

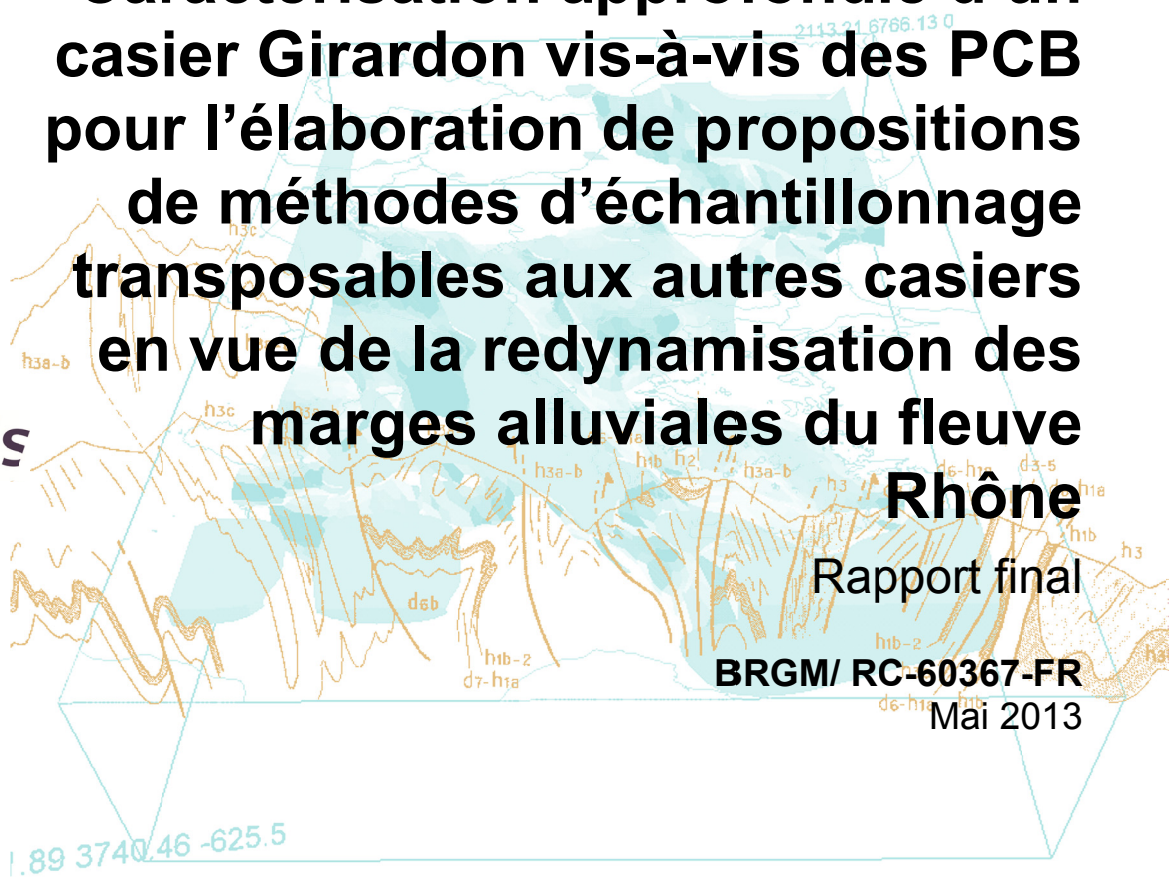
Document public



# Caractérisation approfondie d'un casier Girardon vis-à-vis des PCB pour l'élaboration de propositions de méthodes d'échantillonnage transposables aux autres casiers en vue de la redynamisation des marges alluviales du fleuve Rhône

Rhône Alpes Région

Rapport final  
BRGM/ RC-60367-FR  
Mai 2013



PREFECTURE DE LA REGION RHÔNE-ALPES  
PREFECTURE DU RHÔNE





# Caractérisation approfondie d'un casier Girardon vis-à-vis des PCB pour l'élaboration de propositions de méthodes d'échantillonnage transposables aux autres casiers en vue de la redynamisation des marges alluviales du fleuve Rhône

Rapport final

BRGM/ RC-60367-FR

Mai 2013

**B. Clozel-Leloup, G. Roux (ENTPE), C. Moiroud (CNR)**

Avec la collaboration de

**B. Bourgine, C. Mora (CNR), F. Mathieu**

**Vérificateur :**

Nom : MERLY Corinne

Date :

Signature :

**Approbateur :**

Nom : SIMEON Yves

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**

**Mots-clés :**

Fleuve Rhône, Casier Girardon, sédiment, métaux, PCB, échantillonnage, Région Rhône Alpes

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Clozel-Leloup B., Roux G., Moiroud C.** (2013) – Caractérisation casier Girardon vis-à-vis des PCB - Elaboration de propositions de méthodes d'échantillonnage transposables aux autres casiers en vue de la redynamisation des marges alluviales du fleuve Rhône. Rapport I. BRGM/RC-60367-FR, 154 p., 77 ill., 21 ann. dont une avec 1 CD.

