



HAL
open science

Carottages et géophysique des annexes fluviales de Donzère et Baix-le-Logis-Neuf

Gabrielle Seignemartin, Thierry Winiarski, Brice Mourier, Daniel Donze,
Hervé Piégay

► **To cite this version:**

Gabrielle Seignemartin, Thierry Winiarski, Brice Mourier, Daniel Donze, Hervé Piégay. Carottages et géophysique des annexes fluviales de Donzère et Baix-le-Logis-Neuf. [Rapport de recherche] ENTPE; CNRS. 2022. hal-03750743

HAL Id: hal-03750743

<https://hal.science/hal-03750743>

Submitted on 12 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.



Observatoire
des **S**édiments
du **R**hône

OSR5 2018-2020

Carottages et géophysique des annexes fluviales de Donzère et Baix-le-Logis-Neuf Axe A1.a et Axe C5.4

Mars 2022



Donzère



Baix-Le-Logis-Neuf

Plan
Rhône



Informations sur le rapport « Carottages et géophysique des annexes fluviales de DZM et BLN - Axe A1.a et Axe C5.4 »

Personnes impliquées	Equipe de recherche
Gabrielle Seignemartin (Post-doc) <i>Rédactrice du rapport</i>	ENTPE, IAPHY, CNRS UMR 5023 LEHNA
Thierry Winiarski (DR)	ENTPE, IAPHY, CNRS UMR 5023 LEHNA
Brice Mourier (CR)	ENTPE, IAPHY, CNRS UMR 5023 LEHNA
Daniel Donze (TS)	ENTPE, IAPHY, CNRS UMR 5023 LEHNA
Hervé Piégay (DR)	EVS, CNRS UMR 5600

Résumé

Ce présent rapport constitue le livrable de l'Axe A1.a concernant les carottages des annexes fluviales de DZM et BLN et les travaux de géophysique aquatique effectués sur le RCC de DZM dans le cadre de l'Axe C5.4. Ce travail compile les résultats d'analyses granulométriques, MO, radionucléides, POPs de 2 carottes sédimentaires (DZM-C01 et DZM-C04) au niveau des annexes fluviales du RCC de DZM et parachève ainsi l'objectif « OSR 5 » de 6 carottes dans des contextes de déposition et/ou RCC différents. Les résultats révèlent des signaux concordants entre hypothèse de sédimentation et indicateurs géochimiques : la diminution de la granulométrie pouvant être interprétée comme consécutive à la mise en dérivation en 1952 ; pic des PCBs pouvant correspondre aux années 70/80, etc. En outre, l'application exploratoire du *Ground Penetrating Radar* (GPR) en milieu aquatique s'est révélée concluante, corroborée par la carotte aquatique DZM-C01 qui témoigne de séquences sédimentaires pertinentes en rapport aux réflecteurs observés sur le radargramme. A BLN, les analyses des radargrammes (GPR) et de la granulométrie des carottes constituaient la partie exploratoire visant à caractériser les états initiaux et l'impact des aménagements sur les dynamiques sédimentaires. Elles ont permis de mieux caractériser les dépôts sédimentaires et l'impact des aménagements en déterminant trois unités sédimentaires : unités « pré-Girardon », « pré-dérivation » et « post-dérivation ». A noter que la carotte BLN-C02 étant dans un casier Girardon ayant connu une sédimentation « pré » et « post » -dérivation, on y observe un décrochage « granulométrique » (BLN C02) « contraire » à ce que l'on constate en plaine alluviale (cas de BLN-C03 et Vauclin *et al.*, 2020) avec des sédiments qui seraient plus grossiers en post-dérivation (partie haute de la carotte) et plus fins avant celle-ci (partie basse de la carotte). Ceci pourrait s'expliquer par un fonctionnement par « débordement » spécifique aux casiers Girardon : les flux entrants ne peuvent avoir lieu que pour des débits assez forts pour transporter des sédiments par-dessus la digue, jouant ainsi sur la capacité de transport et laissant entrer des sédiments légèrement plus grossiers (sableux). A noter que cette piste interprétative mériterait un approfondissement par le biais d'analyses complémentaires afin de vérifier les chronologies et de déterminer s'il n'y a pas eu de remobilisation sédimentaire.

Mots-clés

Donzère-Mondragon, Baix-le-Logis-Neuf, GPR, annexe fluviale, carottes sédimentaire, granulométrie, POPs, PCBs, radionucléides, correction, Casier Girardon, dérivation

TABLE DES MATIERES

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	6
2. PRESENTATION DES SECTEURS : DONZERE ET BAIX-LE-LOGIS-NEUF	8
2.1. Secteur de Baix-Le-Logis-Neuf (PK 133-145)	8
2.2. Secteur de Donzère (PK 170.5-201)	9
3. MATERIELS & METHODES	11
3.1. Carottages sédimentaires	11
3.1.1. Technique de prélèvement	11
3.1.2. Stratégie d'échantillonnage et localisation des carottes sédimentaires	12
3.2. Analyses effectuées sur les carottes sédimentaires	13
3.2.1. Techniques d'analyses	13
3.2.2. Types d'analyses réalisées selon les carottes sédimentaires	15
3.3. Transects au radar géologique (plaine et endiguements Girardon)	15
3.3.1. Principe de la méthode	15
3.3.2. Localisation des transects GPR	17
4. RESULTATS	19
4.1. Études des dépôts sédimentaires à Donzère	19
4.1.1. Contexte planimétrique et topographique des environnements de dépôt	19
4.1.2. Images GPR des environnements de dépôt des carottes sédimentaires	23
4.1.2. Description et granulométrie des carottes sédimentaires	26
4.1.3. Caractéristiques géochimiques des carottes de sédiments	28
4.1.4. Bilans et interprétations sur les patrons verticaux des caractéristiques géochimiques	30
4.2. Études des dépôts sédimentaires à Baix-le-Logis-Neuf	32
4.2.1. Contexte planimétrique et topographique de carottes sédimentaires	32
4.2.2. Images GPR des environnements de dépôt des carottes sédimentaires	33
4.2.3. Description et granulométrie des carottes sédimentaires	36
4.2.4. Bilans et interprétations sur les dépôts sédimentaires à BLN	38
5. CONCLUSIONS	39
6. ANNEXES	40
7. RÉFÉRENCES	44

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Ce présent rapport constitue le livrable de l'Axe A1.a concernant les carottages et géophysique des annexes fluviales de DZM et BLN et les travaux de géophysique aquatique effectués sur le RCC de DZM dans le cadre de l'Axe C5.4. Il vient en complément à celui de l'OSR5 (avril 2020) Axe A1.a et Axe C5.4 « Carottages et géophysique des annexes fluviales de PDR et PBN ».

Du fait de la crise sanitaire et des conditions hydrologiques particulières de début d'année 2021, certains des objectifs « OSR5 » dus pour le printemps 2021 avaient vu leur échéance être repoussée. Les résultats sont donc présentés au sein de ce rapport. Il s'agit de présenter :

- L'analyse poussée (granulométrie, MO, radionucléides, TOCs) de 2 carottes sédimentaires au niveau des annexes fluviales du RCC de DZM parachevant l'objectif « OSR 5 » de 6 carottes (3 à PDR, 1 à PBN, cf. rapport de l'OSR5 avril 2020 Axe A1.a et Axe C5.4)
- L'interprétation des acquisitions géophysiques en milieu aquatique à DZM
- L'analyse exploratoire de deux carottes sédimentaires et d'images GPR dans le cadre de la campagne prévue à BLN pour caractériser les états initiaux et l'impact des aménagements.

Alors que le RCC de DZM est déjà bien renseigné sur les compartiments alluviaux terrestres, l'enjeu de la campagne en milieu aquatique et semi-aquatique est de caractériser les structures sédimentaires dans un autre contexte de dépôt. L'échantillonnage sur le secteur de BLN a quant à lui été pensé afin de dresser un panorama diachronique des contextes de déposition sédimentaires ayant enregistré l'impact des différentes phases d'aménagement. Les trois carottes analysées couvrent ainsi les périodes pré-aménagements, post-Girardon/pré-dérivation (première moitié du 20^{ème} siècle) et post-Girardon/post-dérivation (seconde moitié du 20^{ème} siècle).

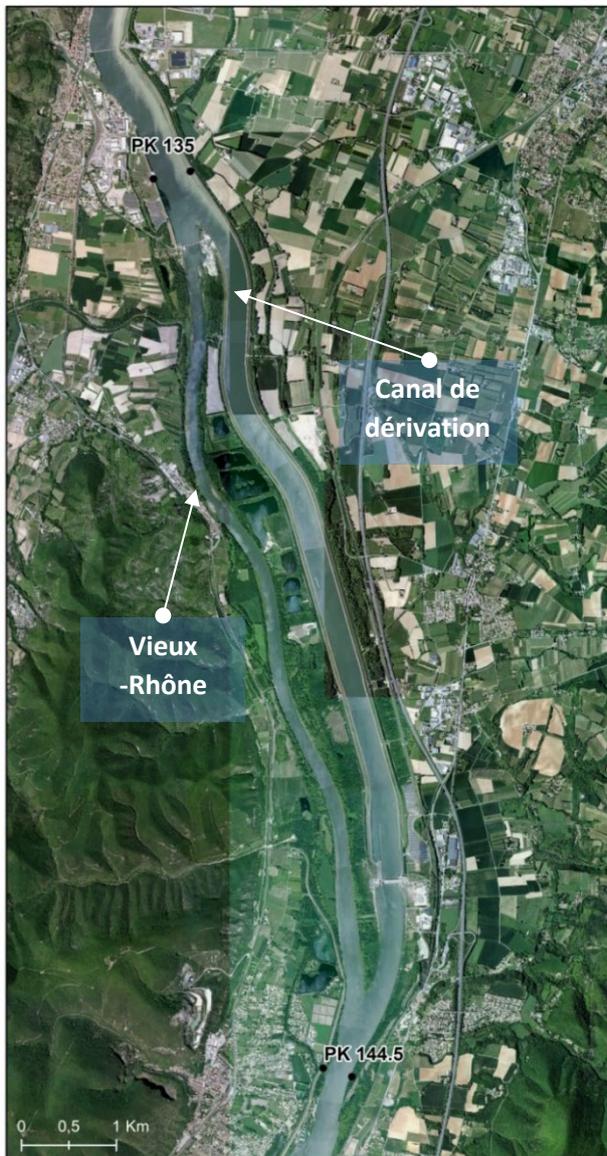
Les précédents programmes ont permis d'obtenir des chronologies planimétriques au niveau des environnements de dépôts ; données géohistoriques obtenues lors des programmes de recherche précédents (OSR4, RhonEco, OHM) et de leurs post-traitements effectués dans le cadre de l'OSR5 (Axe 1 et 2.1, rapports mars 2021 et octobre 2019). De ce fait, les carottes sédimentaires prélevées sur les sites de DZM et BLN sont bien contextualisées. Ce travail complémentaire a pour objectif de caractériser la colonne sédimentaire sur le plan granulométrique mais aussi en ce qui concerne les archives de DZM, les contaminants (radionucléides, POPs dont PCBi) en regard de leur contexte de dépôts (aquatique ou semi-aquatique/terrestre). L'inclusion d'analyses sur des contaminants d'intérêt émergent (retardateurs de flammes bromés, RFBs) vient en outre enrichir les jeux de données sur des problématiques d'actualités.

De ce fait, ce travail s'inscrit aussi dans une réflexion sur les enjeux liés au stockage/déstockage des sédiments fins des marges aménagées dans le cadre des travaux de restauration, en proposant de mieux appréhender le couplage entre l'histoire contemporaine des dépôts sédimentaires et la chronologie des flux de contaminants du Rhône.

Remarque : ce rapport rend compte des résultats obtenus en 2020 et 2021. L'ensemble des acquisitions géophysiques, des prélèvements des carottes et des analyses réalisables sur nos plateformes ont été effectués. Certaines analyses en prestations externes (radionucléides notamment) sont encore en cours, rendant parfois difficile des interprétations plus poussées.

2. PRESENTATION DES SECTEURS : DONZERE ET BAIX-LE-LOGIS-NEUF

Les secteurs d'étude sont situés sur le Rhône Moyen : entre les PK 133 et 145 pour Baix-Le-Logis-Neuf (Figure 1) et les PK 170,5 et 201,5 pour Donzère (Figure 2). Ces sites ont la particularité d'être marqués par des aménagements correctifs mis en place à la fin du 19ème siècle (structures Girardon) et sont court-circuités depuis le milieu du 20ème siècle ; ils sont donc constitués d'un tronçon appelé Vieux-Rhône (le cours naturel du Rhône) et d'un canal de dérivation destiné à la production hydroélectrique et la navigation. Ces deux sites ont de ce fait une histoire hydrogéomorphologique marquée par ces phases et ont connu de profonds changements morphologiques, écologiques et paysagers. Afin de dresser un contexte global pouvant jouer sur l'interprétation des dynamiques sédimentaires, l'histoire hydrogéomorphologique et des usages est ci-dessous succinctement rappelée pour chacun des sites. Pour plus de détails, se rapporter aux rapports dédiés (Rapports : OSR 4, A2, N°2 Intersecteurs, 2018 OSR 5 Axe A, 2019 ; OSR 5 Axe A1 et A2, 2021).



BAIX-LE-LOGIS-NEUF

Figure 1: vue aérienne du secteur de Baix-le-Logis-Neuf (PK 135 à PK 144.5). Source : IGN (2017)

2.1. Secteur de Baix-Le-Logis-Neuf (PK 133-145)

En 1860, la bande active à BLN présentait une largeur maximale de 1923 mètres au PK 137 et une largeur moyenne de 1309 mètres (Gaydou, 2013a). A cette même période, plusieurs digues submersibles et insubmersibles, ainsi que des digues basses en aval, isolaient déjà d'anciens bras de tressage. La forêt alluviale était essentiellement établie à proximité de ces bras. Ailleurs, la plaine était utilisée à des fins agricoles. L'urbanisation était peu développée, seul le village de Baix se situait à l'intérieur de la Bande Active Historique (BAH). Cette période est associée à un atterrissement de 125 ha (période pré-Girardon : 1809-1860), soit 0,24 ha/km linéaire/an, soit une réduction de 12% de la BA en base 1810 (OSR 5 Axe A1 et A2, 2021).

Entre 1860 et 1880, des aménagements Girardon ont été implantés le long des deux rives. Ils sont présents sur un linéaire d'environ 10 km, soit l'intégralité du tronçon étudié. Ils ont alors favorisé la réduction de la largeur du chenal principal, le piégeage de sédiments fins dans les marges alluviales, leur assèchement (la superficie des îles a diminué de 20%) et leur boisement (augmentation de la surface de la forêt alluviale de 80%) (Gaydou, 2013a). On observe un atterrissement de 64 ha pour la période « phase d'endiguement » (1860-1910), soit 0,128 ha/km linéaire/an, soit une réduction de 14,7% de la BA en base 1860. La

période pré-dérivation (1910-1954) enregistre quant à elle un atterrissement de 121 ha, soit 0,275 ha /km linéaire/an, soit une réduction de 27,9 % de la BA en base 1860 (OSR 5 Axe A1 et A2, 2021).

Progressivement, l'urbanisation se développe dans la plaine, essentiellement en rive droite (2% de la BAH ; Gaydou, 2013a). Concernant les usages, les aires d'activité concernent essentiellement les villes du Pouzin et de Cruas. D'anciennes gravières témoignent des activités d'extraction passées (e.g. anciennes gravières au niveau de l'île de Saulce-sur-Rhône).

Les aménagements hydroélectriques de la CNR ont été construits en 1960. Ils dérivent la majeure partie du débit dans le canal hydroélectrique pour ne laisser qu'un régime réservé dans le vieux Rhône (10 à 20 m³/s augmenté à 75m³/s pour un débit moyen total de 1480m³/s à Viviers). Consécutivement, on observe un atterrissement de 34 ha (période post-dérivation : 1954-2017), soit 0,055 ha/km linéaire/an, soit une réduction de 7,8% de la BA en base 1860 (OSR 5 Axe A1 et A2, 2021).

