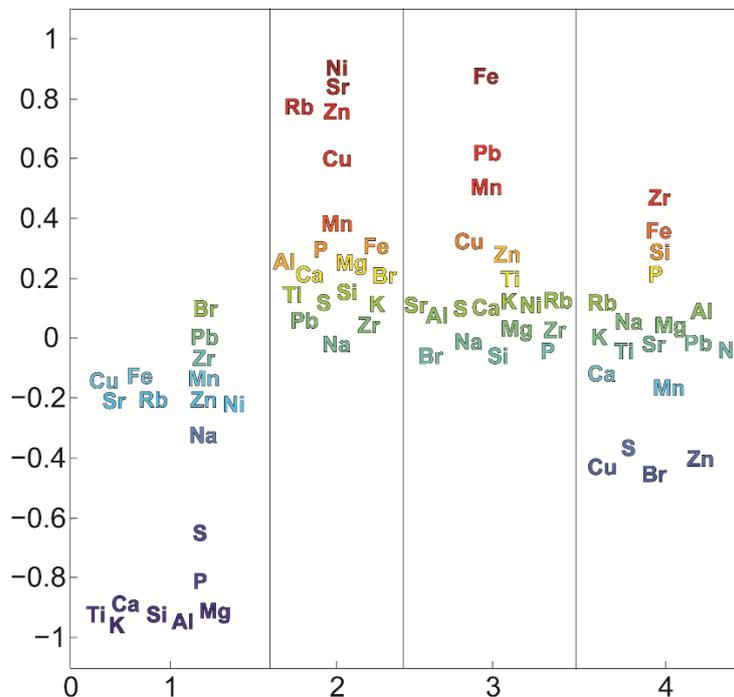


**Figure 4.** Diagramme multi-proxies du carottage Ilon 5, localisé dans la partie est du RCC de PDR, en rive droite du canal de la CNR dans une série de chenaux tressés anciens. Seul les 45 cm supérieurs (zone grisée) pourraient se rapporter au XXe s.

## Historique des flux de contamination dans les marges alluviales de Péage-de-Roussillon

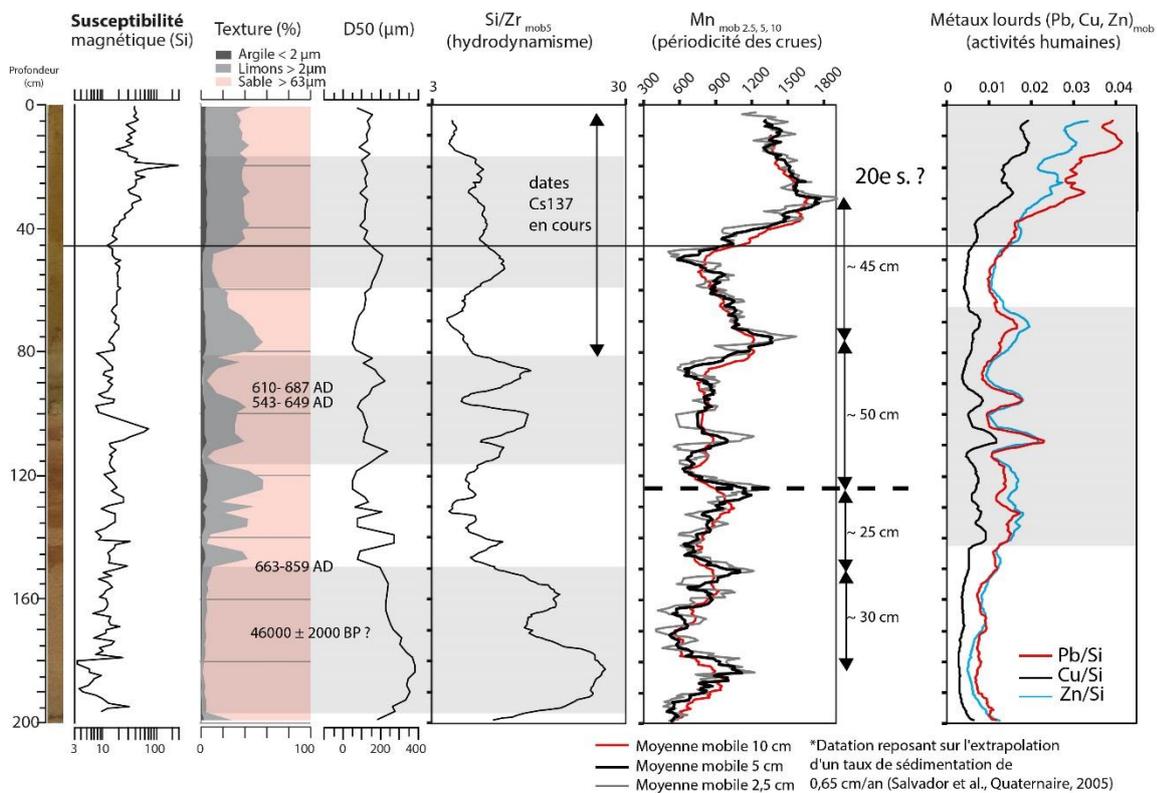
L'analyse des sédiments échantillonnés dans les bras-morts de Péage-de-Roussillon et de Donzère est riche d'enseignements (profondeur des contaminations métalliques, cycles et intensités des apports) et vient compléter les analyses spatiales réalisées en surface dans ces mêmes RCC par l'ENS (équipe d'H.Piégay). Les patrons chimiques se structurent en fonction des flux sédimentaires, que nous nous proposons de discuter. Quatre carottes ont été analysées au core scanner XRF du laboratoire EDYTEM, capable de fournir des profils géochimiques à une très haute résolution d'échantillonnage. Sur la base de cette technique géochimique, les concentrations d'une vingtaine d'éléments chimiques comprenant des éléments majeurs (par ex. Al, Ca, Fe, etc.), traces (Rb, Sr, Br, etc.), des métaux lourds (Pb, Zn, Cu, etc.) et certaines Terres Rares (Y) ont été mesurées tous les 5 mm sur une longueur totale de 2 mètres par carottage dans les bras-morts Ilon 5 et DZ-1 et d'un mètre sur Ilon 3 et DZ-2. Ce rapport d'analyse se concentre sur les deux plus longues carottes. Les résultats des deux autres carottes courtes (un mètre) et leur comparaison avec les séquences longues seront présentés dans le rapport final, dans le but de discuter des volumes alluviaux potentiellement contaminés au cours des deux derniers siècles dans les marges alluviales.