## Synthèse

Dans le cadre du Plan Rhône et, plus généralement du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux, l'atteinte du bon état et/ou l'amélioration du milieu sont pour partie conditionnées par la mise en place de travaux de réhabilitation des marges alluviales.

Ces marges sont la conséquence des travaux fluviaux menés au XIX<sup>ème</sup> et au début du XX<sup>ème</sup> siècle pour améliorer la navigation sur le Rhône (aménagement dit Girardon) et représentent un linéaire important puisqu'elles se développent sur l'ensemble du linéaire du Rhône. Ces aménagements ont fixé et réduit la bande active du fleuve et ont entraîné exhaussement des berges (ainsi entre Lyon et Arles, de 100 000 à 1 000 000 m<sup>3</sup> de sédiments par km seraient stockés). Cet exhaussement modifie l'écosystème alluvial en limitant les échanges avec la nappe alluviale plus profonde, conduit à la banalisation des milieux par la disparition des annexes fluviales (lônes, bras secondaires), entraîne le vieillissement prématuré des formations végétales et par ailleurs relève les niveaux d'eau en période de crue augmentant ainsi le risque d'inondation. Ainsi, la réactivation de la dynamique fluviale et l'amélioration de l'expansion des crues passent par le démantèlement de ces aménagements.

La mise en évidence quasi systématique de PCB lors des campagnes préliminaires de reconnaissance sur l'emprise des aménagements Girardon, à des teneurs considérées comme élevées en regard des recommandations du bassin relatives aux travaux mettant en jeu des sédiments contaminés, pose la question de la faisabilité de cette redynamisation fluviale. En effet, en remobilisant ces formations sédimentaires anciennes, ce sont des concentrations et des masses non connues en PCB qui pourraient être remises en suspension au risque d'aggraver la contamination de la chaîne trophique et le stock en Méditerranée. C'est dans ce contexte que les partenaires du Plan Rhône ont souhaité disposer d'éléments techniques fiables en vue de comprendre l'état physico-chimique des casiers Girardon afin d'apprécier la quantité de PCB susceptible d'être remobilisée au cours de leur réactivation et disposer ainsi d'éléments quantifiés qui contribueront au processus de prise de décision des services instructeurs en particulier s'il s'avérait que le niveau de contamination des casiers est supérieur à celui des recommandations.

Les partenaires du Plan Rhône ont décidé de mettre en œuvre une étude de caractérisation approfondie d'un casier Girardon vis-à-vis des PCB pour l'élaboration de propositions de méthodes d'échantillonnage transposables aux autres casiers en vue de la redynamisation des marges alluviales. Il s'avérait en effet nécessaire de lancer un programme de caractérisation ambitieux car les connaissances sur ces zones d'accumulation sédimentaire étaient peu nombreuses ou non renseignées vis-à-vis des PCB.

Le choix du site d'étude a porté sur un casier Girardon de l'île de la Platière, au lieu-dit de l'île des graviers. La zone de l'épi étudiée devrait être une des premières remobilisées dans le cadre de la réhabilitation écologique du Vieux Rhône (mise en œuvre du barrage de St Pierre de Bœuf en 1978) dans la zone de Péage-du-Roussillon. Sa situation, à l'extrados du fleuve, en fait un site particulièrement intéressant pour évaluer les capacités de remobilisation naturelle. Par ailleurs, l'absence d'enjeu aux abords des casiers permettra un démantèlement conséquent des structures ce qui rend ce site représentatif du fort degré de remobilisation attendu sur ce type de marges alluviales.

Ainsi, ce casier a fait l'objet dans un premier temps d'une importante campagne de prélèvements. En effet, sans élément de connaissance sur la distribution des PCB au sein des casiers, un échantillonnage systématique a été mené sous la forme d'une grille à 4x7 points de

prélèvements espacés de 15 m pour couvrir les 8 400 m<sup>2</sup> du casier. Des carottages ont été réalisés pour prélever les sédiments accumulés sur toute leur épaisseur (entre 1,5 et 3,7 m) ; ces carottes ont fait l'objet d'une description sédimentologique et ont ensuite été découpées en échantillons de 30 cm d'épaisseur. Un total de 216 échantillons a fait l'objet d'un ensemble d'analyses chimiques et granulométriques pour un volume de sédiment estimé à 20 000 m<sup>3</sup>.

La concentration moyenne en 7PCBi est de 73 µg/kg MS et permet d'estimer qu'une masse de l'ordre de 2kg de 7PCBi serait remise au Rhône à l'issue de la remobilisation complète de ce casier. Les concentrations individuelles présentent une grande variabilité (<limite de quantification de 7µg/kg à 1226µg/kg MS de 7PCBi). Cette variabilité des concentrations n'est pas aléatoire au sein du casier, elle est la représentation d'une variation structurée, les concentrations les plus élevées sont situées dans la partie proche de l'ancienne berge avant sédimentation massive.