Concernant les enjeux écologiques, ce tronçon abrite actuellement plusieurs espaces protégés : les zones « Le Rhône à Baix et Saulce-Sur-Rhône » et « Confluent de la Drôme et du Rhône, île de Printegarde et Petit-Rhône » sont classées en ZNIEFF de type 1, ainsi que l'ensemble du secteur en tant que ZNIEFF de type 2 pour son « ensemble fonctionnel formé par le moyen-Rhône et ses annexes fluviales ». Le secteur accueille des sites Natura 2000 : la Zone Spéciale de Conservation « Milieux alluviaux du Rhône aval » (Directive habitats) qui parcourt tout le vieux Rhône (comprenant l'embouchure avec la Drôme) ainsi que la Zone de Protection Spéciale pour les oiseaux correspondant à la réserve de Chasse et de Faune Sauvage de « Printegarde » située au niveau de la retenue de Baix-Logis-Neuf.

2.2. Secteur de Donzère (PK 170.5-201)

Au niveau de Donzère (DONZ), la bande active historique se déployait sur 7000 ha ; elle présentait une largeur allant de 765 m (PK 180) à 4156 m (PK 200) avec une moyenne de 2242 m. Déjà aménagé avant 1860 pour la navigation et pour la protection contre les crues, c'est un secteur très contraint avec 98 km de digues insubmersibles représentant 271% de la longueur du tronçon et presque 50 km de digues submersibles, soit 137% de la longueur du tronçon. En 1860, le chenal actif s'est déjà fortement rétracté : la bande active de tressage présente alors une superficie de 1760 ha avec une largeur moyenne de 449 m (Gaydou, 2013). Le secteur de Donzère est marqué par une plaine assez large, propice aux usages agricoles. Ainsi, divers aménagements (digués, pompage et structure d'irrigation) viennent depuis des siècles modifier la plaine afin d'en faciliter l'exploitation (Bethemont, 1972). La phase de correction (aménagement Girardon, fin 19ème siècle) entraîne une réduction de la surface du chenal de 23,7%. En termes de largeur, cela correspond à une réduction moyenne de 80 m à DZM. L'atterrissement observé est estimé 251 ha pour 30 km de linéaire à DZM lors de la première phase d'aménagement, soit 0,1 ha/km linéaire/an (ces valeurs tiennent compte des pertes surfaciques des lônes).

Court-circuité en 1952, le Rhône à DONZ enregistre des modifications suite à cette seconde phase d'aménagement : on observe une réduction supplémentaire de la bande active de l'ordre de 33% (base 1860). En termes de largeur du chenal, il s'agit d'une réduction moyenne de 84 m. L'atterrissement observé est estimé à 264 ha sur les 30 km de linéaire, soit 0,15 ha/km linéaire/an (OSR 4, A2, N°2 Intersecteurs, 2018)

Le Rhône, présente un débit moyen total de 1480 m³/s à Viviers (1920-2012) ; valeur de référence pour les deux sites d'étude (Source : CNR). Dans le Vieux-Rhône, les régimes réservés sont de prime abord de l'ordre de 60 m³/s puis augmentés à 75 m³/s en 2014.



DONZERE

Figure 2: vue aérienne du secteur de Donzère (PK 170.5 à 201.5)

Source : IGN (2009)

Concernant les autres usages, on note le complexe industriel du Tricastin dont la centrale nucléaire est en service depuis le début des années 1980. Elle est située au milieu du secteur, en rive droite du canal d'amenée. D'anciennes grandes gravières témoignent des activités d'extraction de granulats (e.g. anciennes gravières au niveau de l'île sur Mondragon).

Du côté des enjeux écologiques, le secteur accueille plusieurs ZNIEFF de type 1 : Le « Vieux Rhône et îlots du Rhône de Viviers à Pont-Saint Esprit », les « Ripisylves du Rhône en aval de Pont-St-Esprit », le « vieux Rhône de l'île Vieille et des casiers de Lamiat » ainsi que le « Canal de Donzère-Mondragon et aéroport de Pierrelatte ». Le secteur accueille une grande zone Natura 2000 « Milieux alluviaux du Rhône aval » (Directive habitats) qui parcourt tout le vieux Rhône et la partie aval du canal d'amenée et le « Marais de l'île Vieille et alentour » (Directive Oiseaux). En tant qu'« ensemble fonctionnel formé par le moyen-Rhône et ses annexes fluviales », le secteur fait aussi partie d'une ZNIEFF de type 2.

3. MATERIELS & METHODES

Ci-dessous, nous rappelons et détaillons les méthodes clés de cette restitution. Pour les résultats découlant des SIG, nous nous référons aux protocoles et aux données présentés dans le rapport OSR5 Axe 1 et 2.1 (mars 2021) pour le secteur de BLN et OSR 4 Rapport N°2 - A2 -Partie intersecteurs pour le secteur de DZM.

3.1. Carottages sédimentaires

3.1.1. Technique de prélèvement

Les carottes de sédiment aquatique ont été obtenues à l'aide d'un carottier UWITEC (diamètre 60 mm) conçu pour carotter en milieu aquatique. La tête du carottier permet d'y introduire un tube en plastique translucide afin d'effectuer le prélèvement et la mise en tube des sédiments en une seule section. La transparence du tube permet d'effectuer un premier contrôle visuel de l'épaisseur des sédiments prélevés (

Figure 3 A et D). Le prélèvement s'effectue soit à partir d'une plateforme, soit d'une barque (

Figure 3, B et C). Les carottes semi-aquatiques et terrestres ont quant à elles été réalisées à l'aide d'un carottier thermique à percussion, modèle Cobra TT.



Figure 3 : a. principe du carottier UWITEC ; b. plateforme de carottage avec trépied et carottier utilisée pour l'extraction des carottes ; c. extraction d'une carotte à Pierre Bénite (Site de Ciselande) et D/ Carotte prélevée à Péage de Roussillon (Site de l'Ilon)

3.1.2. Stratégie d'échantillonnage et localisation des carottes sédimentaires

Ce sont au total 7 carottes qui ont été prélevées sur les sites de Donzère et Baix-Le-Logis-Neuf (Figure 4).



Donzère



Baix-Le-Logis-Neuf

Figure 4 : localisation des carottes sédimentaires à Donzère et Baix-Le-Logis-Neuf

La carotte aquatique DZM-C1 a été prélevée au niveau d'une zone en eau située au sein d'un casier localisé en rive droite au PK 197.5 (Figure 4). Concernant les carottes semi-aquatiques, les sites ont été

choisis afin qu'ils soient représentatifs de milieux sédimentaires spécifiques (plus ou moins connectés au Rhône) et historiquement bien contextualisés :

- A DZM, la carotte semi-aquatique DZM-C4 a été prélevée au niveau d'une zone atterrie au sein d'un casier localisé en rive gauche au PK 177.
- A BLN, il s'agit de 3 sites avec des environnements de dépôts bien différents : la carotte BLN-C1 provient d'une zone atterrie en post-dérivation, la carotte BLN-C2 en période post-Girardon/pré-dérivation. Ces deux carottes sont localisées dans le même casier, en rive gauche au niveau du PK 142.5. La carotte BLN-C3 située au niveau du PK 136 correspond à un environnement représentatif de la plaine alluviale « ancienne », c'est à dire, déjà annoté comme « terrestre » sur les cartes de 1860.

Les caractéristiques des carottes prélevées sont détaillées au sein du tableau suivant (Tableau 1).

Tableau 1 : caractéristiques des carottes sédimentaires prélevées à DZM et BLN

Nom de la carotte et type	Section (nombre)	Longueur de la carotte (cm)	Coordonnées	
Carottes analysés				
DZM C01 <i>Aquatique</i>	1	93	44,221221	4,67166
DZM C04 <i>Semi-aquatique</i>	4	151	44,396772	4,664814
BLN C01 <i>Terrestre</i>	2	182	44,67232	4,783772
BLN C02 <i>Terrestre</i>	4	311	44,672301	4,784371
BLN C03 <i>Terrestre</i>	3	257	44,73265	4,76161
Archivées et disponibles à l'analyse				
DZM C02	x	x	44,221555	4,671759
DZM C03	x	x	44,396785	4,66473

3.2. Analyses effectuées sur les carottes sédimentaires

3.2.1. Techniques d'analyses

- Description textures et production de logs

Les carottes sont ouvertes et sont décrites selon les séquences observées (variations visibles à l'œil nu de texture, couleur, insert, etc.). Les logs correspondants sont réalisés selon cette description.

- Granulométrie

L'analyse granulométrique des carottes a été réalisée au laboratoire LEHNA-IPE avec un pas d'échantillonnage de 1cm, à l'aide d'un granulomètre laser Malvern Mastersizer 3000 équipé d'un passeur d'échantillon en voir liquide de type hydro 3000G. Les données sont traitées avec le logiciel

Gradistat qui fournit des paramètres granulométriques tels que le grain moyen, le mode, la médiane, le classement ou l'asymétrie de l'échantillon. Les *Heatmaps* sont produits à l'aide de RStudio 1.4.

- **Pourcentage de matière organique et carbonates**

Les pourcentages de matière organique (MO) et carbonates sont obtenus par perte au feu, une méthode basée sur la variation de masse résultant des caractéristiques de combustion des différents composants (Heiri *et al.*, 2001) : 550°C pendant 4h entraîne une destruction de la MO et 950°C pendant 2h, celle des carbonates. Les résultats de perte au feu s'expriment en pourcentage en masse de la matière sèche.

- **Concentration en PCBs et retardateurs de flamme bromés (PBDE, HBCD et PBB)**

Les PCB représentent un groupe de composés organiques de formule moléculaire $C_{12}H_{10-n}Cl_n$ contenant entre 1 et 5 atomes de chlore substitués à des positions différentes dans les cycles phényles. Les polychlorobiphényles (PCB) sont une famille d'organochlorés comptant 209 congénères classée en fonction du nombre et de la position des atomes de chlore dans une molécule de biphényle. Les PCB sont des POPs, ils sont donc persistants, toxiques et sont également hydrophobes, susceptibles d'être bioaccumulés et bioamplifiés. Bien qu'ils soient tous théoriquement analysables, les mesures à des fins environnementales sont généralement effectuées sur seulement une vingtaine de congénères (limites analytiques et coût élevé) ; plus généralement, les études se limitent aux 7 PCB indicateurs : # 101, # 118, # 138, # 153, # 180, # 28, # 52.

En plus des PCB, les teneurs en éléments bromés ont été mesurés. Ils sont utilisés comme retardateurs de flammes depuis les années 1940. Les éléments analysés sont la somme des 8 polybromodiphényléthers indicateurs ($\Sigma 8PBDE$: PBDE 28, PBDE 47, PBDE 49, PBDE 99, PBDE 100, PBDE 153, PBDE 154, PBDE 183) ; la somme des 3 polybromobiphényles ($\Sigma 3PBB$ = somme des PBB 52, 101, 153). Il existe plusieurs évolutions chimiques pour ces éléments bromés, formes qui se sont parfois succédés ou désintégrés au cours du temps.

Les analyses des échantillons sont effectuées au laboratoire ONIRIS/LABERCA de Nantes. L'extraction y est réalisée selon la méthode accréditée QMA 504-192. Elle comporte trois grandes étapes, que sont la préparation de l'échantillon et l'extraction, la purification de l'extrait et l'analyse par HRGC-HRMS (chromatographie gazeuse capillaire couplée à une spectrométrie de masse haute résolution).

- **Radionucléides**

Les radionucléides ont été analysés au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) de Gif-Sur-Yvette. L'étude de la radioactivité est un outil de datation relative des séquences sédimentaires. Dans cette étude, une attention particulière a été portée à l'échelle séculaire grâce à l'étude du plomb 210 (^{210}Pb) et du Césium 137 (^{137}Cs). Le Césium 137 retrouvé provient d'une part des essais nucléaires atmosphériques réalisés entre les années 50 et 80 (le pic d'activité de ces essais est généralement enregistré en 1963) et de l'accident nucléaire de la centrale de Tchernobyl en 1986. Cette technique de datation absolue permet de cadrer temporellement les carottes pour la seconde moitié du 20^{ème} siècle en complément des analyses diachronique, planimétrique et hydrologique.

- **Élément-Traces Métalliques (ETM)**

Les échantillons de sédiments sont au préalable minéralisés (2 ml HNO_3 ultrapur + 6 ml HCl) afin de faire passer en solution les éléments constitutifs et permettre ainsi leur analyse par Spectrophotométrie d'Absorption Atomique Flamme (SAAF). Par SAAF, une lampe à cathode creuse fournit de l'énergie lumineuse aux atomes qui l'absorbent selon une longueur d'onde spécifique à chaque élément. La quantité de lumière alors absorbée est mesurée par un détecteur qui produit un signal électronique

correspondant à l'intensité lumineuse. L'absorbance mesurée permet alors d'estimer la teneur de ces éléments.

3.2.2. Types d'analyses réalisées selon les carottes sédimentaires

Tel qu'annoncé dans les objectifs du livrables, deux carottes sédimentaires provenant de DZM (C01 et C04) ont été analysées dans le détail pour l'ensemble des paramètres précédemment présentés. Elles viennent parachever l'objectif des 6 carottes analysés dans le cadre de l'OSR5. Celles de BLN (C01, C02, C03) ont été décrites (logs) et caractérisées sur le plan granulométrique (uniquement C01 et C02 ; cf. Tableau 2) afin de répondre aux objectifs de la campagne exploratoire engagée dans la compréhension des états initiaux pré-aménagements.

L'ensemble des granulométries des deux secteurs d'études sont réalisées tous les centimètres. En revanche, à DZM où nous avons réalisé d'autres analyses (MO, Carbonates, POPs, Radionucléides), elles sont effectuées selon la description séquentielle des logs (Tableau 3).

Tableau 2 : analyses réalisées sur les carottes sédimentaires

Carottes	Types d'analyses
DZM C01 DZM C04	Description textures et production de logs
	Granulométrie (tous les cm, soit un total de 226 analyses)
	Pourcentage de matière organique et carbonates
	Concentrations des POPs
	Radionucléides (NB : certaines séquences sont en attente de résultats).
BLN C01 BLN C02 BLN C03	Description textures et production de logs
	Granulométrie pour la C01 et C02 (tous les cm, soit 487 analyses)
DZM C02 DZM C03	Pas d'analyses Archivage

Tableau 3 : séquences analysées pour les MO, Carbonates, POPs et Radionucléides

Carotte	Liste des séquences (repères annotés en cm, où la surface = 0 cm)
DZM C01	0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-29, 29-34, 34-40, 40-46, 46-50, 50-53, 53-56, 56-60, 60-67, 67-73, 73-80, 80-86, 86-89, 89-93, 93-98
DZM C04	0-7, 7-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45, 45-50, 50-55, 55-62, 62-68, 68-74, 74-79, 79-83, 83-87, 87-92, 92-96, 96-100, 100-107, 107-111, 111-119, 119-124, 124-128

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

3.3.1. Principe de la méthode

La caractérisation de la structure du sol par radar géologique (Ground Penetrating Radar) est une méthode géophysique non invasive permettant de fournir des images à haute résolution de structures souterraines peu profondes et est souvent employé lors d'études sédimentologiques (Davis *et al.*, 1989 ; Beres et Haeni, 1991 ; Gawthorpe *et al.*, 1993). Le GPR est basé sur un principe de réflexion du signal (dans la lignée des techniques de réflexion sismique et de sonar) mais pour sa part, il utilise un rayonnement électromagnétique. En effet, des impulsions discrètes d'énergie électromagnétique haute fréquence (MHz) sont générées et transmises dans le sol. Elles sont partiellement réémises lorsqu'elles traversent l'interface de couches de sol aux propriétés diélectriques différentes. Le choix de l'antenne s'effectue de manière à obtenir le meilleur compromis entre la profondeur d'investigation et la résolution verticale (possibilité de séparer deux couches en profondeur). La profondeur maximale d'acquisition étant au préalable très difficile à estimer, deux types d'antennes différents ont été utilisés dans le cadre de cette étude : 200 et 400 MHz (Figure 5). Cette limite n'a pas d'impact sur notre étude

car les structures sédimentaires qui nous intéressent sont situées au-dessus du toit de gravier lui-même situé à moins de 10 m de profondeur. Aussi, la fréquence d'émission affecte la résolution verticale de l'image GPR, qui varie de 10 cm à 1 m (Jol, 1995). Les images sont acquises dans le cadre du programme OSR5 par l'équipe de l'ENTPE (ENTPE, UMR 5023 LEHNA) qui a utilisé une structure GSSI SIR 3000 (Geophysical Survey Structure Inc., Salem, USA), avec une antenne blindée à une fréquence centrale de 200 MHz en mode monostatique (Figure 5).