Une fois les données acquises, des Analyses Factorielles ont mis en évidence certaines variables environnementales capables de nous renseigner sur les modalités de colmatage des deux anciens bras du Rhône carottés (**Figure 5**). L'identification de rapports élémentaires (rapport entre deux éléments chimiques différents) spécifiques à ces variables permet ainsi de suivre leur évolution au cours du temps. L'hydrodynamisme (vélocité des courants) est tracé par les rapports Si/Zr (carotte ILON 5) et Zr/Al (carotte DM1) en complément des analyses granulométriques, la ventilation de la colonne d'eau par Mn/S (uniquement pour la carotte DM1) et la périodicité des crues par les concentrations de Mn.



**Figure 5.** Analyse en Composantes Principales des données géochimiques de la carotte Ilon 5. Le facteur 1 documente les flux détritiques/terrigènes. Les facteurs 2 et 3 les contaminations par les métaux lourds. Le facteur 4 plutôt les conditions du milieu (oxygénation, M.O.). Les valeurs significatives se situent entre -0,4 et -1 ou 0,4 et 1 (couleurs bleu-violet et orange-rouge).

Le dernier facteur de contrôle de la variabilité géochimique des sédiments fluviaux correspond aux métaux lourds qui témoignent, une fois normalisés au Si et au Zr (afin de se prémunir des entrées de métaux lourds d'origine détritique, variables selon les sites et leur alimentation en alluvions depuis l'amont), de l'évolution des pollutions anthropogéniques au cours du temps (**Figure 4 et Figure 6**). Les variations des facteurs environnementaux énumérés ci-dessus au sein des deux stratigraphies acquises ne permettent pas encore d'envisager des corrélations entre les deux carottages (**Figure 4 et Figure 6**). Elles doivent donc être appréhendées localement, à l'échelle du site, c'est à dire dans la perspective d'une compréhension du fonctionnement individuel des deux bras morts. Au regard de l'enregistrement des crues et des flux de métaux lourds, le carottage ILON 5 montre une histoire polycyclique dont la temporalité ne peut malheureusement pas encore être restituée avec assurance, dans l'attente des résultats en Cs137 du mètre supérieur. Les concentrations de Mn décrivent des longueurs d'onde dont l'amplitude témoigne de la cyclicité des plus grosses crues. On observe distinctement deux régimes différents : une première phase initiale située entre 2 et 1,25 m de profondeur, qui est marquée par des longueurs d'ondes étroites (25 à 30 cm) dont les extrêmes sont modérés (entre 1100 et 1200 cps), et une deuxième phase entre 1,25 m et le sommet de la carotte dont l'amplitude des cycles s'est significativement élargie (45 à 50 cm) et dont les maxima sont les plus importants (entre 1300 et 1700 cps). L'hypothèse d'un remplissage récent lié aux manifestations hydrosédimentaires de la deuxième moitié du Petit Âge Glaciaire (PAG, **Figure 2**) avait été formulée à partir d'une analyse de la géométrie des formes fluviales locales et des travaux réalisés en amont par J.P. Bravard (rapport CNR inédit) et d'une analyse d'un projet OHM toute proche sur le large méandre de l'Ilon (date radiocarbone à 600 +/- 40 BP vers 2,00m de profondeur) (Berger et al. 2016).

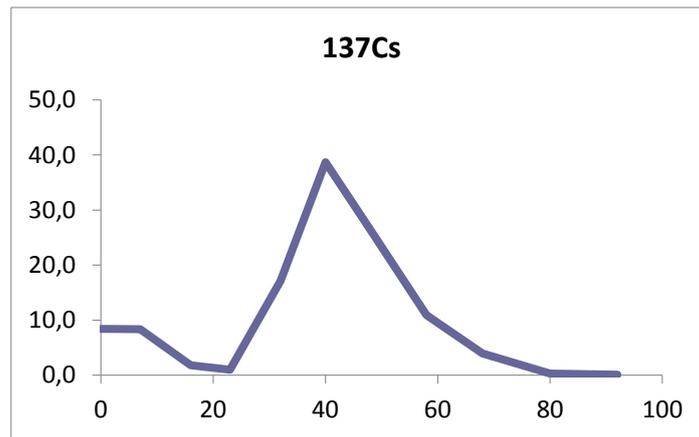


**Figure 6.** Principales variables environnementales (hydrodynamisme, oxygénation, périodicité des crues et activités humaines) déduites de l'étude géochimique de la carotte sédimentaire Ilon 5 (RCC1).