Une caractérisation très poussée menée sur deux carottes dites de référence, situées dans des zones de concentrations contrastées et qui ont pu être datées, permettent de conforter que les concentrations les plus élevées sont relatives aux sédiments les plus anciens accumulés dans le casier (années 1970) et il s'avère possible d'établir une chronique de la pollution en PCB et métaux du début des années 1970 à la fin des années 1990. Cette chronique constitue, à notre connaissance, l'archive la plus ancienne des concentrations en PCB circulant dans les années 1970 du Rhône à l'aval de Lyon.

La structuration de la pollution en PCB au sein du casier est liée à la période d'accumulation des sédiments. Ainsi bien que cette chronique mette en évidence la décroissance générale des concentrations en PCB à partir du milieu des années 1970, pour ce tronçon hydrographique du Rhône, les sédiments accumulés avant la fin des années 1980 présenteront très probablement des concentrations en 7PCBi supérieures à 60µg/kg MS (concentrations qui conduisent à recommander de ne pas remettre les sédiments au fleuve).

Cette étude confirme également que, même si l'affinité des PCB pour les supports fins et organiques est depuis longtemps démontrée, de nombreux autres facteurs interviennent et masquent cette affinité dans un milieu sédimentaire aussi dynamique et ouvert que celui du casier dont le remplissage est lié exclusivement à des épisodes de crues. Ainsi, il n'a pas été possible d'établir de lien entre les principales caractéristiques du sédiment (granulométrie, teneur en matière organique) et les concentrations en PCB. Ce fait a une implication directe sur la traitabilité des sédiments de ce casier ; ils ne seront pas aptes à être traités par des méthodes physiques simples telles que le lavage des sables par hydrocyclonage. Des phénomènes d'agrégation postérieurs au dépôt compliquent également le potentiel de traitabilité de ces sédiments.

D'autres étapes de l'étude ont contribué à améliorer la connaissance globale de l'accumulation sédimentaire et des polluants. L'étude géophysique a montré (et cela a été conforté par l'analyse sédimentologique fine) que les principaux reliefs topographiques sont en relation avec une structuration interne des sédiments et qu'il ne s'agit pas d'un remodelage postérieur. Dans ce casier, outre le ressaut topographique liée à l'ancienne berge, un autre ressaut est attribué à la mise en œuvre du barrage de Saint-Pierre de Bœuf en 1978 qui va entraîner une baisse significative du taux d'accumulation des sédiments (division d'un facteur deux environ). Du fait, entre autre, de ces discontinuités de dépôt, l'étude géostatistique qui a été tentée s'est révélée peu concluante malgré le nombre élevé de données à exploiter. Elle permet de montrer une relative continuité verticale des concentrations permettant d'envisager le prélèvement d'un nombre plus faible d'échantillons mais peine à établir les lois mathématiques qui pourraient expliquer les variations de concentrations latérales.

L'origine de la répartition de la pollution en PCB au sein du casier, qui est la conjonction entre l'âge de dépôt des sédiments et l'historique de circulation des polluants dans le Rhône, permet avec une certaine assurance de proposer un protocole d'échantillonnage adapté plus largement à ce type de marges alluviales.

Ce protocole d'échantillonnage qui vise à permettre de déterminer au mieux la masse totale de PCB qui pourrait être remise au Rhône lors de la remobilisation globale d'un ensemble de casiers, est basé dans un premier temps sur une étude historique et documentaire. Cette dernière permet de mieux appréhender la période de la mise en place du massif sédimentaire à caractériser grâce principalement à l'étude diachronique fine des traits de berges. La connaissance de la chronique de la pollution au cours du temps permet d'envisager la susceptibilité du piège à sédiment à être aussi un piège à polluants, permettant de définir un pas d'échantillonnage adapté pour évaluer les zones les plus concentrées (sans les sur-représenter). Le protocole proposé nécessite un nombre d'échantillons réaliste compte tenu de la variabilité potentielle des teneurs. Elaboré en deux temps, une trentaine d'échantillons serait proposée pour caractériser un ensemble de casiers. En fonction des résultats obtenus (dépassement ou non de la valeur guide des recommandations), l'échantillonnage serait poursuivi à l'échelle individuelle du casier.

Une similarité de comportement historique entre les PCB et certains métaux (Cu, Zn, Pb) permet d'envisager l'utilisation d'un appareil de terrain (spectromètre de fluorescence X portatif) qui mesure ces derniers pour orienter la campagne d'échantillonnage dans les zones de relativement forte concentration (au-delà de 60µg/kg de PCB).

Ce protocole a été présenté et soumis à validation du Groupe de travail Scientifique et Technique « PCB » et sera intégré dans la partie relative à l'échantillonnage dans la version V2 des recommandations pour la manipulation des sédiments contaminés.