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

La compilation et la juxtaposition des signaux enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permettent d'obtenir un profil 2D appelé radargramme (Figure 6). Sur ce profil 2D vertical, les réflecteurs correspondent aux lignes de réflexion du signal associées au changement de structure et/ou de texture dans le sol. Le radargramme rend ainsi compte des principales structures sédimentaires sur une coupe verticale et donne une idée de la nature du dépôt (Vauclin *et al.*, 2020 ; Regli *et al.*, 2002 ; Beres *et al.*, 1999).

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

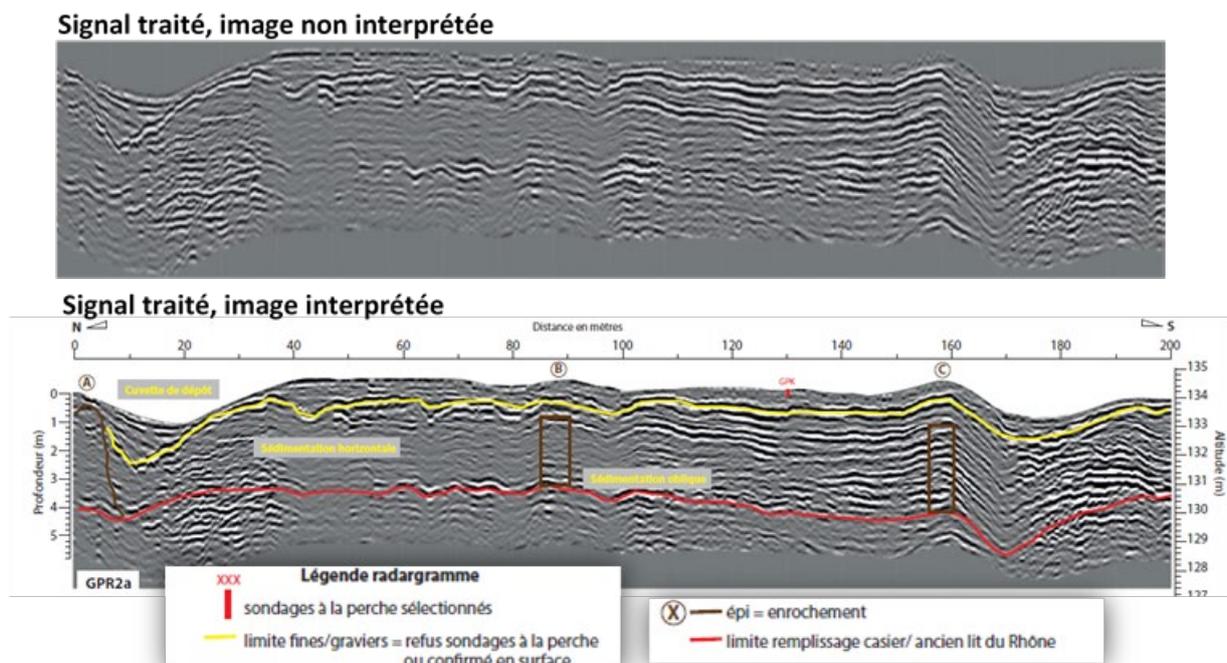


Figure 6 : interprétation des radargrammes

3.3.2. Localisation des transects GPR

Ont été réalisés au total 5 transects à DZM et 8 transects à BLN (Tableau 4).

Tableau 4 : localisation des transects GPR à BLN et DZM

GPR à DZM				
ID	Position	X	Y	Longueur (m)
GPR1	Départ	4,6716369	44,2209212	63
GPR1	Arrivée	4,6717038	44,2214893	
GPR2	Départ	4,6717704	44,2215905	69
GPR2	Arrivée	4,671646	44,220978	
GPR3	Départ	4,671565	44,2212936	15
GPR3	Arrivée	4,6717554	44,2212811	
GPR4	Départ	4,6717162	44,2216563	10
GPR4	Arrivée	4,6718122	44,2216131	
GPR5	Départ	4,6647299	44,396886	42
GPR5	Arrivée	4,6648163	44,396514	
GPR à BLN				
ID	Position	X	Y	Longueur (m)
GPR1	GPR1	GPR1	44,736074	216
GPR1	GPR1	GPR1	44,734271	
GPR2	GPR2	GPR2	44,734237	79
GPR2	GPR2	GPR2	44,733675	
GPR3	GPR3	GPR3	44,733674	87
GPR3	GPR3	GPR3	44,73299	
GPR4	GPR4	GPR4	44,732601	109
GPR4	GPR4	GPR4	44,732595	
GPR5	GPR5	GPR5	44,722801	274
GPR5	GPR5	GPR5	44,722095	
GPR6	GPR6	GPR6	44,722087	280
GPR6	GPR6	GPR6	44,722804	
GPR7	GPR7	GPR7	44,717648	227
GPR7	GPR7	GPR7	44,718711	
GPR8	GPR8	GPR8	44,718702	86
GPR8	GPR8	GPR8	44,718579	

4. RESULTATS

4.1. Études des dépôts sédimentaires à Donzère

4.1.1. Contexte planimétrique et topographique des environnements de dépôt

Les environnements de dépôt des carottes sédimentaires ont été caractérisés sur le plan planimétrique et topographique. Les carottes C1 et C4 ont été choisies pour l'analyse afin qu'elles soient informatives des deux types de milieux ciblés : aquatique et terrestre. La C1, au niveau d'une zone aquatique résiduelle, est localisée derrière un ancien îlot, au sein d'un casier qui s'est fortement atterri en post-dérivation (Figure 7 et 9). La C4 provient d'une zone atterrie en post dérivation (passage d'aquatique à terrestre entre 1955 et 1976) situé derrière une digue longitudinale à proximité d'une lône (Figure 8 et 9). Elle est associée à une élévation de 51,1m, soit + 1,1 m par rapport à la ligne d'eau ; et à une fréquence de submersion de 8,2 jour /an (Džubáková *et al.*, 2014).

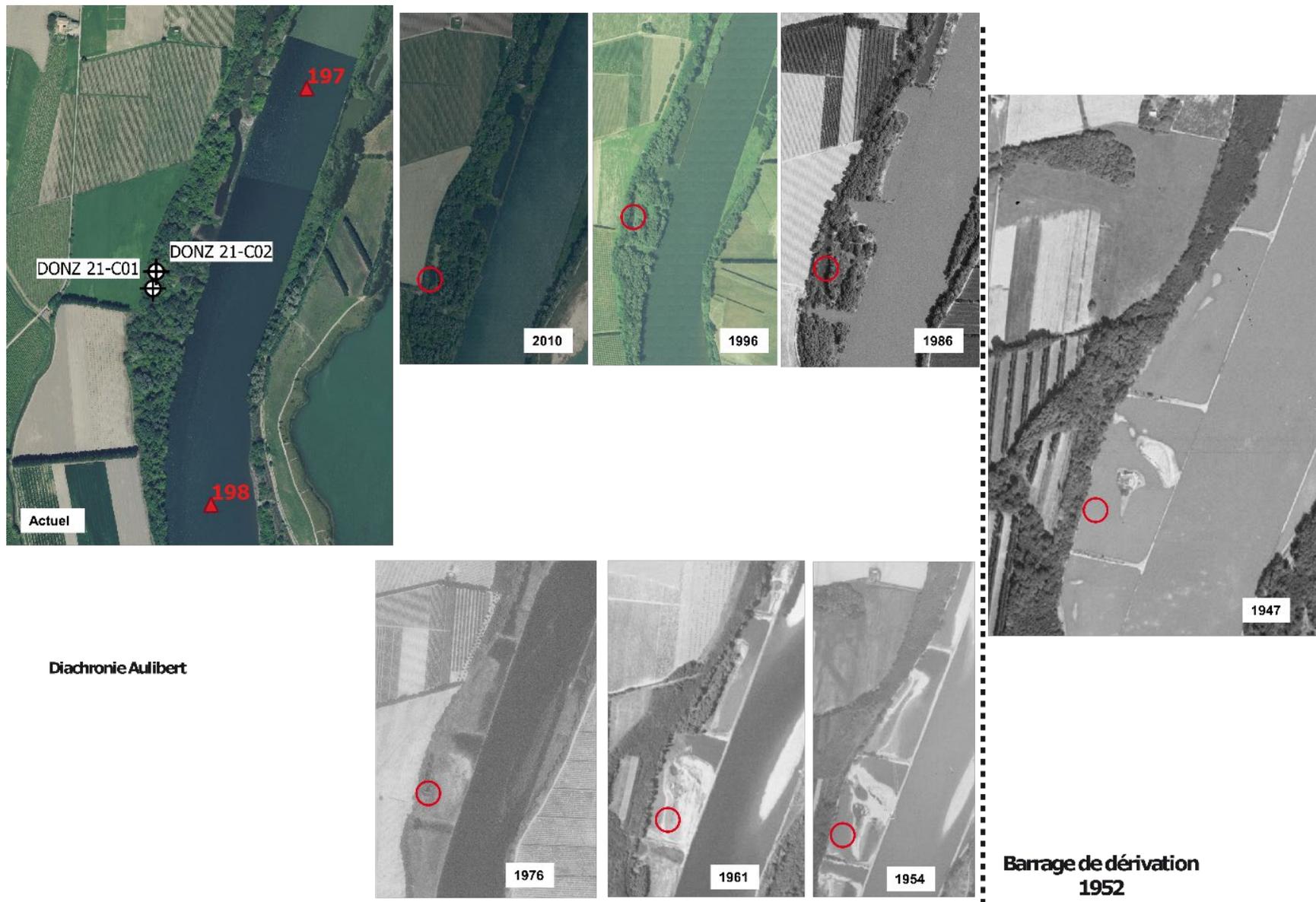
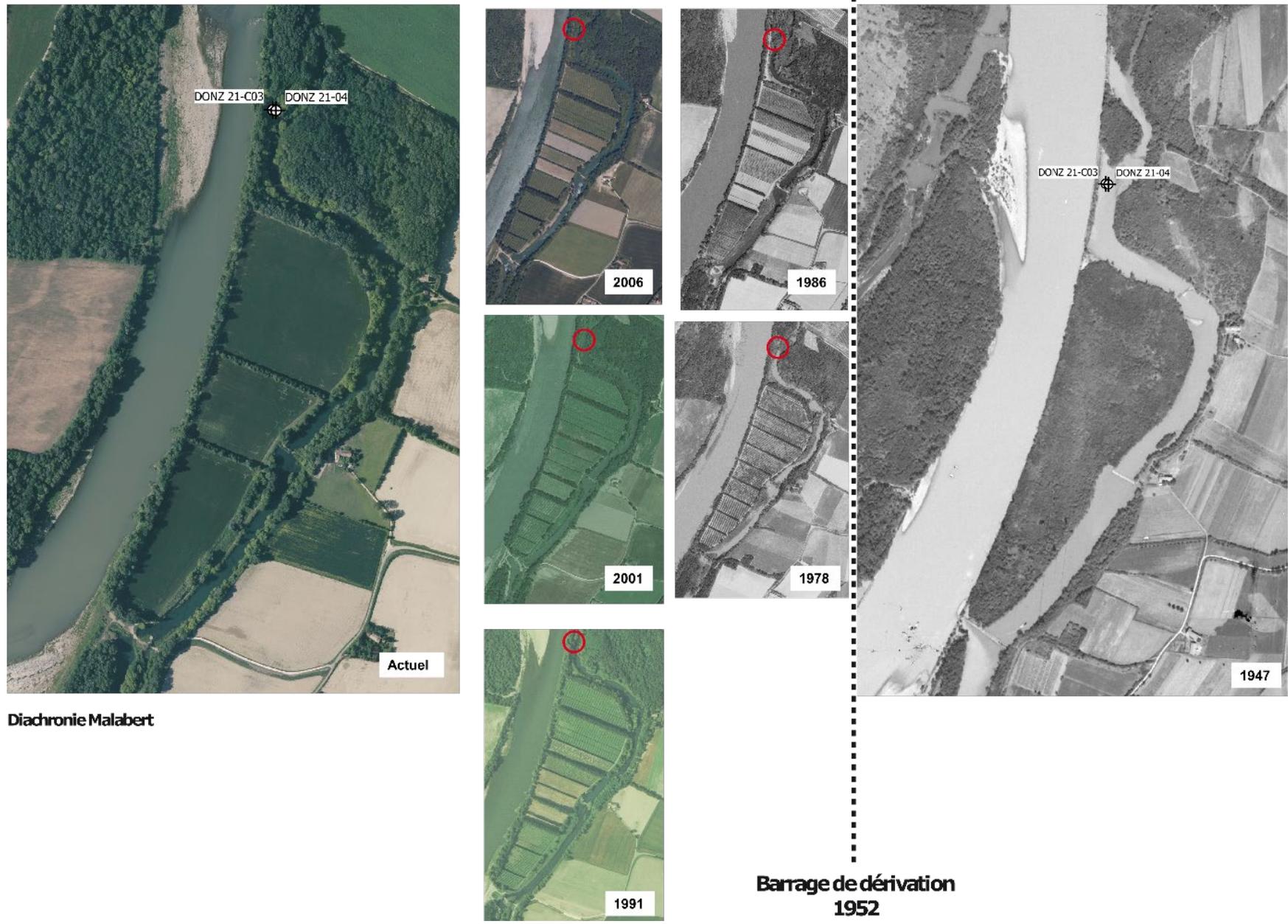


Figure 7: série diachronique au niveau des carottes C1 et C2 (photo source : IGN)



Diachronie Malabert

Figure 8: série diachronique au niveau des carottes C3 et C4 (photo source : IGN)