La chronologie obtenue par deux dates 14C vers 0,95m (543-687 AD) et une troisième date vers 170 cm (663-859 AD) pose problème, car apparemment vieillie (déstockage sédimentaire ?) ou alors il nous faut les accepter et intégrer dans notre raisonnement un long hiatus sédimentaire entre la fin du haut Moyen Age et la période 19-20<sup>e</sup> s. autour de 45cm. Seuls les résultats du Cs137 nous permettront de trancher. Concernant l'évolution des métaux lourds libérés dans l'environnement fluvial rhodanien du RCC1, nous observons une première phase de contamination modérée entre 1,4 et 0,65 m. Cette période de pollution pourrait retranscrire le développement des activités humaines pendant le Moyen Age (chronologie restant à affiner des 4 premiers pics moins prononcés de pollution à 132, 140, 108 et 95cm, **Figure 6**). Une courte phase marquée par une absence d'excès de métaux lourds entre 65 et 40 cm de profondeur devra elle aussi être discutée, dans une tendance longue à la croissance des signatures de contamination (baisse décennale de la contamination ou dilution des teneurs géochimiques lors d'un ou plusieurs épisodes de crues alluviales ?). Un pic important de l'ensemble du cortège des métaux lourds est identifié entre 80 et 70 cm et se place entre le Moyen Age et le XX<sup>e</sup> s. sans plus de précision. Dès 45 cm de profondeur, l'ensemble des éléments traces métalliques s'accroît de manière exponentielle jusqu'au sommet du carottage. Cette rupture correspond à une baisse synchrone et durable (jusqu'au sommet de la carotte) de l'énergie des alluvions, qui pourrait être associée aux effets des casiers Girardon ou du canal du RCC PDR. Les concentrations sont alors deux fois plus fortes que celles observées sur les pics principaux des périodes antérieures (moderne à contemporaine) et 4 à 6 fois supérieures aux valeurs moyennes des concentrations en métaux lourds préindustrielles (**Figure 6**). Ces résultats confirment le patron spatial observé à partir d'analyses XRF de surface (rapport OSR4-2016), c'est-à-dire que les marqueurs de pollution comme le plomb, le zinc, le cuivre ou encore le nickel sont associés aux structures moins dynamiques et plus anciennes (zones agricoles, plaine protégée au-delà des digues).

### Evolution des conditions hydrosédimentaires et environnementales dans le bras-mort Ilon 3

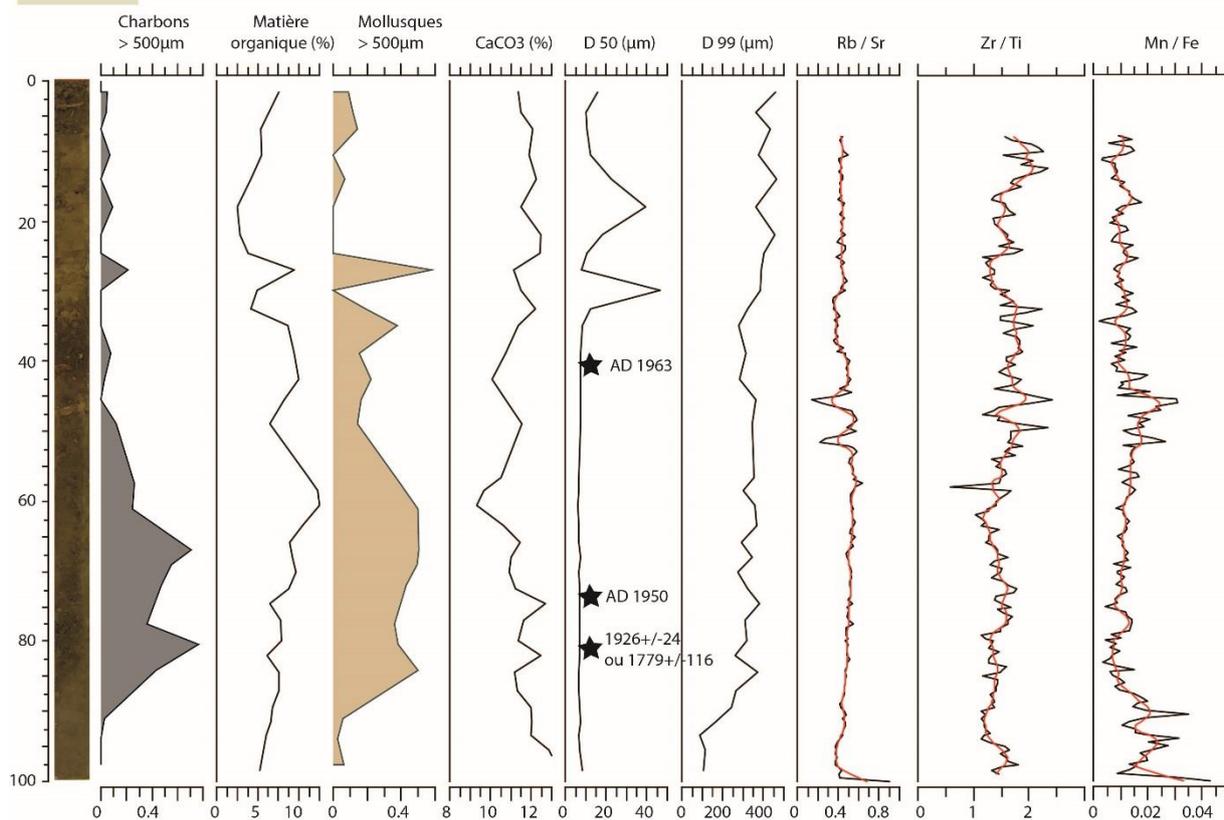
Les premiers résultats des analyses de radionucléides reposent sur l'analyse de 10 échantillons de sédiment (**Figure 7**). Ils montrent une première hausse de Césium 137 vers 75cm de profondeur et un maximum vers 40cm. La montée des teneurs en Cs137 peut être attribuée aux premiers essais de la bombe H (vers 1950), tandis que le pic majeur pourrait être associé soit aux essais nucléaires atmosphériques de 1963 (à américium), soit à l'accident de Chernobyl en 1986 (L. Dezileau com. pers.). Parmi les deux dates radiocarbone obtenues au *Poznan Radiocarbon laboratory*, celle localisée à 74-77cm apparaît beaucoup trop ancienne (>51000 BP) et sa chronologie ne peut donc être acceptée en l'état. La contamination par de fortes injections de charbons fossiles, discutée en amont, explique le vieillissement. Une seconde date sur graine de *Carex* (pour éviter la contamination du carbone fossile) a donné un âge nettement plus cohérent avec le contexte chronostratigraphique et la série de dates obtenue au Cs137 (150 +/- 30 BP). Parmi les deux pics de probabilité proposés par le logiciel de calibration radiocarbone (Calib 7), nous proposons de favoriser le plus récent : 1902-1950 AD, soit 1926+/-24.