## Sommaire

<b>1. Présentation de l'étude.....</b>	<b>15</b>
1.1. PRESENTATION DU PROJET .....	15
1.2. MONTAGE DE L'ETUDE.....	16
1.2.1. Organisation .....	16
1.2.2. Volet financier.....	17
<b>2. Matériels et méthodes.....</b>	<b>19</b>
2.1. CHOIX DU SITE D'ETUDE : UN CASIER GIRARDON DE L'ILE DES GRAVIERS (ILE DE LA PLATIERE) .....	19
2.1.1. Les Epis et casiers Girardon : des structures d'aménagement spécifiques, représentatifs de l'aménagement du Rhône à l'aval de Lyon.....	19
2.1.2. Choix du site de l'île des Gravieres .....	21
2.1.3. Choix du casier.....	23
2.1.4. Interface avec le schéma directeur de remobilisation des marges alluviales 24	
2.2. ETUDE GEOMORPHOLOGIQUE DU CASIER .....	24
2.2.1. Méthode de suivi de l'évolution des berges.....	24
2.2.2. Acquisition des données hydrologiques et hydrauliques.....	25
2.2.3. Expertise hydrodynamique .....	26
2.2.4. Evaluation du volume de sédiment.....	26
2.2.5. Recherche des structures souterraines par étude géophysique .....	26
2.3. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE AU SEIN DU CASIER ET PRELEVEMENT 27	
2.3.1. Mise en place de la grille d'échantillonnage .....	28
2.3.2. Les méthodes de carottage et la campagne de prélèvement.....	30
2.4. ANALYSE DES POLLUANTS ET DES PARAMETRES PERMETTANT DE COMPRENDRE LEUR PRESENCE DANS LE CASIER.....	33
2.4.1. Préparation des échantillons .....	33
2.4.2. Le programme analytique.....	34
2.5. MESURES DE TERRAIN .....	35
<b>3. Elements de connaissance relatifs à la zone d'accumulation .....</b>	<b>37</b>
3.1. HISTORIQUE DE LA CONSTRUCTION DES STRUCTURES DES DIGUES ET EPIS ET EVOLUTIONS CONSTATEES .....	37
3.2. ETUDE DIACHRONIQUE.....	38
3.2.1. Analyse spatiale .....	38

3.2.2. Topographie .....	43
3.2.3. Conclusion et éléments de connaissance relatifs à la zone d'accumulation	47
<b>4. Etude géophysique du casier .....</b>	<b>49</b>
4.1. LE PRINCIPE DE L'ETUDE GEOPHYSIQUE MENEES .....	49
4.2. LA CAMPAGNE DE TERRAIN .....	50
4.2.1. Equipement .....	50
4.2.2. Travaux réalisés .....	50
4.2.3. Positions des profils .....	52
4.3. RESULTATS DE LA CAMPAGNE GEOPHYSIQUE .....	52
4.3.1. Les pseudos-sections .....	52
4.3.2. La digue longitudinale .....	53
4.3.3. Les anciennes berges .....	53
4.3.4. Localisation du « substratum » (toit des graviers) à l'intérieur du casier .	60
4.4. CONCLUSIONS DE L'ETUDE GEOPHYSIQUE .....	61
<b>5. Exploitation des analyses chimiques des sédiments, données non spatialisées</b>	<b>63</b>
5.1. DESCRIPTION SEDIMENTOLOGIQUE PREALABLE .....	63
5.1.1. Méthodes .....	63
5.1.2. Description sédimentologique des 30 carottages courts .....	64
5.2. DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES DES 216 ECHANTILLONS .....	66
5.2.1. Matériels et méthodes .....	66
5.2.2. Résultats .....	67
5.3. CHIMIE, MINERALOGIE DES 216 ECHANTILLONS .....	71
5.3.1. Minéralogie des sédiments .....	72
5.3.2. Analyse en composantes principales .....	72
5.4. COMPARAISON DES STATISTIQUES RELATIVES AUX METAUX, PCB, GRANULOMETRIES DU CASIER PAR RAPPORT A L'ENSEMBLE DU RCC	76
5.5. RESUME SYNTHETIQUE DES RESULTATS .....	78
<b>6. Données spatialisées et étude géostatistique .....</b>	<b>81</b>
6.1. REPARTITION DES PCB ET AUTRES POLLUANTS AU SEIN DU CASIER ..	81
6.1.1. Représentation en 3D .....	81
6.1.2. Coupes .....	81
6.1.3. Les signatures spécifiques des PCB (« empreintes PCB ») .....	89
6.2. L'APPROCHE GEOSTATISTIQUE .....	91
6.2.1. L'étude géostatistique .....	91
6.2.2. Conclusions .....	96