Contexte planimétrique et topographique des environnements de dépôt

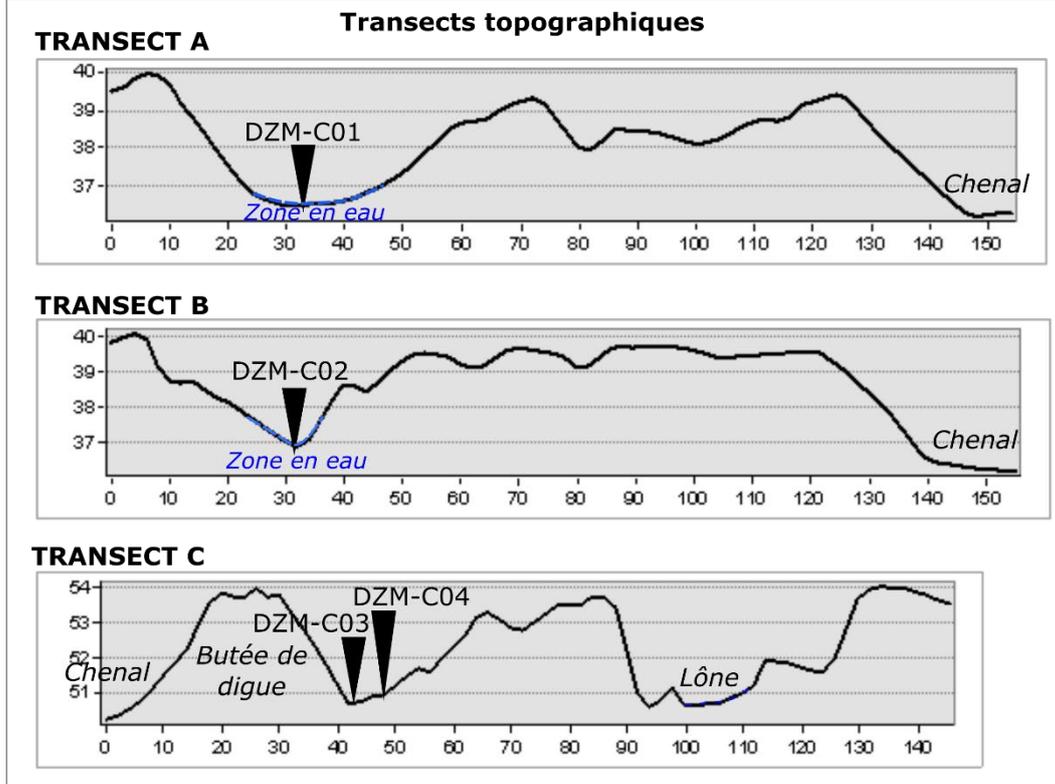
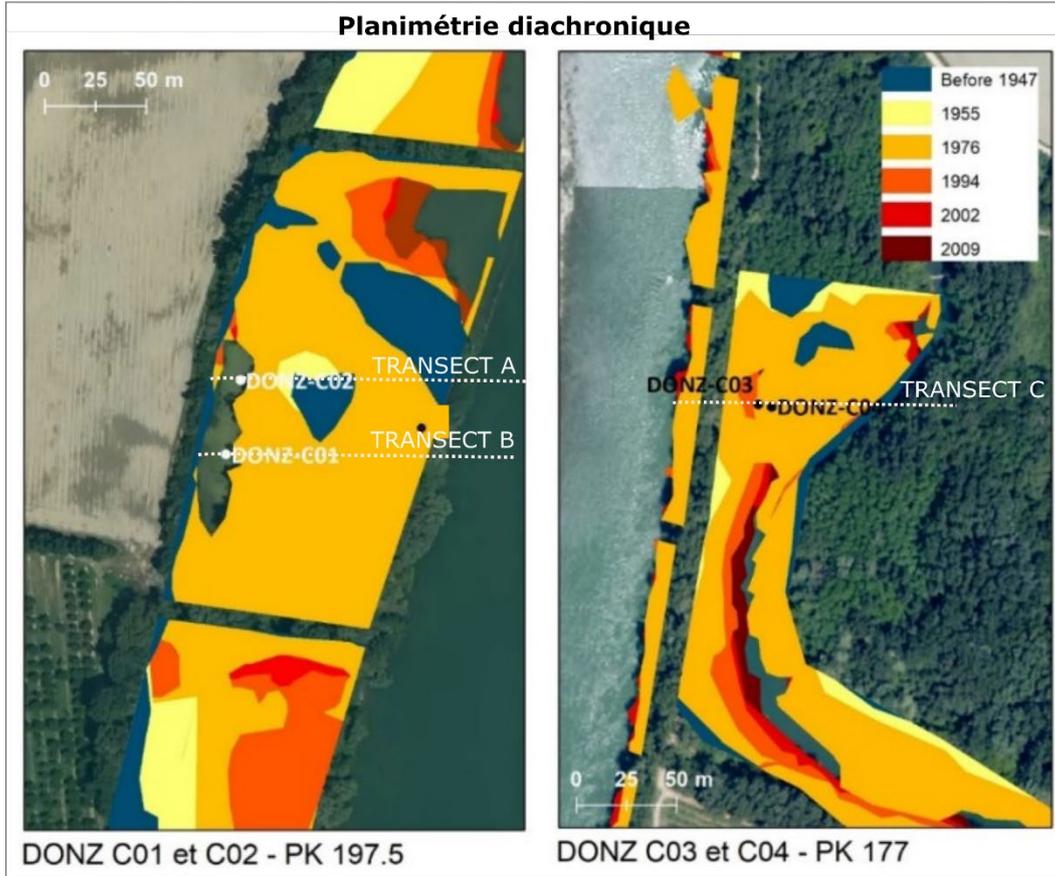


Figure 9: contexte planimétrique et topographique de dépôts sédimentaire selon les sites de prélèvement des carottes (photo source : IGN)

4.1.2. Images GPR des environnements de dépôt des carottes sédimentaires

Afin de situer les zones de prélèvement des carottes, une représentation des carottes est placée sur les profils géophysiques (Figure 10). Sur les profils GPR 1 à 4 du site d'Aubinet (Figure 10), un réflecteur principal (en rouge) peut être observé sur l'ensemble des profils. Ceci concorde avec la zone de « refus » des carottes. Le réflecteur jaune pourrait quant à lui correspondre à des transitions plus ou moins sableuses.

Les profils GPR 1 et 2 semblent témoigner d'une accumulation progradante dans le sens Nord-Sud. Entre le réflecteur surligné en rouge et celui en jaune, on peut notamment distinguer des figures de progradation pouvant correspondre à une dynamique d'accumulation sur une épaisseur de quelques dizaines de centimètres à 1 m. La carotte DONZ-C01 semble confirmer ces observations. Mesurant 98cm, elle est constituée de séquence sablo-limoneuses qui semblent correspondre aux motifs d'accumulation des radargrammes. Ainsi, l'application exploratoire du *Ground Penetrating Radar* (GPR) en milieu aquatique s'est révélée concluante.

Ces réflecteurs semblent constituer des délimitations pertinentes pour les unités sédimentaires associées aux périodes « pré- » et « post » aménagement :

- L'unité 1 (en dessous du réflecteur surligné en rouge) est interprétée comme étant la couche alluvionnaire de l'ancien lit du Rhône avant les périodes d'aménagement (avant 1880/1900).
- L'unité 2 (entre le réflecteur surligné en rouge et celui en jaune) correspondrait à des dépôts établis lors la période post-correction, pré-dérivation (1900 à 1952).

L'unité 3 (en dessus du réflecteur surligné en jaune) correspondrait quant à elle à des sédiments déposés durant la période post-dérivation (1952-2021).

Sur le GPR5 (Figure 11), les motifs sont plus compliqués ; on est face à une inter-stratification de couches sédimentaires à la texture variant entre des couches limono-sableuses et sablo-limoneuses, (cf. log de la C03, Figure 11). On y observe des réflecteurs épais et obliques plus ou moins parallèles ou à motifs sigmoïdaux, typique d'un milieu assez dynamique et de processus de sédimentation hétérogène. Une délimitation du toit de galets et des structures internes est proposée sur interprétation des réflecteurs. Elle semble pertinente avec la structuration du log de la carotte C03.

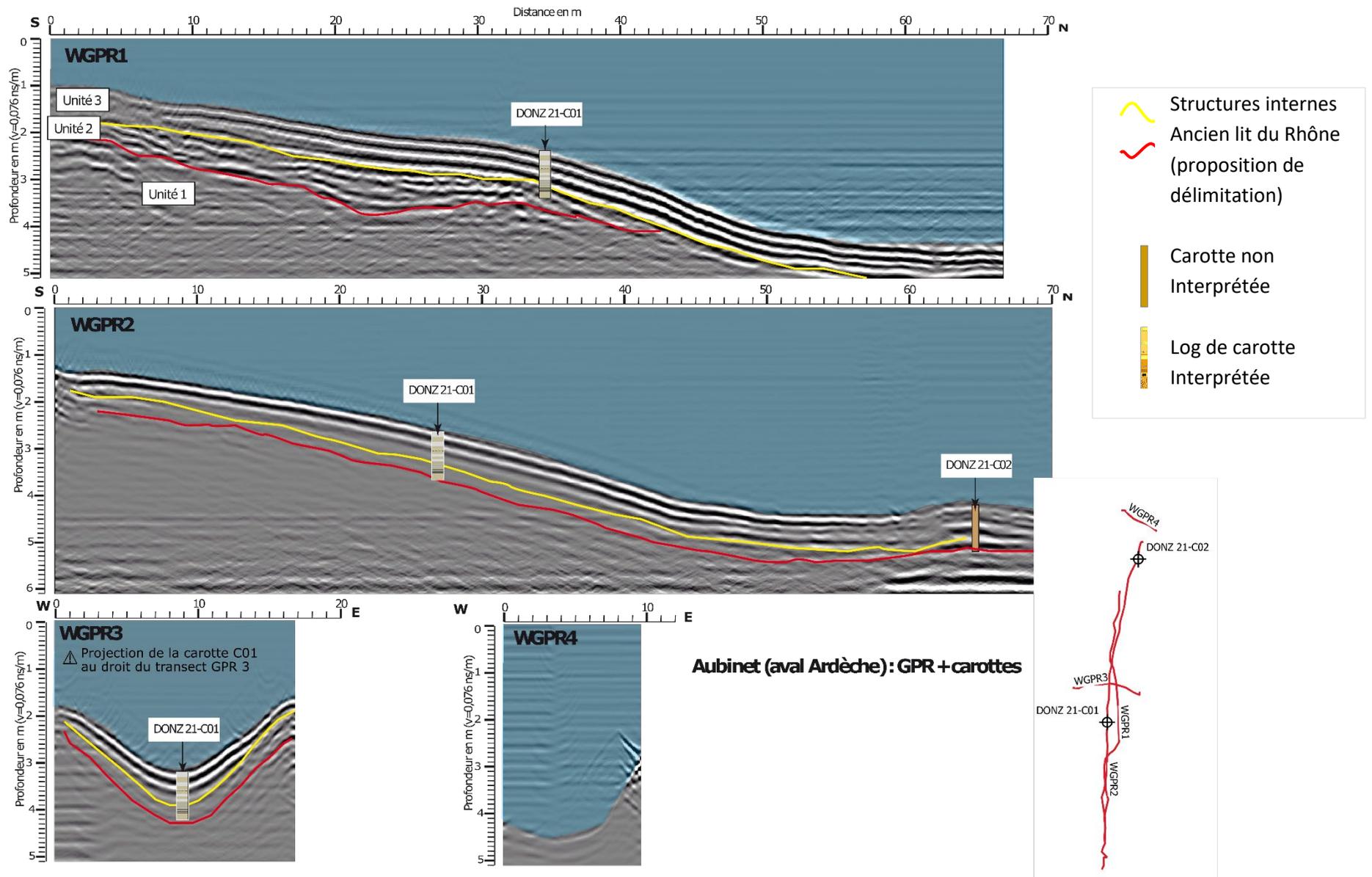
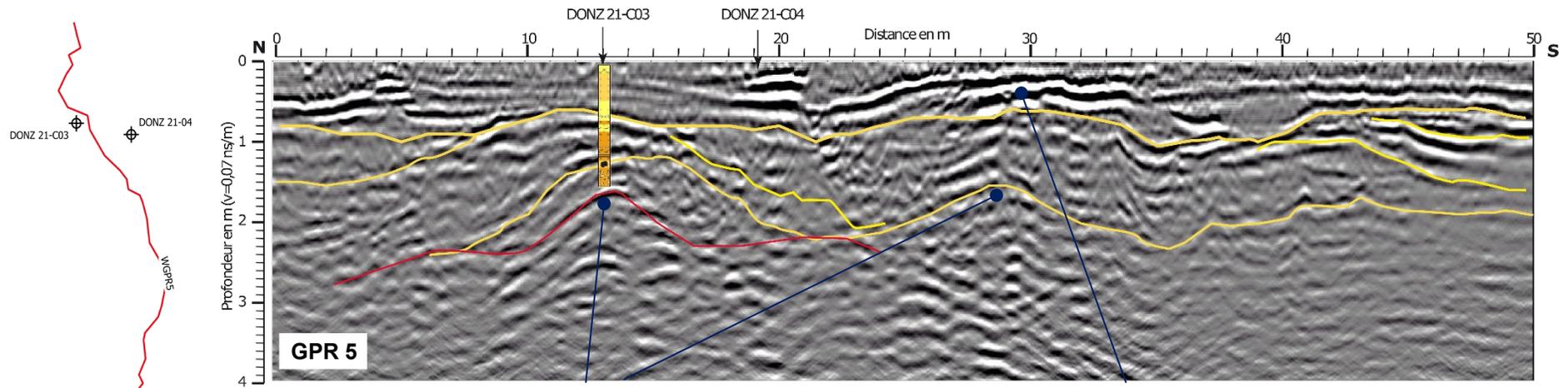


Figure 10: Profils GPR subaquatique à Donzère (GPR 1 à 4) du site d'Aubinet, inclusion du log de la carotte étudiée (C01)

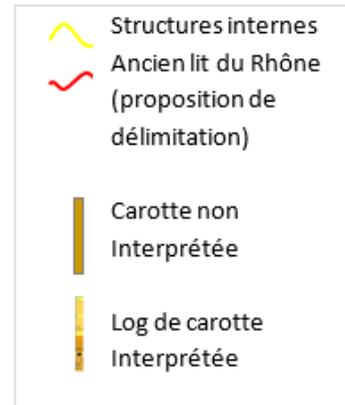
Malabert (amont Ardèche): GPR + carottes



Réflecteurs épais et obliques
plus ou moins parallèles à motifs sigmoïdaux

Réflecteurs épais horizontaux plus ou moins parallèles

Figure 11: Profil GPR5 du site de Malabert (version avec topographie non corrigée)



4.1.2. Description et granulométrie des carottes sédimentaires

Après ouverture des quatre carottes prélevées à DZM (2 sur le site amont, deux sur le site aval, cf. Figure 4), nous avons sélectionné une carotte sur chacun des sites (DZM-C01 et DZM-C04), celles présentant des séquences les plus contrastées et les mieux définies afin d'optimiser la portée informative des analyses granulométriques.

- **Carotte DZM-C01**

Des séquences limoneuses à sablo-limoneuses à faciès gris et brun se succèdent. Hors lamine sableuse, la carotte est globalement peu triée et présente des textures sablo-limoneuses. En effet, le D50 moyen est de $27,7 \pm 14,3 \mu\text{m}$ tandis que le D10 et D90 sont respectivement de $3,3 \pm 1,4 \mu\text{m}$ et $175 \pm 61,8 \mu\text{m}$. Le D50 max observé de $81,8 \mu\text{m}$ correspond à la lamine sableuse située à 77-78 cm.

Carotte DZM-C04

La carotte C04 est globalement plus triée que la C01. On y observe des séquences sablo-limoneuses :

- [0-10] : D50 = $41,7 \pm 19,1 \mu\text{m}$
- [45-69] : D50 = $54,4 \pm 22,8 \mu\text{m}$
- [74-83] : D50 = $41,2 \pm 10,2 \mu\text{m}$

Et limono-sableuses :

- [10-45] : D50 = $123,3 \pm 28,9 \mu\text{m}$
- [69-74] : D50 = $250,9 \pm 19 \mu\text{m}$
- [83-128] : D50 = $229,5 \pm 80 \mu\text{m}$. Cette dernière, assez hétérogène, présente quelques passages sableux plus fins, ce qui explique l'écart-type plus important

La séquence 128-151 correspond à une matrice sableuse avec des graviers et des galets sur les zones les plus profondes.