**Figure 7.** Courbe de variation du Césium 137 sur la carotte Ilon 3 entre 0 et 90 cm avec un maximum à 40cm, pouvant être associé aux années 1963 ou 1986 (d'après Dezileau en cours).

La carotte d'un mètre d'Ilon 3 semble avoir archivé l'ensemble du XXe s., qui apparaît donc dilaté. La parcelle sondée est enherbée entre des parcelles dédiées à l'arboriculture et le canal actif qui suit le méandre d'Ilon. Elle présente un véritable profil pédologique jeune à horizon organo-minéral grumeleux, sans horizon structural, sur les 10 premiers centimètres. Ce chenal dont le recoupement est sans doute médiéval a subi de longues phases d'ennoisement jusqu'au périodes récentes (seconde moitié du XXe s.) d'après les témoignages oraux des agriculteurs-exploitants. Il semble également avoir été réactivé lors du pléni-PAG et le fort élargissement du lit du Rhône tressé (Bravard 2005), comme nous l'illustre les informations hydrographiques du cadastre napoléonien (1820). Ce remplissage de bras-mort permet ainsi de documenter avec précision l'évolution hydrodynamique du Rhône et de caractériser les MES et le signal géochimique tout au long du XXe s. (**Figure 8**). Un doute subsiste sur la fiabilité des résultats granulométriques, avec un profil assez anormal de la courbe du D99 à partir de 90cm et jusqu'en surface (entre 350 et 450µm). Cette tendance est en contradiction totale avec l'ensemble des résultats obtenus sur ce RCC et celui de Donzère pour le XXe s. et sa croissance se calque sur la courbe des charbons dont une grande partie semble associée à des contaminations par des rejets industriels. Ces charbons très résistants et dont la taille oscille entre 200 et 6/800µm ne semblent pas pouvoir être détruits par les traitements chimiques utilisés par le protocole d'analyse granulométrique. Ils pourraient ainsi venir fortement perturber les résultats pour les fractions grossières des courbes granulométriques. Les résultats sur l'hydrodynamisme des crues sont donc à relativiser, notamment au niveau de l'indicateur d'énergie maximale (D99). Le ratio Zt/Ti apparaît donc plus fiable pour estimer la variation de l'hydrodynamisme dans le bras-mort. Mn/Fe permet de discuter des variations de l'hydromorphie et les variations du taux de matière organique (MO) associée à l'observation visuelle de la carotte, documente la stabilité du méandre et les flux détritiques. Deux phases plus humides sont identifiées : entre 85 et 100 cm, soit à la fin du XXe ou au début du XXIe s. et entre 50 et 40 cm, correspondant à la fin des années 50. 4 phases de répit hydrosédimentaire, associées à une concentration en MO et à des traces de bioturbation et de concentrations en coquilles de mollusques sont identifiées vers 85-80, 65-60, 45-35 cm et en subsurface (10-0 cm).