6.3. EPAISSEUR DE SEDIMENT A PRELEVER ET APPROCHE ALEATOIRE: ....	97
6.4. CONCENTRATION DE PCB – MASSE DE PCB .....	100
6.5. CONCLUSIONS RELATIVES A LA DISTRIBUTION SPATIALE DES POLLUANTS AU SEIN DU CASIER. ....	100
<b>7. Les carottes de references .....</b>	<b>101</b>
7.1. ROLE ET CHOIX DES CAROTTES DE REFERENCE .....	101
7.2. PROGRAMME ANALYTIQUE .....	101
7.3. DESCRIPTION SEDIMENTOLOGIQUE, GRANULOMETRIQUE ET DENSIMETRIQUE DES CAROTTES DE REFERENCE.....	102
7.3.1. Description sédimentologique et granulométrie .....	102
7.3.2. Densité de la Carotte C29. ....	107
7.4. RELATIONS ENTRE LES PCB ET LA GRANULOMETRIE OU LE CARBONE ORGANIQUE TOTAL .....	109
7.4.1. Relations entre les PCB <sub>i</sub> et la COT .....	109
7.4.2. Relation entre les PCB <sub>i</sub> et la granulométrie.....	109
7.5. DATATION DES CAROTTES.....	112
7.5.1. Les analyses de radionucléides, principes .....	112
7.5.2. Résultats des analyses de radionucléides .....	113
7.5.3. Apport de l'étude diachronique des traits de berges et des chroniques de débits .....	115
7.6. LES PROFILS VERTICAUX DE PCB – CHRONIQUE DE LA POLLUTION AU COURS DU TEMPS .....	121
7.6.1. Extension dans le temps de la chronique de la pollution en PCB. ....	123
7.7. PROFILS VERTICAUX DES CONGENERES PCB ET DES DIOXINES/FURANNES 125	
7.7.1. Répartition des congénères PCB en fonction de la profondeur .....	125
7.7.2. Les dioxines/furannes.....	128
7.8. PROFILS VERTICAUX DES METAUX – CHRONIQUE DE LA POLLUTION METALLIQUE .....	131
7.8.1. Exemple du zinc .....	131
7.8.2. La présence de mercure.....	132
7.8.3. Extension dans le temps de la chronique de pollution des métaux.....	133
7.8.4. Origine des concentrations en mercure.....	134
7.9. RELATIONS DES PCB AVEC LES METAUX .....	135
7.10. CONCLUSIONS ; APPORTS DES ETUDES SUR LES CAROTTES SPECIFIQUES.....	136

<b>8. Mesures de terrain .....</b>	<b>137</b>
8.1. PRINCIPE .....	137
8.1.1. Description succincte du FP-XRF employé.....	137
8.1.2. Avantages/limites .....	138
8.2. EMPLOI DU FP-XRF POUR SUIVRE LES METAUX PROXY DES PCB.....	139
8.2.1. Relation terrain/laboratoire pour les métaux .....	139
8.2.2. Etape de test - métaux terrain – PCB .....	140
<b>9. Conclusions et propositions relatives à l'échantillonnage.....</b>	<b>143</b>
9.1. RAPPEL DES PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ETUDE.....	143
9.2. RECOMMANDATIONS POUR L'ECHANTILLONNAGE.....	149
9.2.1. Phase 1 : Période de fonctionnement d'un ensemble de casier .....	149
9.2.2. Phase 2 : Evaluation des pollutions subies.....	149
9.2.3. Phase 3 : Echantillonnage en deux temps.....	150
<b>10. Bibliographie .....</b>	<b>153</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Les endiguements du Rhône.....	20
Illustration 2 : Schéma d'évolution de la bande active historique suite aux aménagements anthropiques. ....	21
Illustration 3: Localisation des différents groupes de "casiers Girardon" sur le Vieux Rhône de Péage-de- Roussillon. Zoom sur l'Ile des Gravieres .....	22
Illustration 4 : Localisation du casier étudié.....	23
Illustration 5 : Photos du casier avant et après débroussaillage .....	28
Illustration 6 : Localisation des carottes.....	30
Illustration 7 : Schéma de principe des modalités de carottage.....	31
Illustration 8 : Dispositif de carottage.....	32
Illustration 9 : Installations lors de la phase de prélèvement.....	32
Illustration 10 : Illustration de l'acheminement du matériel.....	33
Illustration 11 : Historique de la construction des casiers. ....	38
Illustration 12 : Localisation des sondages à la perche.....	44
Illustration 13 : Comparaison de l'altimétrie du toit des graviers et du terrain naturel. ....	46
Illustration 14 : Photos illustrant l'installation du câble reliant les électrodes. ....	51
Illustration 15 : Position des trois profils géophysiques.....	52
Illustration 16 : Pseudo-section du profil amont .....	55
Illustration 17 : Pseudo-section du profil central.....	56