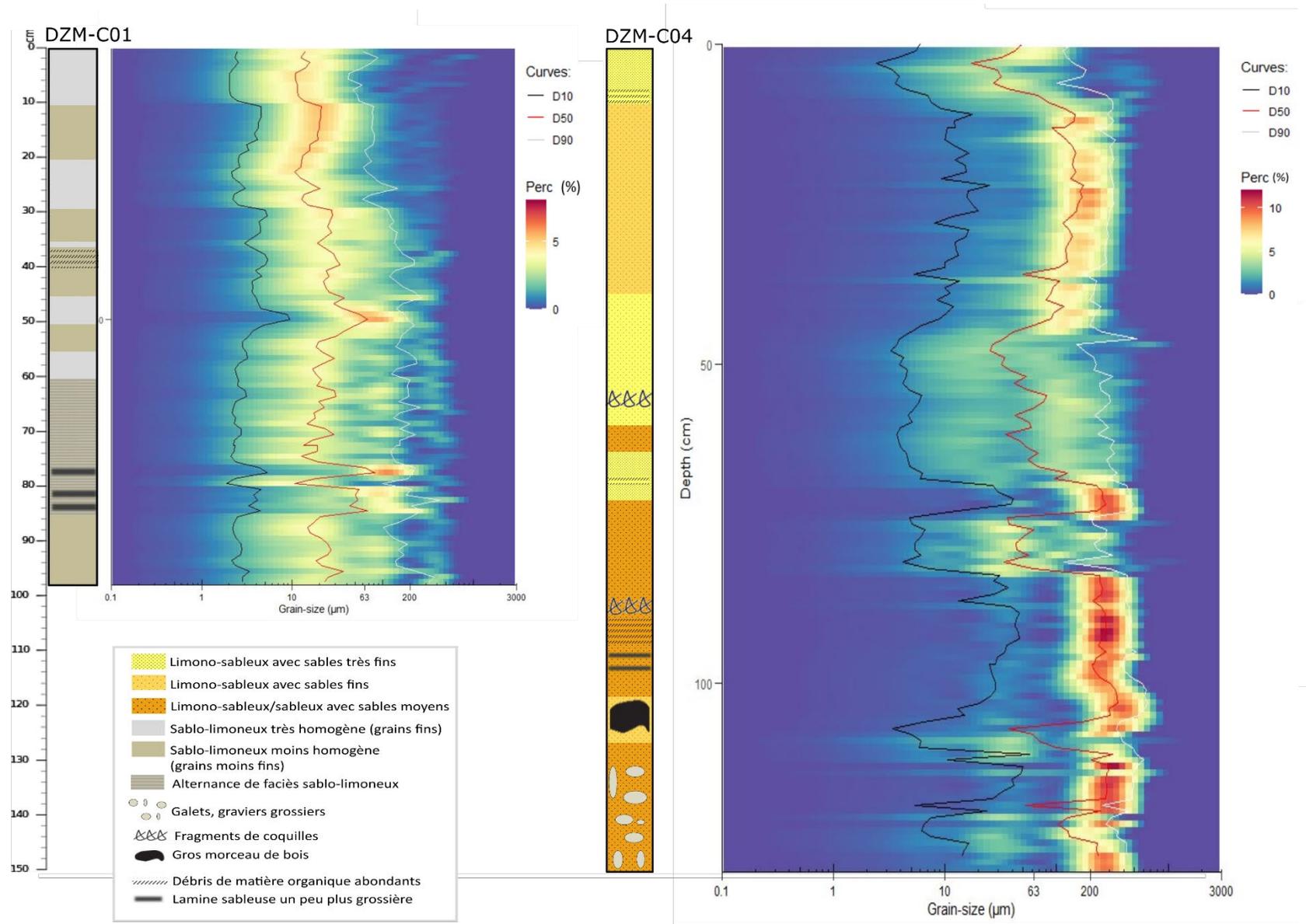


Figure 12 : logs et heatmaps des carottes DZM-C01 et DZM-C04

4.1.3. Caractéristiques géochimiques des carottes de sédiments

Certaines séquences sont en attente de résultats vis-à-vis des analyses réalisées par des prestataires externes. Ainsi les séquences [68-74], [79-83] et [87-92] de la carottes C04 sont non renseignées sur le plan des analyses en radionucléides.

Carotte C01 (Figure 13 et tableau 5)

La carotte C01 dont le D50 moyen est de $24,4 \pm 13,8 \mu\text{m}$ présente une teneur moyenne en MO de $5,6 \pm 1,5 \%$ et en carbonates de $12,26 \pm 1 \%$.

Du côté des radionucléides, la C01 présente un pic en Cs 137 atteignant $120,7 \text{ Bq/kg}$ sur la séquence 67-73 cm et des valeurs en Pb 210 qui décroissent après un pic de $109,4 \text{ Bq/kg}$ entre 34 et 40 cm.

Du côté de la $\Sigma 7\text{PCBi}$, on observe des valeurs plus élevées sur le fond de la carotte avec un maximum de $350,2 \mu\text{g/kg}$ sur la séquence 86-89 cm. Les valeurs décroissent ensuite jusqu'à la séquence 40-46. Ensuite, sur les séquences plus en surface, les teneurs varient entre 8 et $40 \mu\text{g/kg}$.

Concernant les $\Sigma 3\text{PBB}$, celles-ci présentent des valeurs atteignant entre 0,01 et $0,04 \mu\text{g/kg}$, *i.e.* 2 à 3 fois plus élevées sur la partie 46-86 cm que sur le reste de la carotte.

Pour les $\Sigma 8\text{PBDE}$, on observe un pic vers la surface (0-5cm) atteignant $1,11 \mu\text{g/kg}$ et des valeurs plus élevées entre 53 et 80 cm, comprises entre 0,74 et $0,96 \mu\text{g/kg}$.

Les teneurs moyennes pour les ETM sont de $166,9 \text{ mg/kg}$ pour le Zn, $47,6 \text{ mg/kg}$ pour le Pb, $28,6 \text{ mg/kg}$ pour le Cu, $0,59 \text{ mg/kg}$ pour Cd, $29,4 \text{ mg/kg}$ pour Ni et $68,4 \text{ mg/kg}$ pour Cr. Les maximums observés correspondent à $210,9 \text{ mg/kg}$ pour le Zn, $80,7 \text{ mg/kg}$ pour le Pb, $36,8 \text{ mg/kg}$ pour le Cu, $1,07 \text{ mg/kg}$ pour Cd, $36,6 \text{ mg/kg}$ pour Ni et $88,94 \text{ mg/kg}$ pour Cr. Les teneurs en ETM sont plus importantes sur la moitié la plus basse de la carotte C01 ($\sim 50 \text{ cm}-98 \text{ cm}$).

Carotte C04 (Figure 13 et tableau 5)

La carotte C04 dont la granulométrie est plus hétérogène présente un D50 moyen de $141,7 \pm 93,9 \mu\text{m}$, une teneur moyenne en MO de $3,23 \pm 2,1 \%$, en Carbonates de $10,8 \pm 2,4 \%$.

Du côté des radionucléides, la C04 ne présente pas de pic en Cs 137. A noter que les séquences [68-74], [79-83] et [87-92] sont non renseignées. En revanche, un pic en Pb 210 atteignant $99,3 \text{ Bq/kg}$ est observé sur la séquence 45-50.

Du côté de la $\Sigma 7\text{PCBi}$, il y a un pic de $204,8 \mu\text{g/kg}$ sur la séquence 55-62 cm. Les valeurs décroissent ensuite sur la séquence 20-55. Ensuite, sur les séquences plus en surface, un « pic » plus faible est observé entre 10 et 15 cm, atteignant $88,9 \mu\text{g/kg}$.

Concernant les $\Sigma 3\text{PBB}$, on observe un pic atteignant $0,03 \mu\text{g/kg}$ sur la séquence 0-7 cm et un sur la séquence 68-74 correspondant à une teneur de $0,023 \mu\text{g/kg}$. Ces valeurs sont plus de 2 à 3 fois importantes cm que sur le reste de la carotte (moyenne = $0,01 \pm 0,006$)

Pour les $\Sigma 8\text{PBDE}$, des valeurs plus élevées sur les séquences 92-100 et 107-111 ; elles sont comprises entre 0,06 et $0,11 \mu\text{g/kg}$.

Les teneurs moyennes pour les ETM sont de $123,4 \text{ mg/kg}$ pour le Zn, 17 mg/kg pour le Pb, $11,3 \text{ mg/kg}$ pour le Cu, $0,18 \text{ mg/kg}$ pour Cd, $17,6 \text{ mg/kg}$ pour Ni et $33,4 \text{ mg/kg}$ pour Cr. Les maximums observés correspondent à $207,2 \text{ mg/kg}$ pour le Zn, $27,7 \text{ mg/kg}$ pour le Pb, $19,7 \text{ mg/kg}$ pour le Cu, $0,32 \text{ mg/kg}$ pour Cd, $25,2 \text{ mg/kg}$ pour Ni et $58,4 \text{ mg/kg}$ pour Cr. Les teneurs en ETM présentent une tendance à l'augmentation sur le haut de la carotte C04 ($\sim 0 \text{ cm}-60 \text{ cm}$).

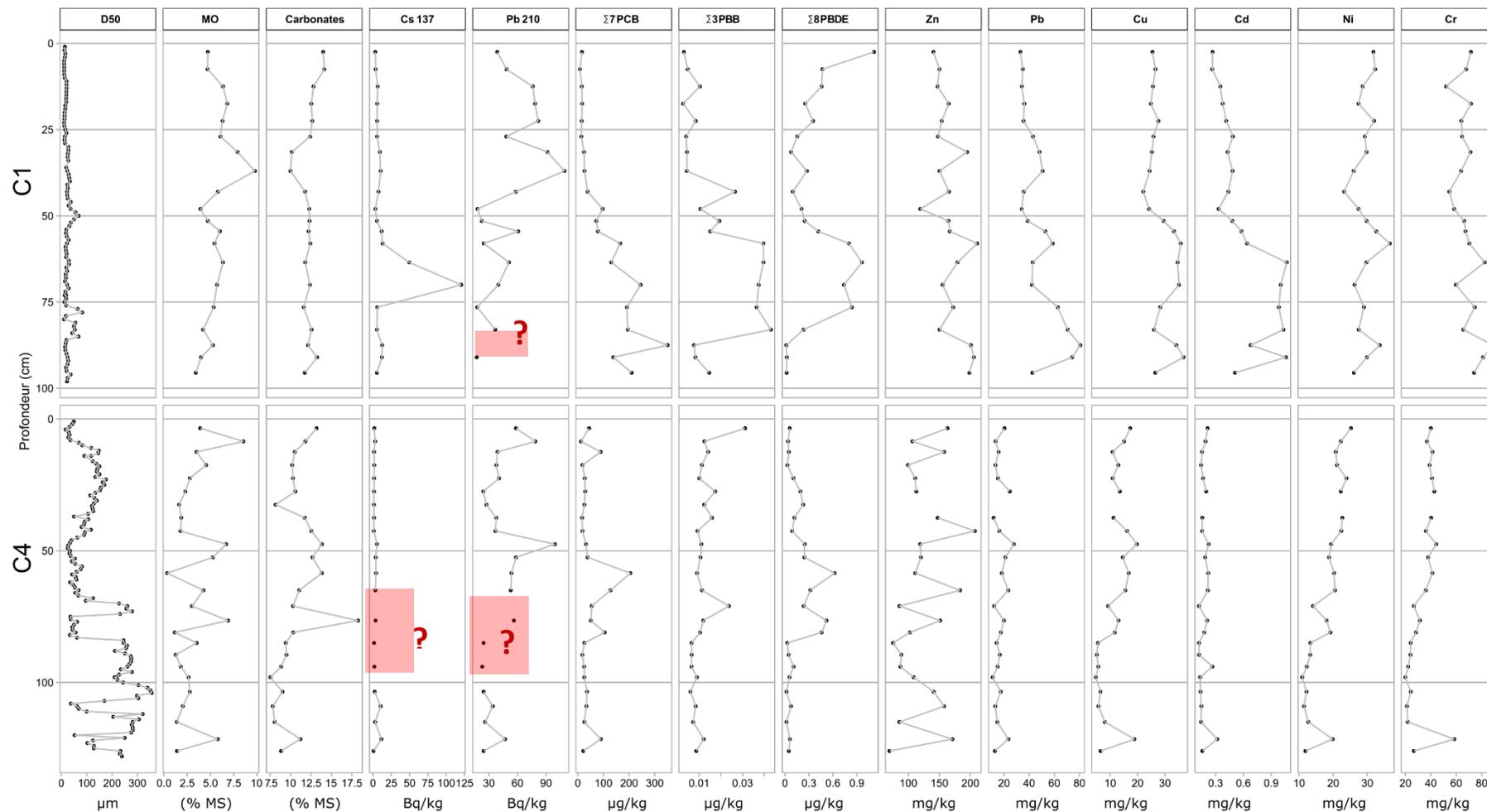


Figure 13: Caractéristiques géochimiques des carottes de sédiments : D50, MO, carbonates, Pb 210, Cs 137, Σ7PCB, Σ3PBB, Σ8PBDE, Zn, Pb, Cu, Cd, Ni et Cr.
 En rouge : séquences où l'information n'est pas continue - analyses encore en cours.

Tableau 5 : caractéristiques géochimiques des carottes de DZM

	DZM-C01			
	Moyenne	SD	Max	n
D50 (µm)	24.43235336	13.76163219	81.84750416	98
MO (%)	5.63807924	1.47009523	9.78105747	20
Carbonates (%)	12.25573525	1.00121111	14.13313042	20
Pb 210 (Bq/kg)	51.08948646	27.50140283	109.35703569	18
Cs 137 (Bq/kg)	15.11533795	26.75562784	120.67510029	20
7PCB (µg/kg)	102.30818368	97.37881436	350.18189524	20
3PBB (µg/kg)	0.01698889	0.01444951	0.04300198	20
8PBDE (µg/kg)	0.38771129	0.33381497	1.11464600	20
Zn (mg/kg)	166.8898	24.53459	210.9223	20
Pb (mg/kg)	47.60537	14.589771	80.71357	20
Cu (mg/kg)	28.58266	4.588715	36.78468	20
Cd (mg/kg)	0.5935949	0.2789032	1.0671498	20
Ni (mg/kg)	29.43418	3.118372	36.60194	20
Cr (mg/kg)	68.45002	9.136643	88.94711	20
	DZM-C04			
	Moyenne	SD	Max	n
D50 (µm)	141.67197626	93.924614033	356.33815043	129
MO (%)	3.23882825	2.066942783	8.53856124	25
Carbonates (%)	10.77403165	2.404928589	18.27238170	25
Pb 210 (Bq/kg)	43.07121339	19.822324407	99.29478540	21
Cs 137 (Bq/kg)	3.12832822	2.871739546	11.53875346	21
7PCB (µg/kg)	47.48637401	44.494590525	204.81437850	25
3PBB (µg/kg)	0.01170517	0.005630243	0.03116147	25
8PBDE (µg/kg)	0.16067858	0.165673684	0.62199252	25
Zn (mg/kg)	123.4111	36.74234	207.2072	24
Pb (mg/kg)	17.03846	4.506914	27.71144	24
Cu (mg/kg)	11.25130	4.709929	19.73134	23
Cd (mg/kg)	0.1779983	0.0499925	0.3177756	23
Ni (mg/kg)	17.55739	4.471719	25.19231	23
Cr (mg/kg)	33.37870	9.866174	58.41609	23

4.1.4. Bilans et interprétations sur les patrons verticaux des caractéristiques géochimiques

N.B. A ce niveau, les interprétations qui suivent ne sont pas avancées comme des états de fait, elles proposent des pistes explicatives.

Sur la carotte DZM-C01 (Figure 13, annexe 1), le pic d'activité en Cs 137 mesuré sur la séquence 67-73 cm est très marqué ($^{137}\text{Cs} = 120,7 \text{ Bq/kg}$), il pourrait correspondre au pic de Tchernobyl (1986). La granulométrie de la carotte est peu triée et présente peu de structure érosive (celles-ci ont un aspect strié et rendent les limites entre couches moins nettes). DZM-C01 est située au fond d'un casier, dans une forme aquatique résiduelle (Figure 8). Tous ces éléments décrivent un environnement de dépôt relativement calme, ce qui est propice à l'enregistrement d'une chronique aussi nette en Cs 137.

A noter qu'un pic en Cs137 atteignant une activité de 120,7 Bq/kg correspond à une valeur particulièrement élevée. En effet, les valeurs observées sur le Rhône à PDR par Vauclin *et al.* (2020) sont de l'ordre de 20 à 40 Bq/kg. Néanmoins, il est possible qu'une telle différence puisse être imputable à une exposition plus forte du site lors du passage du nuage de Tchernobyl.