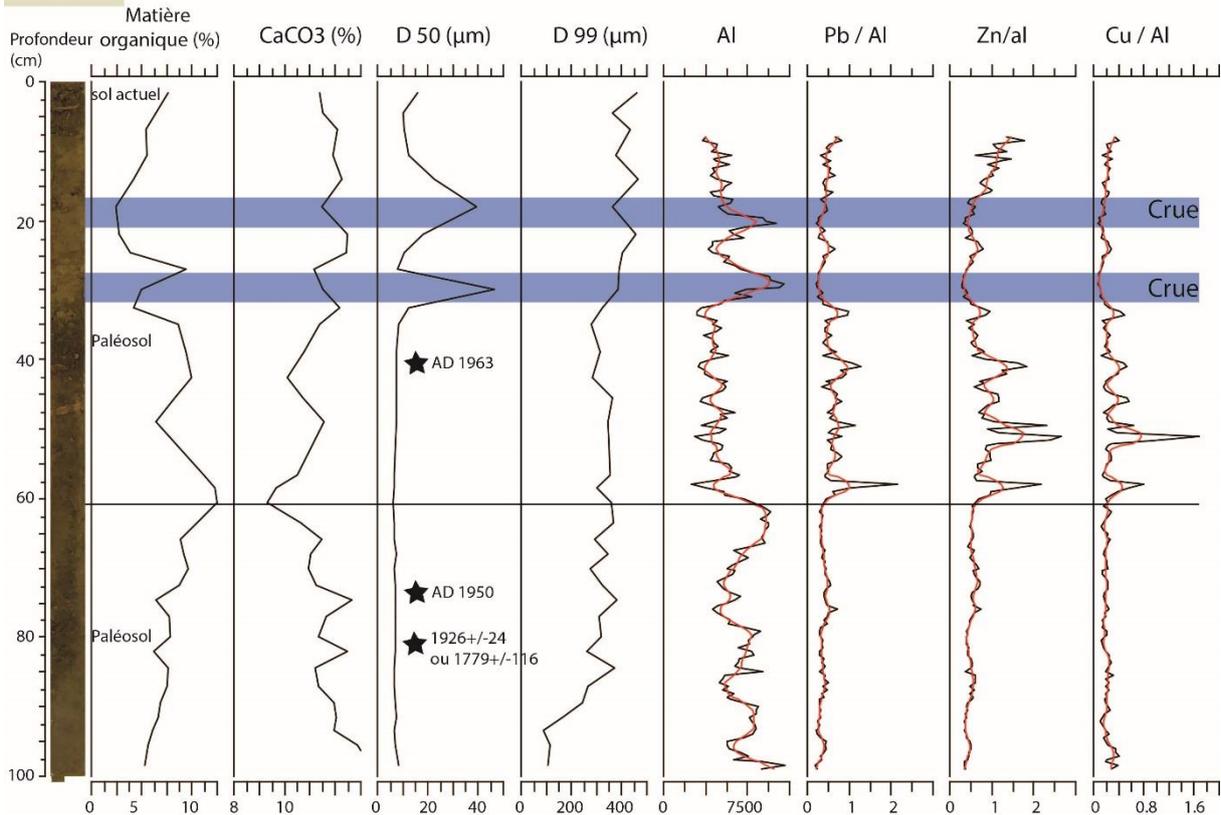
## ILON 3



**Figure 8.** Diagramme multi-proxies et phasage sédimentaire du carottage Ilon-3.

Deux épisodes détritiques, associés à des dépôts fins de crue (D50) ou des ruissellements depuis les parcelles environnantes, sont observés vers 30 et 15cm (soit dans les années 70-90). Ils ne sont que partiellement restitués par le ratio Zr/Ti, mais interrompent les périodes d'accumulation de MO. Les indicateurs de pollution métallique (Pb/Al, Zn/Al et Cu/Al) se concentrent dans la partie supérieure de la carotte, avec un seuil très marqué autour de 60cm, correspondant à la fin des années 50 (**Figure 9**). Leurs valeurs sont alors multipliées par 4 ou 5. 7 pics sont identifiés entre 55 et 25 cm et augmentent de façon constante entre 18cm et la surface. Ils sont plus ou moins bien enregistrés par les 3 marqueurs (de façon moins nette au niveau du Pb). Les deux dépôts de crue signalés par de forts pics du D50 et de Al, des creux de MO, correspondent à des creux des éléments métalliques. Le vecteur de pollution ne semble donc pas être localement le système fluvial.

## ILON 3

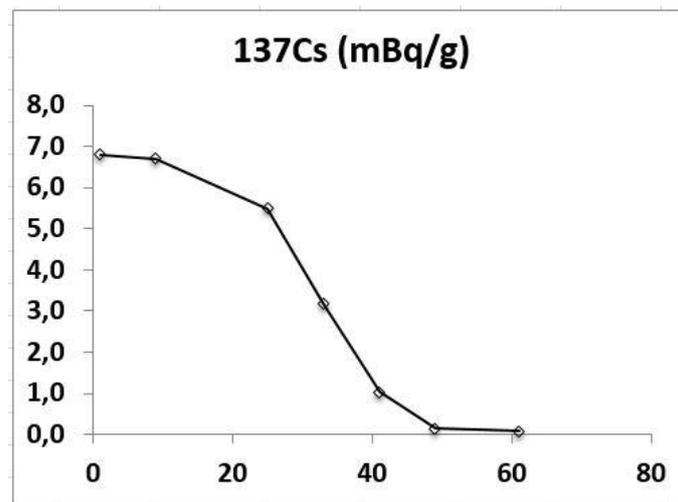


**Figure 9.** Principales variables sédimentologiques, pédologiques et géochimiques de la carotte sédimentaire Ilon3 avec mise en évidence des pollutions métalliques.

## Evolution des conditions hydrosédimentaires et environnementales dans le bras-mort de DM1

Le bras-mort de DZ-1, localisé juste à l'est du canal de Donzère-Mondragon, a archivé 250 à 300 années d'histoire hydrosédimentaire de la plaine alluviale du Tricastin. La parcelle sondée est une prairie avec un véritable profil pédologique jeune à horizon organo-minéral grumeleux, sans horizon structural. Sur la carte de Cassini de Viviers (1772-1779), ce chenal apparaît déjà recoupé, mais encore plus ou moins associé à des écoulements diffus, révélant sa connectivité partielle (**Figure 3B**). Sa charge de fond grossière (graviers fins) a été atteinte vers 298 cm. Trois dates radiocarbone ont été réalisées sur des charbons et macro-restes (graines) localisés entre 198 et 280 cm et confirme l'âge du paléo-méandre et la durée de l'archive sédimentaire étudiée (un peu plus de 2 siècles). La date la plus profonde ( $175 \pm 30$  BP à 280 cm) apparaît légèrement rajeunie par rapport aux deux autres, très cohérentes entre elles et avec le contexte historique attribué par la carte de Cassini. Elle n'a pas été retenue. La date radiocarbone sur graine de *Carex sp.* échantillonnée vers 237cm a donné un âge de  $195 \pm 30$  BP, plus d'un demi-mètre au-dessus du niveau de son recoupement. Elle est complétée par une date très proche à  $190 \pm 30$  BP à 198 cm. Compte tenu des intervalles de probabilité proposés par le logiciel Calib 7, et de l'impossibilité pour certains d'être statistiquement représentatifs (trop vieux ou trop jeune selon le contexte chronostratigraphique) nous avons retenu une estimation de l'âge à un sigma et à 52% de probabilité, soit de  $1782 \pm 20$  ans à 237cm et à 46% de probabilité de  $1783 \pm 20$  ans à 198 cm.