Illustration 18 : Pseudo-section du profil aval.....	57
Illustration 19 : Représentation des berges visibles sur les profils géophysiques .....	59
Illustration 20 : Ouverture et description des carottes par G. Roux. ....	63
Illustration 21 : Synthèse des lithofaciès rencontrés sur les 30 carottages courts sur la base des descriptions sédimentologiques.....	64
Illustration 22 : Le granulomètre Mastersizer 2000 et le préparateur d'échantillon hydro 2000G66	
Illustration 23 : Evolution des courbes granulométriques sur un échantillon de silt de la carotte de référence C29 à différents temps de passage aux ultrasons .....	68
Illustration 24 : Evolution des courbes granulométriques sur un échantillon de sable de la carotte de référence C29 à différents temps de passage aux ultrasons .....	68
Illustration 25 : Répartition granulométrique de l'ensemble des 216 échantillons selon un diagramme ternaire sable-limon-argile .....	70
Illustration 26 : Classes granulométriques représentés par les 216 échantillons, pourcentages de répartition de ces échantillons au sein des différentes classes.....	70
Illustration 27 : Représentation de la classe granulométrique de chaque section de 30cm sur l'ensemble des 30 carottages courts sur l'ensemble du casier. ....	71
Illustration 28 : Matrice des corrélations de Pearson (corrélation interélémentaire simple), 216 échantillons .....	75
Illustration 29 : Cercle des corrélations pour l'ensemble des paramètres étudiés.....	76
Illustration 30 : Résultats statistiques PCB, HAP, métaux et métalloïdes pour cette étude et les études antérieures CNR.....	77
Illustration 31 : Représentation 3D des concentrations en PCB (selon les carottages). ....	81
Illustration 32 : Présentation par coupes parallèles au Rhône ou perpendiculaire au Rhône des concentrations en cuivre et en PCB. ....	85
Illustration 33 : Présentation par coupes parallèles au Rhône ou perpendiculaire au Rhône des concentrations en PCB et en mercure. ....	89
Illustration 34 : Répartition des PCB, en pourcentage des différentes familles (taux de chloration) .....	90
Illustration 35 : Variogramme vertical de la concentration en 7PCBi + ajustement de ce variogramme .....	92
Illustration 36 : Variogramme horizontal de la concentration en 7PCBi + ajustement de ce variogramme .....	93
Illustration 37 : Mailles ayant une probabilité >50% de dépasser le seuil de 0.06 mg/kg – modèle de variogramme avec « forte » continuité.....	94
Illustration 38 : Mailles ayant une probabilité >50% de dépasser le seuil de 0.06 mg/kg – modèle de variogramme avec « faible » continuité .....	95
Illustration 39: Distribution cumulée inverse des probabilités d'avoir une concentration supérieure à 0.06 mg/kg .....	96
Illustration 40 : Fréquence de répartition des concentrations en PCB.....	98
Illustration 41 : Variation des moyennes de concentration en PCB en fonction du nombre d'échantillons. ....	99
Illustration 42 : Evolution de la moyenne des écarts à la moyenne .....	99
Illustration 43 : Description sédimentologique de la carotte de référence C27 .....	103
Illustration 44 : Description sédimentologique de la carotte de référence C29.....	104

Illustration 45 : Répartition des échantillons centimétriques de la carotte de référence C27 dans un diagramme ternaire argile-silt-sable.....	105
Illustration 46 : a) Pourcentages d'argile, de limon et de sable en fonction de la profondeur, b) Pourcentage de fraction argileuse en fonction de la profondeur (cm) sur la carotte de référence C27 .....	106
Illustration 47 : Répartition des échantillons centimétriques de la carotte de référence C29 dans un diagramme ternaire argile-silt-sable.....	106
Illustration 48: a) Pourcentages d'argile, de silt et de sable en fonction de la profondeur, b) Pourcentage de fraction argileuse en fonction de la profondeur (cm) sur la carotte de référence C29 .....	107
Illustration 49 : Densité de la carotte C29 en fonction de la profondeur .....	108
Illustration 50 : Concentration en 7 PCBi en fonction du Carbone Organique Total pour les deux carottes de référence C27 et C29.....	110
Illustration 51 : Concentration de PCBi en fonction du pourcentage de fraction fine dans les carottes de référence C27 et C29.....	111
Illustration 52 : Activités en Bq/kg du Cs-137 et du rapport Cs-137/K-40 en fonction de la profondeur en cm dans la carotte de référence C29 .....	113
Illustration 53 : Activité en Bq/kg du 137Cs et du 210Pbxs en fonction de la profondeur sur la carotte de référence C29. ....	114
Illustration 54 : Lignes de berges (1971, 1983) et position des carottes.....	115
Illustration 55 : Comparaison entre les débits en m <sup>3</sup> /s mesurés dans le RCC à la station de Serrière entre 1971 et 1983 et le pourcentage de sable dans la carotte C27. ....	116
Illustration 56 : Comparaison entre les débits en m <sup>3</sup> /s mesurés dans le RCC à la station de Serrière entre 1981 et 1998 et le pourcentage de sable dans la carotte C27. ....	117
Illustration 57 : Pourcentage de sable en fonction de la profondeur dans a) la carotte de référence C27, b) la carotte de référence C29, marqueurs chronologiques et taux de sédimentation associés.....	119
Illustration 58 : Modèle d'âge de a) la carotte C27 et b) la carotte C29 .....	120
Illustration 59 : Concentrations des 7 PCBi (µg/kg MS) en fonction de la profondeur (cm) et de l'âge des carottes de référence C27 et C29 .....	121
Illustration 60 : Concentration en PCBi des échantillons des deux carottes de référence C27 et C29 en fonction de l'âge des dépôts : chronique historique de la pollution en PCBi.....	123
Illustration 61 : Lignes de berges au cours du temps et position des carottes.....	124
Illustration 62 : Représentation des concentrations en PCB le long des différentes carottes (coupe D) avec représentation de la topographie en 1971 (TN 1971). ....	124
Illustration 63 : Représentation des concentrations en PCB le long des différentes carottes (coupe 4) avec représentation de la topographie en 1971 (TN 1971).....	125
Illustration 64 : Composition en congénères de PCB des 3 sources chimiques .....	126
Illustration 65: Contribution relative des 3 sources chimiques et du signal global de pollution (7 PCBi) en fonction de la profondeur (cm) sur la carotte de référence C27. .	127
Illustration 66 :Contribution relative des 3 sources chimiques et du signal global de pollution (7 PCBi) en fonction de la profondeur (cm) sur la carotte de référence C29. .	128
Illustration 67: Concentration en dioxines-furannes en ng/kg MS en fonction de la profondeur et de l'âge des dépôts dans les carottes de référence C27 et C29.....	129