En outre, les BDE sont à leur maximum dans les années 2000, puis sont interdits en 2008. Cependant, les teneurs observées par Vauclin *et al.* (2020) pour Σ 9PBDE sur PDR correspondant à cette période atteignent 120 $\mu\text{g}/\text{kg}$, contre 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ sur 2008-2018, alors que les teneurs sont en nette diminution. Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que celles observées dans les carottes de DZM où les maximums observés atteignent 0,03 $\mu\text{g}/\text{kg}$. A tempérer par le fait que Vauclin *et al.* (2020) note que le congénère BDE-209 représente 93 à 99% des Σ 9PBDE et qu'il ne fait pas partie du cocktail des 8 congénères de cette étude (PBDE 28, PBDE 47, PBDE 49, PBDE 99, PBDE 100, PBDE 153, PBDE 154, PBDE 183).

Concernant la Σ 7PCBi, les pics de la DZM-C01 (350,2 $\mu\text{g}/\text{kg}$) et de la DZM-C04 (de 204.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$) sont assez élevés, puisque plus importants que ceux de l'ordre de 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ observés à PDR. Il est à noter que les archives sédimentaires témoignent en général de l'apparition des PCB dans les années 1950s, avec des maximums dans les années 1970-1980.

Par rapport au fond géochimique en ETM cités par Dendeviel *et al.* (2020), on observe :

- Rappel : fond géochimique zinc = 64,6 mg/kg.
⇒ Des teneurs 2,6 fois plus importantes pour la C01, 1,9 fois plus importantes faibles que le fond géochimique pour la C04.
- Rappel : fond géochimique plomb : 17,7 mg/kg.
⇒ Des teneurs 2,7 fois plus importantes pour la C01, équivalentes au fond géochimique pour la C04.
- Rappel : fond géochimique cuivre = 18,4 mg/kg.
⇒ Des teneurs 2,7 fois plus importantes pour la C01, équivalentes au fond géochimique pour la C04.
- Rappel : fond géochimique cadmium = 0,14 mg/kg.
⇒ Des teneurs 4 fois plus importantes pour la C01, équivalentes au fond géochimique pour la C04.
- Rappel : fond géochimique nickel = 32,7 mg/kg.
⇒ Des teneurs plus faibles que le fond géochimique pour la C01 et la C04.
- Rappel : fond géochimique chrome = 29,3 mg/kg.
⇒ Des teneurs 2,6 fois plus importantes pour la C01, 2 fois plus importantes pour la C04.

Ces teneurs correspondent aux gammes observées dans Dendeviel *et al.* (2020) et Seignemartin (2020) pour des sédiments du 20^{ème} siècle qui ont notamment enregistré les pollutions des années 80. Sur la C01, les teneurs les plus fortes se situent sur le bas de la carotte. Sur la C04, on observe une tendance à l'augmentation sur le haut de la carotte.

Ainsi, au regard de ces caractéristiques, il semblerait que les deux carottes aient enregistré les années 1980-90 et ait commencé à sédimenter antérieurement en ce qui concerne DZM-C04. La DZM-C04 présente une forte hétérogénéité granulométrique ; sa séquence supérieure 0-83 cm témoigne d'une distribution plus fine que la séquence qu'elle surplombe (83-128 cm). Le pic de Σ 7PCBi situé sur l'intervalle 55-62 cm (néanmoins peu robuste car un seul point), en milieu de carotte, pourrait correspondre aux années 1970-80 semble concorder avec l'hypothèse que la rupture granulométrique coïnciderait à la mise en dérivation (83cm), ce qui coïnciderait avec les informations découlant de la planimétrie (terrestrialisation entre 1955 et 1976). Le fait que nous n'observons pas de pic de Cs 137 marqueur de l'année 1986 pourrait ainsi être dû aux séquences non renseignées, sachant que [68-74]

et [79-83] seraient subséquentes à la mise en dérivation si l'hypothèse susmentionnée s'avérait juste ; ou bien encore la conséquence d'un hiatus.

La carotte DZM-C01 est quant à elle située dans un contexte de déposition très différent, fonctionnant probablement par décantation, ce qui expliquerait qu'elle soit si peu triée (homogénéité granulométrique).

4.2. Études des dépôts sédimentaires à Baix-le-Logis-Neuf

4.2.1. Contexte planimétrique et topographique de carottes sédimentaires

Les trois carottes sont localisées de façon à couvrir différentes périodes de sédimentation (Figure 14). La carotte BLN-C01 est localisée en zone atterrie durant la phase post-dérivation (1954-2017) environ 22 m derrière la digue, BLN-C02 en zone atterrie pré-dérivation (1910-1954) environ 70 m derrière la digue. Ces deux carottes sont localisées à une 40^{aine} de mètres l'une de l'autre dans le même casier Girardon. BLN-C03 se situe en zone atterrie en durant la phase d'endiguement (1860-1910). La carotte C1 est associée à une élévation de 78,1 m (soit une élévation relative de + 0,6 m par rapport à la ligne d'eau) contre 80,3 m (soit une élévation relative de + 2,8 m par rapport à la ligne d'eau) ; soit un delta entre les deux sites de 2,2 m par rapport à la ligne d'eau. BLN-C03 est quant à elle associée à une élévation de 86,3 m ; elle est donc bien plus perchée que les deux autres carottes, à + 7m par rapport à la ligne d'eau.

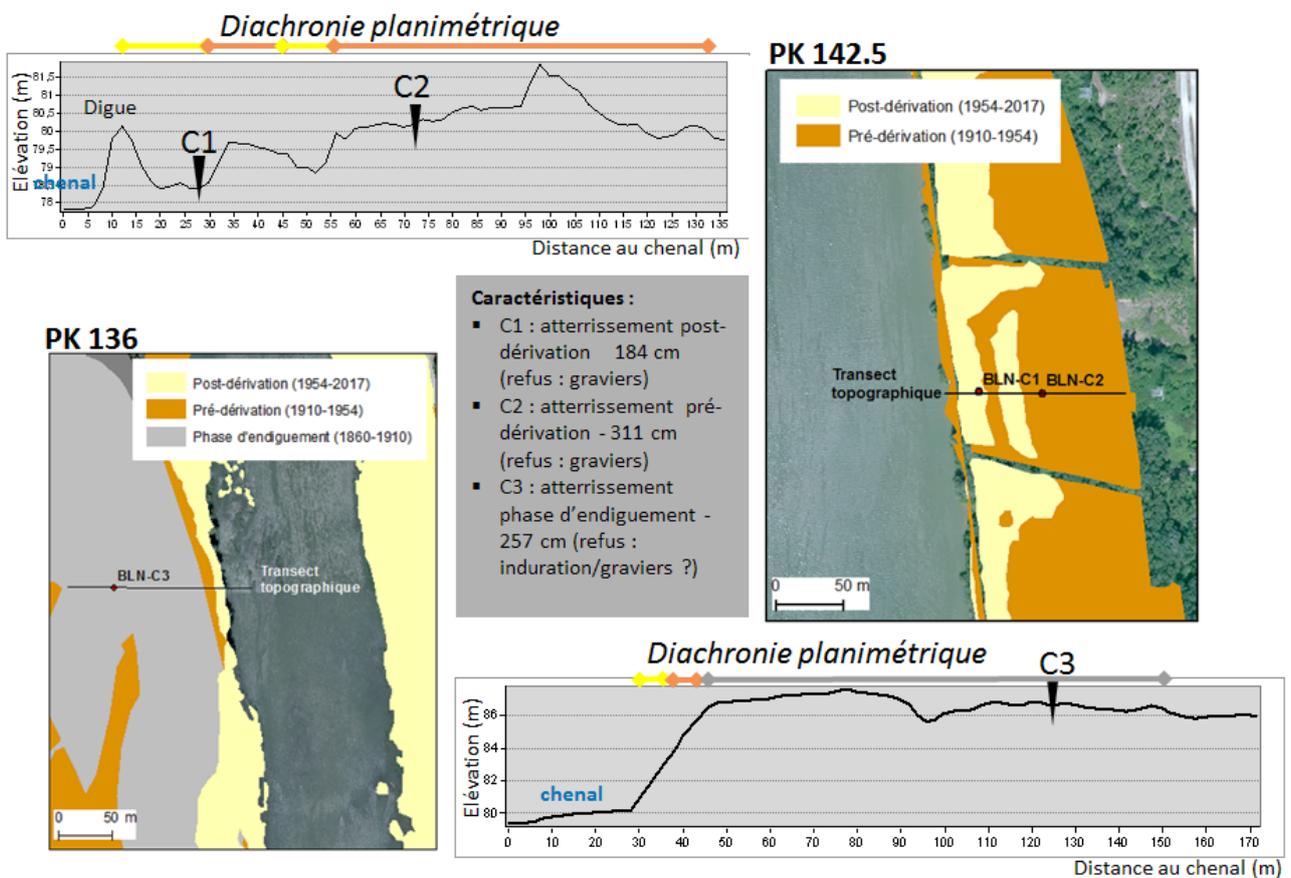


Figure 14 : caractéristiques et contexte géohistorique des carottes pédologiques prélevées à BLN

4.2.2. Images GPR des environnements de dépôt des carottes sédimentaires

Les GPR viennent renseigner l'organisation structurale des dépôts sédimentaires (Figure 15) : il semblerait que l'on puisse distinguer ainsi 3 unités correspondant à la période pré-Girardon (unité 1, en marron), post-Girardon/pré-dérivation (unité 2, en orange) et post-dérivation (unité 3, en jaune). Les logs des carottes sédimentaires prélevées ont été replacées sur les radargrammes et semblent corroborer les interprétations des structures. Les Carottes BLN-C01 et BLN-C02 s'arrêtent au niveau du toit de galet, là où le carottier a buté.

Les motifs des réflecteurs (réflecteurs épais et obliques plus ou moins parallèles ou à motifs sigmoïdaux) correspondent à des inter-stratification de couches sédimentaires à la texture variant entre des limono-sableuses et sablo-limoneuses. Localisées dans un casier Girardon, elles sont situées dans des contextes de dépôt dynamique, en témoigne leur hétérogénéité granulométrique. BLN-C01 est située en bordure de chenal, derrière la digue longitudinale submersible, on y observe un ainsi un pattern régulier avec des réflecteurs à motifs sigmoïdaux « en creux » typique de la zone de dissipation post-endiguement. Ainsi, semblent se superposer des séquences sédimentaires à la texture variée (réflecteurs épais pouvant témoigner de couches plus sableuses).

Le GPR 4 (Figure 16) correspond à une plaine alluviale plus ancienne, atterrie en « pré-Girardon ». Il semblerait que l'on puisse discerner une structuration étagée avec des dépôts alluviaux correspondants à l'ancien lit du Rhône (en dessous des 3 m, ligne rouge) sur lesquels se situe une couche (entre 2 et 3m) avec des dépôts aux textures variées (nombreux réflecteurs épais révélant un interstratification). Par-dessus, une couche de moins de 60 cm, plus « lisse » en termes de radarfaciès est surplombée par un horizon A d'une 40^{aine} de centimètres.

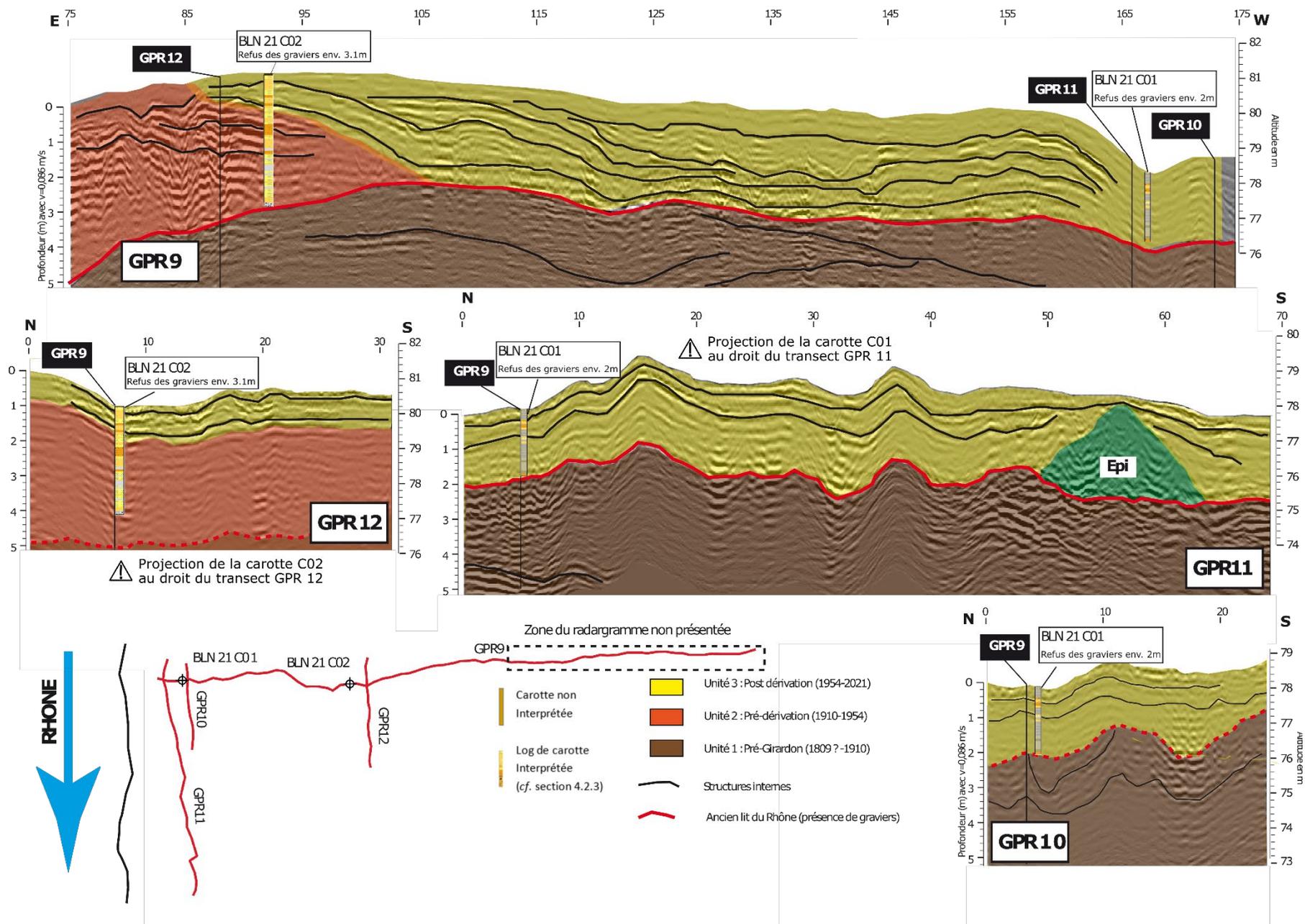


Figure 15 : Section du profil GPR 9, GPR 12 et GPR12 avec insertion des logs des carottes C01 et C02.
 L'agencement des tracés des autres transects GPR est légendé sur le radargramme et représenté sous forme de plan.