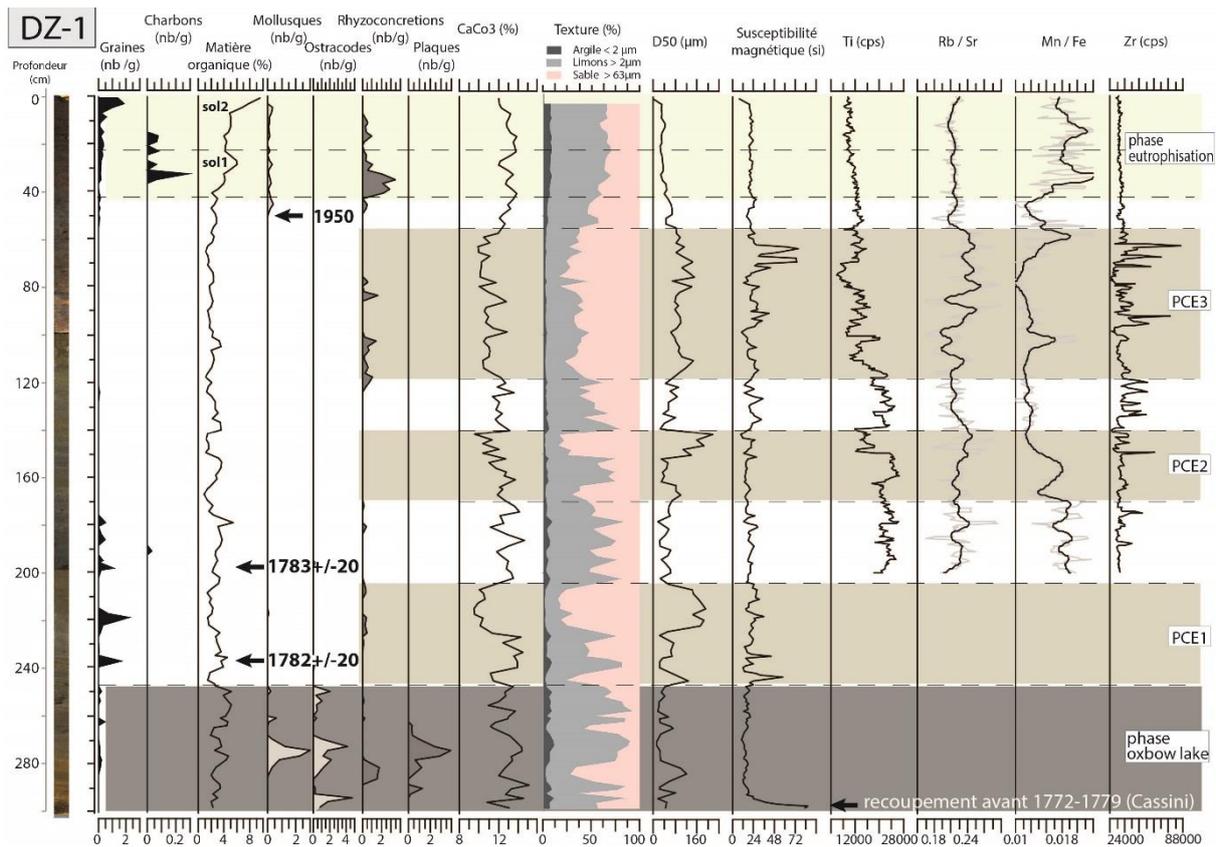
Sept dates au Cs137 et au Pb210 ont été réalisées dans les 62 centimètres supérieurs pour contraindre le modèle âge-profondeur dans le mètre supérieur de la séquence (**Figure 10**). Le signal du Pb ne s'est pas révélé concluant comme dans la plupart des dates effectuées sur des alluvions dans l'OSR4 (dilution du signal ?). Les valeurs du signal Cs137 augmentent significativement autour de 45cm de profondeur et marquent le début des années 50, mais le profil restitué n'est pas classique ; le double pic de 1963 et 1986 est lissé, sans doute en raison de processus de bioturbation dans les 20/25cm supérieurs.



**Figure 10.** Courbe de variation du Césium 137 sur la carotte DZ-1 entre 0 et 62 cm avec un maximum à 40cm, pouvant être associé aux années 1963 ou 1986 (d'après L.Dezileau en cours).

Ce remplissage de bras-mort permet ainsi de documenter avec précision l'évolution hydrodynamique du Rhône et de caractériser les MES et le signal géochimique depuis les premières traces de l'essor industriel à la fin du XVIIIe s. en passant par le début de l'aménagement contemporain du lit du Rhône (dans la seconde moitié XIXe s. jusqu'au casiers Girardon au début du XXe s.) et la création du canal de Donzère-Mondragon (**Figure 11**). Il nous apporte donc un référentiel préindustriel et pré-aménagement hydraulique utile.

La partie inférieure du colmatage alluvial correspond entre 298 et 248cm à une véritable phase d'*oxbow lake*, associée à une mise en eau quasi-permanente du bras-mort, d'après les courbes de biomarqueurs associés (ostracodes, graines, et plaques calcaires). Des crues à dominante sableuses, bien visibles à l'oeil nu, s'intègrent dans ce fonctionnement initial et interrompent ou diluent la croissance des biomarqueurs aquatiques. Trois principales périodes d'hydrologie abondante, associées à une fréquence de crues énergiques (PCE avec >55% de sable, D50>80 microns et ratio Rb/Sr >0,22), se placent entre 248 et 56 cm (**Figure 7**). Elles se situent d'après la chronologie radiocarbone entre la fin du XVIIIe et le XXe s. La première (PCE1 : 248-205cm), est datée directement par la chronologie radiocarbone autour de 1782/1783 +/-20 à 237cm et correspond à une phase pluri décennale de la fin du XVIIIe s., la seconde (PCE2 : 170-140cm) se situe autour de 1850 (avec une crue extrême pouvant être associée à la crue millénaire de 1856 vers 142-148cm) et la troisième (PCE3 : 118-56cm) se place entre la dernière décennie du XIXe s. et une dizaine de centimètre en-dessous de 1950 (période d'hydrologie abondante signalée par Pardé et Champion).