Illustration 68 : Proportion de chaque congénère à la signature Dioxines/Furannes en fonction de la profondeur pour les carottes C27 et C29.....	130
Illustration 69 : Concentration en zinc des échantillons des deux carottes de référence C27 et C29 en fonction de l'âge des dépôts : chronique historique de la pollution en zinc.....	132
Illustration 70 : Concentration en mercure des échantillons des deux carottes de référence C27 et C29 en fonction de l'âge des dépôts : chronique historique de la pollution en mercure .....	133
Illustration 71 : Représentation des concentrations en zinc et en mercure le long des différentes carottes (coupe D) avec représentation de la topographie en 1971.....	134
Illustration 72 : Représentation des concentrations en zinc et en mercure le long des différentes carottes (coupe 4) avec représentation de la topographie en 1971.....	134
Illustration 73 : Relation entre la concentration en 7PCBi et en Zn pour les carottes C27 et C29, zoom de cette relation sur la carotte C29.....	135
Illustration 74 : Concentration en zinc en fonction de la profondeur. Trois représentations. ....	139
Illustration 75 : Le fluorimètre X portable pour l'analyse qualitative des métaux.. .....	140
Illustration 76 : a) Relation pour le zinc entre mesures de terrain et de laboratoire ; b) relation Zn et PCB, analyses de laboratoire ; c) relation PCB (analyse laboratoire) et Zn mesure de terrain. ....	141
Illustration 77 : Représentation schématique des dépôts sédimentaires au sein d'un casier (a : bloc diagramme, b : vue de dessus) et c : représentation de l'évolution des concentrations en PCB au cours du temps dans le casier représenté.....	148

## Liste des annexes (Hors texte)

- Annexe 1 : Note de synthèse de M. JP Bravard
- Annexe 2 : Programmes analytiques, protocoles employés et influence sur les résultats
- Annexe 3 : Evolution des traits de berges et de l'occupation des sols au cours des ans
- Annexe 4 : Evolution des traits de berges et occupation des sols – synthèse
- Annexe 5 : Etude diachronique du casier n°2
- Annexe 6 : Profils en travers des berges
- Annexe 7 : Principe de la méthode géophysique de tomographie de la résistivité électrique
- Annexe 8 : Photos et Descriptions sédimentologiques des 30 carottages
- Annexe 9 : Définitions des principaux termes de la description granulométrique
- Annexe 10 : Description granulométrique des 216 échantillons (30cm)
- Annexe 11 : Résultats 7PCBi, 16 HAP, COT, éléments majeurs et traces des 216 échantillons de 30 cm.
- Annexe 12 : Représentation en coupes du casier des concentrations en métaux et PCB
- Annexe 13 : Résultats des 29 « empreintes PCB » (taux de chloration)

Annexe 14 : Etude géostatistique

Annexe 15 : Analyses granulométriques de la carotte C27

Annexe 16 : Analyses granulométriques de la carotte C29

Annexe 17 : Mesure de la densité et de la teneur en eau de la carotte C29

Annexe 18 : Résultats d'analyses en PCB, COT, dioxines/furannes des carottes de référence

Annexe 19 : Résultats des 20 mesures de radionucléides sur carotte C29

Annexe 20 : Résultats d'analyses en métaux des carottes de référence

Annexe 21 : Les métaux et métalloïdes des carottes de référence (description statistique de données et profils verticaux)

# 1. Présentation de l'étude

## 1.1. PRESENTATION DU PROJET

Dans le cadre du Plan Rhône<sup>1</sup> et, plus généralement du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux, l'atteinte du bon état et/ou l'amélioration du milieu sont pour partie conditionnées par la mise en place de travaux de réhabilitation des marges alluviales.