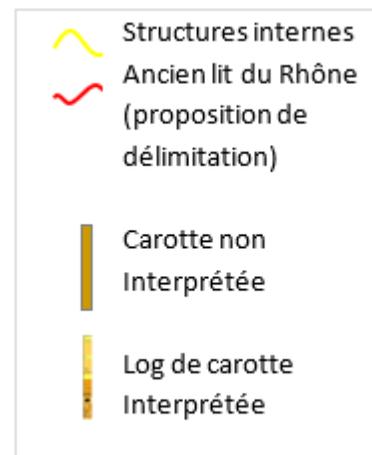
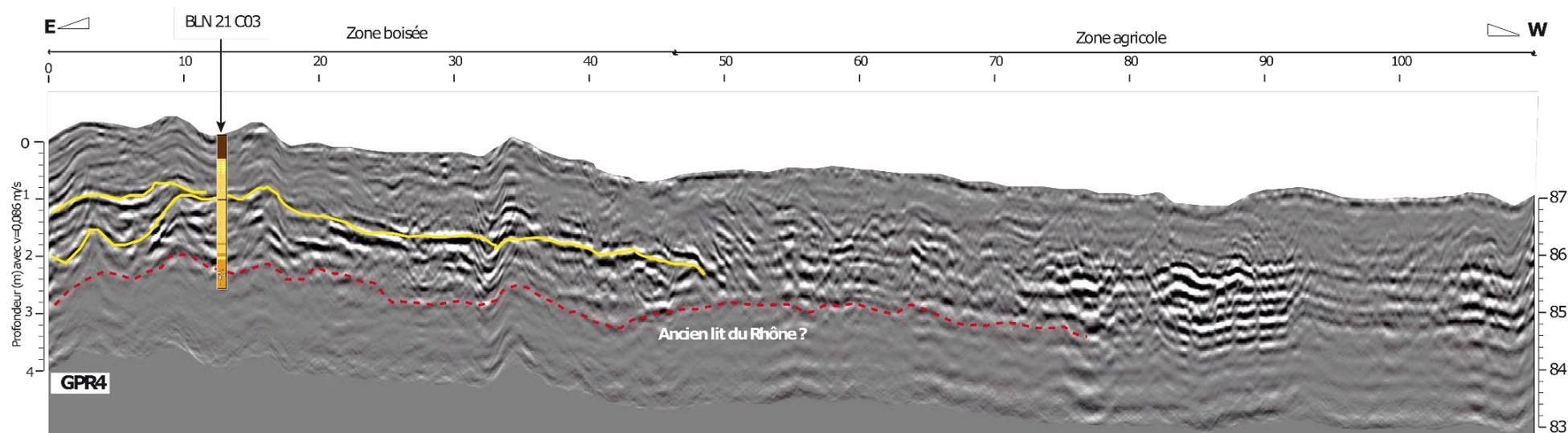


Figure 16 : Profil GPR 4 avec insertion du log de la carotte C03

4.2.3. Description et granulométrie des carottes sédimentaires

Rappelons que ces carottes correspondent à la partie « exploratoire » pour caractériser les états initiaux et l'impact des aménagements. Après ouverture des trois carottes prélevées à BLN, nous avons sélectionné les carottes BLN-C01 et BLN-C02 situées dans un casier Girardon (*cf.* Figure 4) car recoupant la période « pré » et « post » -dérivation, elles étaient les plus à même de mettre en évidence l'impact des aménagements sur les dynamiques sédimentaires (*cf.* Figure 14). La C03, prélevée sur la plaine alluviale « pré-Girardon » (*cf.* Figure 14) a uniquement été décrite car le temps imputable à cette partie exploratoire était limité et rendait possible l'analyse détaillée d'uniquement deux carottes sédimentaires (correspondant déjà à un total de 487 analyses).

- ***Carotte BLN - C01 (Figure 17)***

Des séquences limono-sableuses à sablo-limoneuses se succèdent. La carotte C01 est assez triée. On y observe des séquences sablo-limoneuses entre :

- [0-32] : $D50 = 20,7 \pm 7,1 \mu\text{m}$
- [59-81] : $D50 = 22,2 \pm 8,4 \mu\text{m}$
- [132-176] : $D50 = 30,6 \pm 13,1 \mu\text{m}$

Et limono-sableuses ou sableuses :

- [32-35] : $D50 = 176 \pm 34,2 \mu\text{m}$
- [44-57] : $D50 = 235,8 \pm 39,9 \mu\text{m}$
- [176-182] : $D50 = 317,3 \pm 45,4 \mu\text{m}$.

- ***Carotte BLN - C02 (Figure 17)***

Des séquences limoneuses à sablo-limoneuses là aussi se succèdent. La carotte C02 est assez triée et semble témoigner de deux phases : la première entre 0 et 174 cm alterne entre des séquences marquées limono-sableuses à sablo-limoneuses ($D50 : 121,7 \pm 64,51 \mu\text{m}$) et la seconde, entre 174 et 302 cm fait montre d'une plus grande variabilité centimètre par centimètre mais pas de séquences aussi marquées, avec un $D50$ globalement plus faible de $47,6 \pm 36,4 \mu\text{m}$. Dans la première partie on observe ainsi quelques séquences limono-sableuses : [12-35] $D50 = 181,6 \pm 15,4 \mu\text{m}$, [70-78] $D50 = 201,6 \pm 28,6 \mu\text{m}$ ou encore [115-140] $D50 = 217 \pm 52,2 \mu\text{m}$.

- ***Carotte BLN - C03 (Figure 17)***

La carotte C03 présente un descriptif typique d'une foration plus ancienne avec une couche de 39 cm correspondant à une matrice terreuse riche en MO et litière sur la surface. Les faciès sont limono-sableux à sables plutôt fins entre 39 cm et 198 cm puis limono-sableux à sables moyens entre 198 et 256 cm.

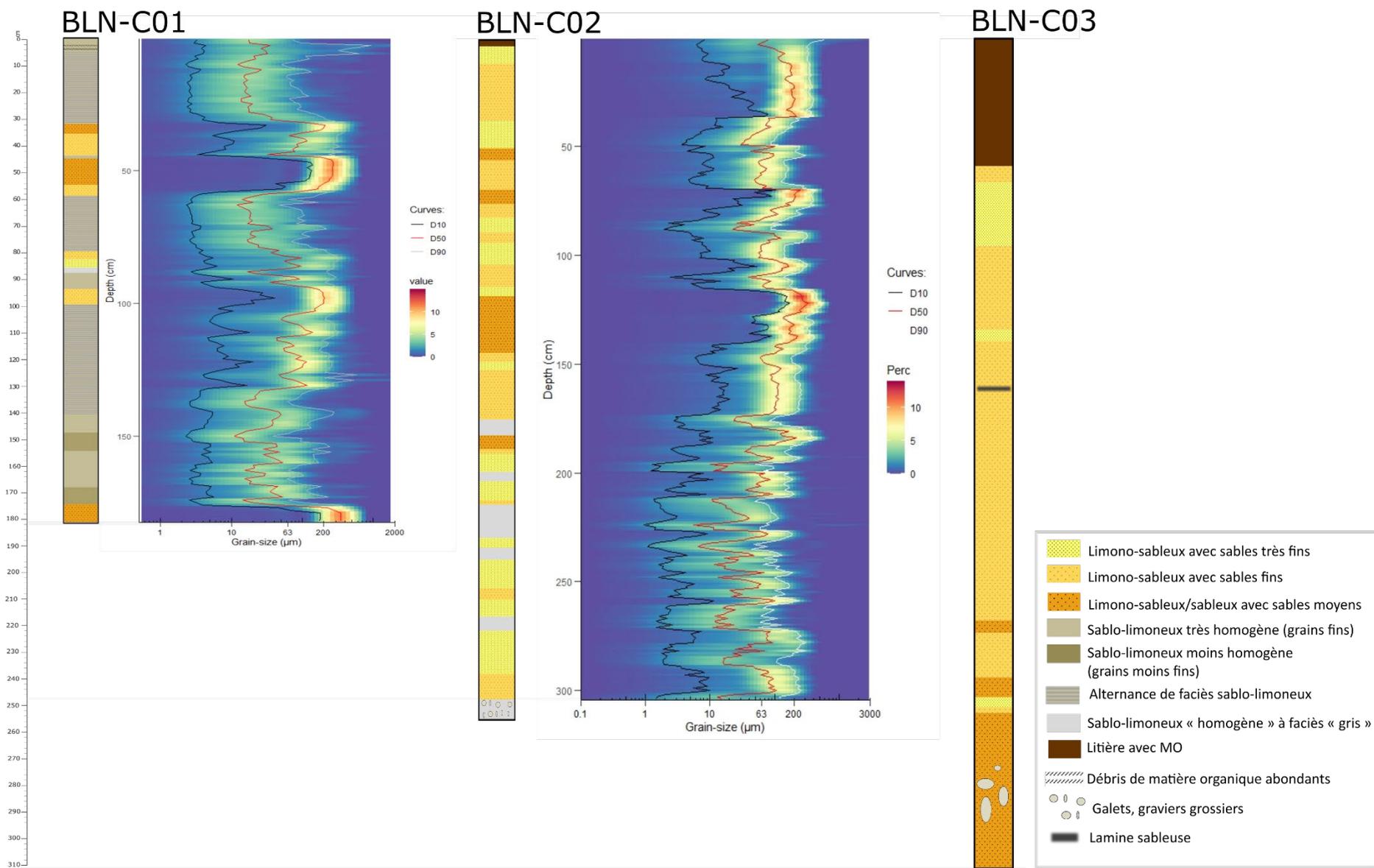


Figure 17 : logs et heatmaps des carottes BLN-C01, BLN-C02 et log de BLN-C03

4.2.4. Bilans et interprétations sur les dépôts sédimentaires à BLN

N.B. A ce niveau, les interprétations qui suivent ne sont pas avancées comme des états de fait, elles proposent des pistes explicatives.

BLN-C01 provient d'un casier Girardon en aval du RCC et a été échantillonnée 22 m derrière la digue sur une zone atterrie post-dérivation (Figure 14), elle présente des séquences marquées et hétérogènes de type limono-sableuses et sablo-limoneuses (Figure 17).

BLN-C02 provient elle aussi du casier mais se situe plus loin du chenal (à environ 70 m) et a connu une terrestrialisation pré-dérivation (Figure 14). Avec ses deux patrons granulométriques différents (Figure 17), il semblerait alors qu'elle ait enregistré une modification des processus sédimentaires. Cette modification pourrait ainsi être imputable aux changements de modalités entre les situations « pré » et « post » dérivation. Or, en se basant sur les observations en plaine alluviale (*cf.* explication BLN-C03 ci-dessous et Vauclin *et al.*, 2020), on s'attendrait à une diminution de la capacité de transport sédimentaire, et de ce fait, à une diminution de la taille des particules pour les archives post-dérivation. Néanmoins, ce n'est pas ce qui est observé : il y a des sédiments plus fins dans le bas de la carotte (174-302 cm) et séquences marquées et hétérogènes de type limono-sableuses et sablo-limoneuses sur le haut de la carotte (0-174 cm). Ainsi, le casier étant fermé par une digue et connaissant une déconnexion chenal (régulation des débits), un fonctionnement par débordement lors des crues pourrait être à l'origine de ce type de pattern : c'est seulement à partir d'un certain débit « débordant » donc ayant une « plus forte » capacité de transport que les flux entrants passeraient par-dessus la digue. De plus, le pattern BLN-C02 « partie supérieure » ressemble beaucoup à BLN C01, carotte provenant d'une zone terrestrialisée post-dérivation, ce qui confirmerait cette interprétation.

BLN-C03 est une carotte située en amont du secteur, dans plaine alluviale « pré-Girardon » (figure 14). Elle correspond à un dépôt plus ancien qui semble avoir enregistré une réduction de la connectivité latérale avec dans un premier temps, la déposition de sédiments limono-sableux à sables moyens à fins venus recouvrir les alluvions grossières, reliquat de la dynamique alluviale pré-aménagements. Il semblerait qu'une tendance à l'affinement des particules puisse témoigner de l'accentuation de la déconnexion hydrologique au cours du 20^{ème} siècle (effet de la dérivation ?). Si tel est le cas, cette carotte présenterait des dépôts « pré » et « post » dérivation. L'interprétation des unités de dépôts sédimentaires (Figure 17) semble corroborer cette hypothèse.

5. CONCLUSIONS

Les analyses des 2 carottes sédimentaires au niveau des annexes fluviales à DZM viennent compléter l'objectif de l'action par l'analyse de 6 carottes (3 à PDR, 1 à PBN, cf. rapport de l'OSR5 avril 2020 Axe A1.a et Axe C5.4). Associées à l'interprétation des acquisitions géophysiques en milieu aquatique et semi-aquatiques, elles permettent de mieux comprendre l'organisation des structures sédimentaires en contextes de déposition variés. Les caractéristiques géochimiques, quant à elles aident à l'interprétation et à la datation relative des dépôts tout en consolidant les fenêtres temporelles connues sur le Rhône. Par exemple, la granulométrie témoigne de modifications des dynamiques sédimentaires : par exemple, la carotte DZM-C04 localisée dans une zone dynamique, en bordure de lône, semble témoigner d'une granulométrie qui diminue après la mise en dérivation. Aussi, La présence de PCBs et l'hypothèse temporelle des années 70-80 semble être concordante puisque se situant quelques dizaines de centimètres après le décrochage granulométrique que pourrait avoir provoqué la mise en dérivation (en 1952). La carotte aquatique DZM-C01 qui semble avoir présenté un mode de déposition par décantation présente un pic en Césium 137 (possiblement l'évènement de Tchernobyl) concordant avec les fenêtres (relativement plus large) des PCBs et (relativement plus large et un peu antérieure) des ETM. Enfin, combiné au GPR, ces carottes permettent de définir des unités au sein des dépôts sédimentaires : unités « pré-Girardon », « pré-dérivation » et « post-dérivation ». Concernant les retardateurs de flammes bromés (Σ 8PBDE, Σ 3PBB), leur très faible présence est concordante avec leur utilisation plus tardive par rapport à la période de sédimentation de ces dépôts (années 2000). En outre, l'application exploratoire du GPR en milieu aquatique s'est révélée convaincante en regard de la carotte aquatique DZM-C01. Celle-ci témoigne de séquences sédimentaires pertinentes par rapport aux réflecteurs observés sur le radargramme.

L'analyse exploratoire de deux carottes sédimentaires et d'images GPR et de la planimétrie dans le cadre de la campagne prévue à BLN procure des données utiles pour caractériser l'impact des aménagements sur les modifications des dynamiques sédimentaires. A noter que la carotte BLN-C02 étant dans un casier Girardon ayant connu une sédimentation « pré » et « post » -dérivation, on y observe un décrochage granulométrique (BLN C02) contraire à ce que l'on constate en plaine alluviale (cas de BLN-C03 et Vauclin *et al.*, 2020) avec des sédiments qui seraient plus grossiers en post-dérivation (partie haute de la carotte) et plus fins avant celle-ci (partie basse de la carotte). Ceci pourrait s'expliquer par un fonctionnement par débordement spécifique aux casiers Girardon : les flux entrants ne peuvent avoir lieu que pour des débits assez forts pour transporter des sédiments par-dessus la digue, jouant ainsi sur la capacité de transport et laissant entrer des sédiments légèrement plus grossiers (sableux). Néanmoins, à ce niveau, ces pistes interprétatives doivent être approfondies par le biais d'analyses complémentaires.