**Figure 11.** Diagramme multi-proxies et phasage sédimentaire du carottage DZ-1, localisé dans la partie nord-ouest du RCC de DZM.

Une étroite corrélation est observée entre l'augmentation de l'énergie des crues du Rhône (taux de sables et D50) et la baisse du taux de carbonate de calcium (de 15 à 10%), tandis que les phases à crues moins énergiques (prédominance des limons) correspondent à de hautes valeurs en CaCO<sub>3</sub> et de Ti. Les crues déposent alors des MES. sableuses dominées par des minéraux plus siliceux ou plus décarbonatés (crues du Vivarais, érosion de sols fersiallitiques avec valeurs magnétiques élevées -- toujours supérieures à 20 S.I. ?). Les taux de M.O. se réduisent lors de ces mêmes crues et augmentent, en même temps que la présence de graines lors d'épisodes de crues moins énergiques et moins fréquentes, favorables à la recolonisation végétale du bras-mort (**Figure 11**). Les phases PCE 1 et PCE 2 révèlent des épisodes de crues à très hautes valeurs magnétiques (pics autour de 50 à 70 S.I.) qui confirment l'arrivée de dépôts à minéraux cristallophyliens ou de dépôts issus de l'érosion de sols fersiallitiques.

Une forte baisse de l'hydrodynamisme des crues est observée dans le bras-mort à partir de 40cm, la contribution des sables fins oscille alors entre 25-30% (contre 60 à 80% au cours de la phase précédente) et le D50 entre 30 et 40 microns (contre 80 à 120 microns au cours de la phase précédente). Le taux d'argile augmente alors autour de 10%, et les limons prédominent autour de 60%. Les valeurs de la S.M. ne dépassent plus alors les 20 S.I. L'ensemble des courbes indicatrices de l'énergie des crues ne montre quasiment plus d'oscillations (aspect aplati), ce qui tendrait à démontrer alors un effet tampon des ouvrages hydrauliques de la CNR. Cette évolution pourrait être liée à la construction du canal de Donzère-Mondragon (1947-1955), qui aurait eu alors un rôle d'écrêtage des crues en partie distale de la plaine du Tricastin, en berge gauche du Rhône et du canal, à moins que la construction des casiers Girardon joue un rôle plus précocement sur la sédimentation en plaine.

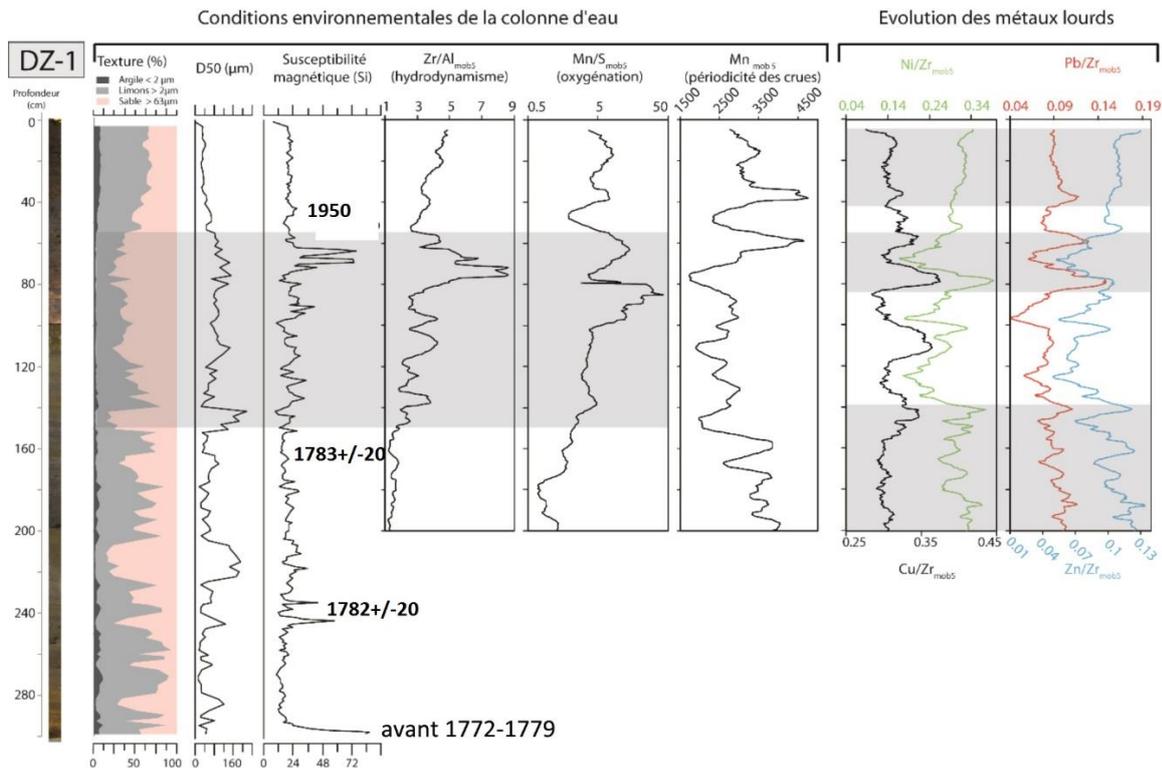
Ce changement d'hydrodynamisme s'accompagne d'un changement du redox dans cette partie distale de la plaine du Rhône, qui s'oxygène plus ou moins fortement (pics du ratio Mn/Fe). Ce changement d'état s'accompagne aussi d'une forte eutrophisation du bras-mort (enrichissement en matière organique probablement authigène, dont les taux passent de 2 à 5/8%). La colonisation végétale du chenal est marquée par une présence constante de graines et de gastéropodes à partir de 48-45cm. Quatre pics de charbons documentent l'élimination d'une biomasse végétale par des nettoyages / défrichage par le feu au cours des 6/7 dernières décennies (pastoralisme, mise en culture). Au cours de cette même période, l'accrétion alluviale bien que réduite et de faible énergie, se poursuit et génère une succession de petits fluviosols cumuliques sur 40cm (sol 1 et sol 2) associés à une redistribution verticale de carbonates de calcium secondaires (horizons de rhizoconcrétions) et à la formation d'un horizon AO organo-minéral (marqué par deux pics successifs de M.O.) (**Figure 11**).