6. ANNEXES

Secteur	Carotte	Profondeur (cm)	MO (%)	Carbonates (%)	Cs 137 (Bq/kg)	Pb 210 (Bq/kg)	Σ8PBDE (µg/kg)	Σ3PBB (µg/kg)	Σ7PCB (µg/kg)
DONZ	C1	0-5	4,7159	13,9949	3,1352	38,7826	1,11465	0,00299	16,0314
DONZ	C1	5-10	4,6866	14,1331	3,6678	48,4573	0,46824	0,00473	8,0846
DONZ	C1	10-15	6,3562	12,8097	6,2889	76,1067	0,45926	0,01032	15,4956
DONZ	C1	15-20	6,8053	12,5392	5,7274	78,4992	0,25262	0,00259	16,8258
DONZ	C1	20-25	6,2955	12,6556	5,6149	81,7269	0,35273	0,00843	15,1782
DONZ	C1	25-29	6,0639	12,4023	5,6509	48,2540	0,15377	0,00402	13,5583
DONZ	C1	29-34	7,9156	10,1416	9,4099	91,4797	0,07641	0,00436	24,0084
DONZ	C1	34-40	9,7811	9,9795	10,3913	109,3570	0,27448	0,00430	25,8837
DONZ	C1	40-46	5,7923	11,7813	7,5286	58,3104	0,09808	0,02651	38,5093
DONZ	C1	46-50	3,9190	12,2862	3,2097	18,0286	0,20791	0,01052	96,6179
DONZ	C1	50-53	4,7174	12,3156	5,4026	22,5361	0,24725	0,01930	71,9261
DONZ	C1	53-56	6,0140	12,2006	11,8447	60,7847	0,41688	0,01511	78,4647
DONZ	C1	56-60	5,4308	12,4153	13,1479	24,5311	0,80102	0,03957	165,2347
DONZ	C1	60-67	6,3451	11,7924	49,4958	51,1422	0,96308	0,03964	130,4737
DONZ	C1	67-73	5,7029	12,3696	120,6751	39,9305	0,73852	0,03741	244,9365
DONZ	C1	73-80	5,3430	11,6029	5,8642	17,7662	0,83699	0,03647	191,0851
DONZ	C1	80-86	4,1986	12,5735	5,3652	36,6930	0,23202	0,04300	195,3171
DONZ	C1	86-89	5,2749	12,1318	12,5309	NA	0,01639	0,00759	350,1819
DONZ	C1	89-93	3,9843	13,2479	12,0543	17,2246	0,02292	0,00828	138,3174
DONZ	C1	93-98	3,4194	11,7416	5,3017	NA	0,02101	0,01465	210,0332
DONZ	C4	0-7	3,8933	13,1832	1,8020	58,4024	0,05905	0,03116	44,0589
DONZ	C4	7-10	8,5386	11,8033	2,9264	78,8039	0,03821	0,01238	11,9217
DONZ	C4	10-15	3,5023	10,5108	1,3958	39,0259	0,04853	0,01415	88,8928
DONZ	C4	15-20	4,5224	10,1906	1,7349	37,7926	0,03011	0,01126	17,8308
DONZ	C4	20-25	2,7782	10,2876	1,4908	40,6591	0,10702	0,01005	27,0475
DONZ	C4	25-30	2,2992	10,5735	1,3655	24,0898	0,19226	0,01737	28,6806
DONZ	C4	30-35	1,6188	8,1617	1,2252	27,4427	0,22781	0,01228	25,3527
DONZ	C4	35-40	1,8590	11,7352	1,3973	37,7113	0,11773	0,01589	16,6788
DONZ	C4	40-45	1,7741	12,5304	1,1459	36,8010	0,08997	0,00921	18,2810
DONZ	C4	45-50	6,6812	13,8325	5,4252	99,2948	0,24682	0,01101	31,4829
DONZ	C4	50-55	5,2618	12,6828	3,7475	58,5497	0,24256	0,01064	37,9104
DONZ	C4	55-62	0,3452	13,8267	4,1170	53,6754	0,62199	0,00904	204,8144
DONZ	C4	62-68	4,2414	11,0570	3,1447	52,8674	0,31759	0,01126	127,8306
DONZ	C4	68-74	3,0062	10,2884	NA	NA	0,23479	0,02372	53,8170
DONZ	C4	74-79	6,9013	18,2724	3,4643	56,2672	0,51955	0,01191	50,5458
DONZ	C4	79-83	1,1547	10,3195	NA	NA	0,45900	0,01044	104,5756
DONZ	C4	83-87	3,5175	9,4016	1,4657	24,3518	0,02957	0,00648	25,3958
DONZ	C4	87-92	1,2627	9,4906	NA	NA	0,04539	0,00652	17,6649
DONZ	C4	92-96	1,8085	8,8268	1,8595	23,0194	0,10853	0,00649	24,3864
DONZ	C4	96-100	2,6401	7,5168	NA	NA	0,05653	0,00899	24,9765
DONZ	C4	100-107	2,7767	9,0043	2,3535	24,3267	0,01942	0,00599	35,8921
DONZ	C4	107-111	2,0248	7,8078	10,4567	34,0903	0,07515	0,00840	33,2663
DONZ	C4	111-119	1,3836	8,0361	2,8832	26,0033	0,01913	0,00722	25,1541
DONZ	C4	119-124	5,7849	11,1933	11,5388	46,9542	0,06228	0,01211	89,5570
DONZ	C4	124-128	1,3944	8,8178	0,7551	24,3665	0,04799	0,00866	21,1446

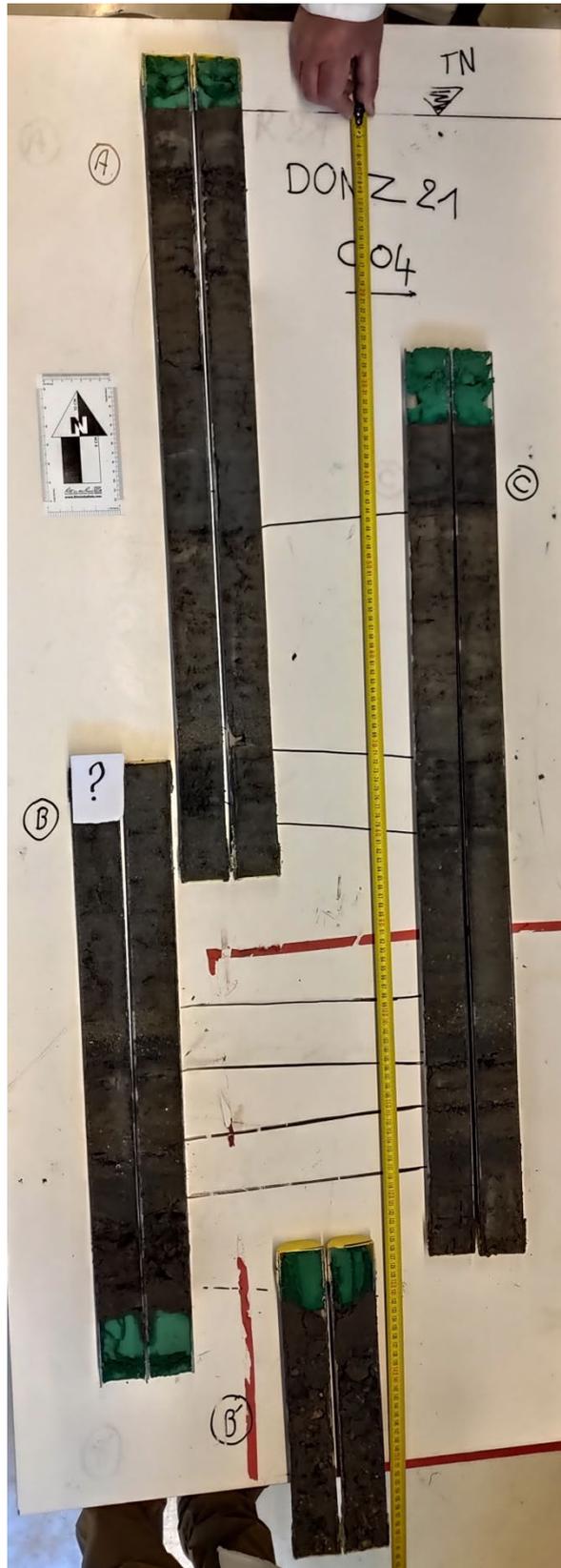
Annexe 1 : tableau récapitulatif des données MO, carbonates, Cs137, Pb210, Σ8PBDE, Σ3PBB, Σ7PCBi des carottes de DZM

Secteur	Carotte	Profondeur (cm)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)
DONZ	C1	0-5	140,4143	25,4335	71,5559	31,7678	0,2669	33,0443
DONZ	C1	5-10	150,0489	26,5152	67,7419	32,3069	0,2637	34,9951
DONZ	C1	10-15	147,0734	25,5952	52,0089	28,6210	0,3512	34,2510
DONZ	C1	15-20	165,0000	24,8700	71,6000	27,4250	0,3768	36,1750
DONZ	C1	20-25	153,9216	27,6225	63,9706	31,9608	0,4145	35,5882
DONZ	C1	25-29	147,7612	25,7960	64,5771	29,2786	0,4863	43,0597
DONZ	C1	29-34	194,7446	25,2210	71,1444	29,7642	0,4295	48,2318
DONZ	C1	34-40	150,1451	24,3714	63,7814	25,9671	0,4836	50,6770
DONZ	C1	40-46	165,4412	22,0907	54,4853	23,2108	0,4368	35,7843
DONZ	C1	46-50	119,1406	24,1406	58,3496	27,4170	0,3330	34,0576
DONZ	C1	50-53	164,8219	29,5236	66,2175	29,7883	0,4812	38,8595
DONZ	C1	53-56	166,7480	33,3008	67,3096	32,5928	0,5784	52,8809
DONZ	C1	56-60	210,9223	35,7524	70,2670	36,6019	0,6388	58,7136
DONZ	C1	60-67	179,2271	34,6377	82,3188	29,7343	1,0671	42,8261
DONZ	C1	67-73	155,1220	35,1220	59,6585	26,2439	1,0034	42,1951
DONZ	C1	73-80	172,1629	28,2493	74,5150	29,0010	0,9823	62,8031
DONZ	C1	80-86	150,2488	25,9950	65,5224	27,4627	1,0318	70,6219
DONZ	C1	86-89	200,8483	34,1567	88,9471	33,6327	0,6779	80,7136
DONZ	C1	89-93	205,6256	36,7847	81,0863	29,8497	1,0594	74,1271
DONZ	C1	93-98	198,3776	26,4749	73,9430	26,0570	0,5093	42,5025
DONZ	C4	0-7	163,2212	17,3101	39,9519	25,1923	0,2137	20,4207
DONZ	C4	7-10	106,5411	15,0446	36,9177	22,2299	0,1913	13,3548
DONZ	C4	10-15	157,7264	10,8612	41,2648	20,7579	0,1538	15,6964
DONZ	C4	15-20	99,4094	12,9552	38,9764	21,1024	0,1432	13,2185
DONZ	C4	20-25	110,8930	10,9028	40,8734	23,8886	0,1644	15,1865
DONZ	C4	25-30	112,7988	13,5234	42,6793	22,2361	0,1977	24,6638
DONZ	C4	30-35	NA	NA	NA	NA	NA	NA
DONZ	C4	35-40	147,2772	11,2005	40,1485	22,6634	0,1564	11,7228
DONZ	C4	40-45	207,2072	16,1512	36,0611	22,3448	0,1542	16,2788
DONZ	C4	45-50	118,9055	19,7313	44,2040	19,3781	0,2246	27,7114
DONZ	C4	50-55	120,2253	14,5911	37,8306	18,7977	0,1871	21,1606
DONZ	C4	55-62	111,0568	16,7637	41,0959	20,2593	0,2192	18,2510
DONZ	C4	62-68	183,3333	15,5121	35,9903	20,5145	0,2164	23,3696
DONZ	C4	68-74	85,6367	9,2349	26,6041	14,0819	0,1207	12,1570
DONZ	C4	74-79	151,1454	13,0254	31,3496	18,0752	0,2089	19,9228
DONZ	C4	79-83	102,4510	11,6789	28,2353	19,1618	0,1775	17,5000
DONZ	C4	83-87	75,2715	5,5059	24,0326	13,2996	0,1212	14,1708
DONZ	C4	87-92	88,5417	5,1240	23,8715	13,2813	0,1220	16,7138
DONZ	C4	92-96	87,2036	5,6423	22,1220	12,2357	0,2651	14,9778
DONZ	C4	96-100	108,5329	4,7280	19,9052	10,9032	0,1327	10,9556
DONZ	C4	100-107	140,7023	6,4219	24,1073	12,1662	0,1367	17,4258
DONZ	C4	107-111	157,7410	5,7035	21,1563	11,4508	0,1463	13,1232
DONZ	C4	111-119	85,4947	8,0139	21,8084	12,7113	0,1424	14,6758
DONZ	C4	119-124	171,0526	18,8332	58,4161	19,8535	0,3178	23,4955
DONZ	C4	124-128	69,4990	6,4587	26,5226	11,8492	0,1567	12,7701

Annexe 2 : tableau récapitulatif des données Zn, CU, Cr, Ni, Cd, Pb des carottes de DZM



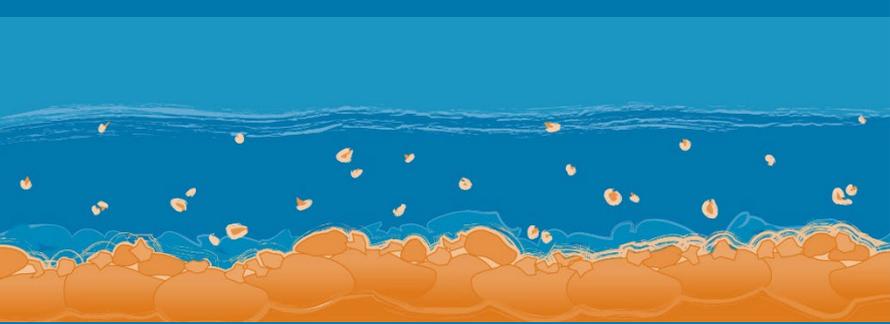
Annexe 3 : photographie des séquences constituant la Master Core C1



Annexe 4 : photographie des séquences constituant la Master Core C4

7. Références

- Beres, M., Haeni, F.P., 1991. Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologie Studies. *Groundwater* 29, 375–386. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1991.tb00528.x>
- Beres, M., Huggenberger, P., Green, A.G., Horstmeyer, H., 1999. Using two- and three-dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture. *Sedimentary Geology* 129, 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00053-6)
- Bethemont, J., 1972. Le thème de l'eau dans la vallée du Rhône. Méditerranée, deuxième série, tome 10.
- Davis, J.L., Annan, A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys Prospect* 37, 531–551. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- Džubáková, K., Piégay, H., Riquier, J., Trizna, M., 2015. Multi-scale assessment of overflow-driven lateral connectivity in floodplain and backwater channels using LiDAR imagery: Floodplain connectivity using LiDAR imagery. *Hydrol. Process.* 29, 2315–2330. <https://doi.org/10.1002/hyp.10361>
- Gawthorpe, R.L., Collier, R.E.L., Alexander, J., Bridge, J.S., Leeder, M.R., 1993. Ground penetrating radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies. Geological Society, London, Special Publications 73, 421–432. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.073.01.24>
- Gaydou, P., 2013. Schéma directeur de ré-activation de la dynamique alluviale des marges du Rhône (Rapport de Synthèse). Observatoire des Sédiments du Rhône.
- Piégay H., Seignemartin G., Tena A., Rappelle B., Barra A., Berger J.-F., Roux G., Michal T., Vazquez D., Winiarski T., 2018. RAPPORT N°2 - Stocks sédimentaires des marges actives – Approche comparée inter-sites DZM – PDR – PBN. Action II.2, II.3 et II.4. Sédimentation et morphologie du lit majeur. OSR4 (2015-2017).
- Regli, C., Huggenberger, P., Rauber, M., 2002. Interpretation of drill core and georadar data of coarse gravel deposits. *Journal of Hydrology* 255, 234–252. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00531-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00531-5)
- Seignemartin, G., Piégay, H., Belletti, B., Ghaffarian Roohparvar, H., Winiarski, T., 2021. Évolution morphologique des marges alluviales (Axe A.1) et évaluation des stocks de sédiments grossiers (Rapport final OSR5 Action A2.1) à Baix-Le-Logis-Neuf et Beaucaire. Observatoire des Sédiments du Rhône. UMR 5600 EVS CNRS ; LEHNA - UMR C NRS 5023 ; IRSTEA.
- Seignemartin, G., Piégay, H., Winiarski, T., Vauclin, S., Tena, A., 2019. Evolution morphologique et remplissage sédimentaire des marges aménagées du Rhône – Approche multi-scalaire (Rapport d'avancement – Action A1 No. OSR5 2018-2020). Observatoire des Sédiments du Rhône.
- Seignemartin, G., Évolution contemporaine des « casiers Girardon » du Rhône : approche géohistorique à partir d'indicateurs morpho-sédimentaires, géochimiques et phytoécologiques. Université Lyon 2. 363p.



Observatoire des Sédiments du Rhône



Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact :

bertrand.morandi@graie.org