## Historique des flux de contamination dans les marges alluviales du secteur de Donzère

Le même protocole géochimique a été utilisé pour normaliser les teneurs en métaux lourds et analyser le rapport entre flux alluviaux et de contaminants, mais par rapport à la séquence de PDR, la normalisation a été effectuée avec Zr (et non pas Si). Cu et Pb montrent des oscillations très corrélées sur les deux mètres supérieurs du remplissage (**Figure 12**). Les concentrations de Mn décrivent des longueurs d'onde dont l'amplitude témoigne de la cyclicité des plus grosses crues identifiées par l'analyse granulométrique fine et des apports alluviaux en métaux lourds lors des principaux pics de pollution.

Au niveau temporel, le pic maximal d'hydrodynamisme identifié vers 70-80cm (sans doute amplifié par les valeurs de Zr), conforté par l'indice Mn et granulométrique (pic de sable et du D50), correspond vraisemblablement aux années 20 et montre un pic majeur de Ni, Cu, Pb et Zn. Une autre augmentation de l'énergie concomitante de celle des métaux lourds se place dans la dernière décennie du XIXe s., tandis que le premier pic de pollution majeur en métaux lourds dans la plaine du Tricastin (vers 140 cm) pourrait se placer vers le milieu du XIXe s.

Un seuil apparaît à partir de 40cm de profondeur (fin des années 50 ?). Il montre des valeurs maximales constantes des métaux lourds, et une légère hausse de Zn et de Ni dans les 6/8 cm supérieurs (non suivi par le Pb qui stagne et Cu qui diminue même dans les derniers centimètres), en relation avec le développement d'un horizon organo-minéral (pic de M.O. autour de 8-9%) qui a probablement cumulé des retombées atmosphériques (**Figure 11 et Figure 12**). L'horizon pédologique de surface ne semble donc pas avoir archivé de concentrations de Pb liées aux retombées atmosphériques, comme cela a été observé sur la carotte Ilon 5 du RCC Péage-de-Roussillon (mise à part pour Zn). Les assez fortes oscillations des teneurs en métaux lourds dans les derniers centimètres de cet horizon supérieur (de plus de 100%) montrent qu'il n'y a pas eu homogénéisation du signal par l'agriculture ou les bioturbations, et que les contaminations semblent arriver sous forme de flux irréguliers (crues et ruissellements locaux de surface lors de fortes pluies ?).



**Figure 12.** Principales variables environnementales (hydrodynamisme, oxygénation, périodicité des crues et activités humaines) déduites de l'étude géochimique de la carotte sédimentaire DZ 1.

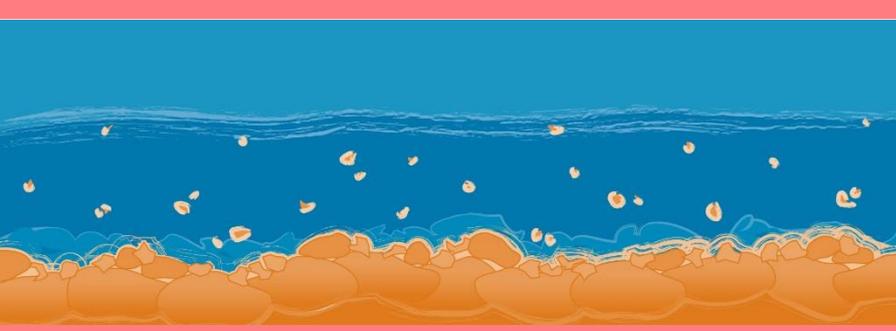
## Remarques de l'auteur :

Travaux programmés dans les prochains mois (fin OSR4 et liaison avec OSR5) :

Il est prévu (1) un complément d'analyses XRF sur la partie inférieure des deux remplissages (entre 2 à 3m) pour obtenir un véritable référentiel préindustriel, et (2) une confrontation aux données acquises sur les bras-morts plus proximaux du lit actuel (partie coordonnée par T. Winiarski - ENTPE) avec homogénéisation des modèles âge-profondeur.

La confrontation aux données paléohydrologiques des deux derniers siècles (histoire des crues enregistrées dans les deux RCC étudiés à partir des archives départementales) reste aussi encore à réaliser, afin de vérifier la robustesse des archives étudiées en termes de relation crues référencées-concentration en contaminants.





# 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/](http://www.graie.org/osr/)

Contact : [dad.roux@graie.org](mailto:dad.roux@graie.org)