Ces marges sont la conséquence des travaux fluviaux menés au XIX<sup>ème</sup> et au début du XX<sup>ème</sup> siècle pour améliorer la navigation sur le Rhône (aménagement dit Girardon) et représentent un linéaire important puisqu'elles se développent sur l'ensemble du linéaire du Rhône.

Ces aménagements ont fixé et réduit la bande active du fleuve entraînant une réduction du transport sédimentaire et des apports à la mer ainsi qu'un exhaussement des berges (ainsi entre Lyon et Arles, de 100 000 à 1 000 000 m<sup>3</sup> de sédiments par km seraient stockés). Cet exhaussement modifie l'écosystème alluvial en limitant les échanges avec la nappe alluviale plus profonde et conduit à la banalisation des milieux par la disparition des annexes fluviales (lônes, bras secondaires) et par le vieillissement prématuré des formations végétales (disparitions des formations alluviales à bois tendre de type saulaie – peupleraie) et par ailleurs relève les niveaux d'eau en période de crue.

Le Plan Rhône dans ses volets « Inondation » et « Qualité des eaux, ressource et biodiversité » prévoit la réactivation de la dynamique fluviale pour améliorer l'expansion des crues et abaisser les lignes d'eau tout en répondant aux enjeux de biodiversité et de qualité des eaux. Dans ce contexte, la CNR, dans le cadre de sa mission d'intérêt général, doit mener à bien le démantèlement de ces aménagements afin de restaurer la dynamique fluviale et par là même, conduire à l'érosion des marges sur les Vieux Rhône (ou Rhône court-circuités - RCC -).

La mise en évidence quasi systématique de PCB lors des campagnes préliminaires de caractérisation des casiers, à des teneurs considérées comme élevées en regard des recommandations pour la manipulation des sédiments contaminés, pose la question de la faisabilité de cette redynamisation fluviale. En effet, en remobilisant ces formations sédimentaires anciennes ce sont des concentrations et des masses non connues en PCB qui pourraient être remises en suspension au risque d'aggraver la contamination de la chaîne trophique.

Nous sommes donc face à une problématique d'interface entre d'une part, des enjeux écologiques et sanitaires liés à la qualité des sédiments (teneur en PCB) et d'autre part des enjeux hydromorpho-écologiques liés à la qualité physique des milieux.

Ce constat est partagé entre les partenaires du Plan Rhône qui ont souhaité disposer d'éléments techniques fiables en vue de comprendre l'état physico-chimique des casiers Girardon afin d'apprécier la quantité de PCB susceptible d'être remobilisée au cours de leur réactivation et disposer ainsi d'éléments quantifiés qui contribueront au processus de prise de décision des services instructeurs.

A cette fin un programme de caractérisation approfondie d'un casier Girardon a été entrepris. Ce programme prévoit une estimation fine des volumes de sédiments, la recherche

---

<sup>1</sup><http://www.planrhone.fr>

d'éventuelles zones d'accumulation sédimentaire plus favorables que d'autres au piégeage des PCB, le prélèvement et l'analyse de nombreux échantillons pour permettre de quantifier au plus près les teneurs en PCB et évaluer l'apport de différentes techniques (dont les géostatistiques) à la prévision de ces concentrations. Compte tenu de la connaissance acquise et des techniques de terrain testées à cette occasion, ce programme proposera *in fine* un protocole de caractérisation basé sur une stratégie d'échantillonnage adaptée, permettant d'estimer les concentrations et masses de PCB des casiers dans des conditions de couts et délais compatibles avec la nature des enjeux.

Ce protocole a été présenté et soumis à validation du Groupe de travail Scientifique et Technique « PCB ». Il pourra également être présenté au Conseil Scientifique du Comité de Bassin au titre de son suivi du Plan Rhône

Cette étude apportera également des éléments de compréhension du transport et de l'accumulation des PCB le long du Rhône en complément des travaux réalisés dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) ou d'Axelera.

## **1.2. MONTAGE DE L'ETUDE**

### **1.2.1. Organisation**

Pour mener à bien cette étude, la CNR a fait appel à un ensemble de sous-traitants (BRGM, CNR Ingénierie, LEHNA/IPE via INSAVALOR, Soltech/GPMO, Laboratoire Wessling, ISS) dont les rôles sont précisés ci-après. Ce sont deux principaux sous-traitants, le BRGM, par l'intermédiaire de sa direction régionale Rhône-Alpes (BRGM RHA) et CNR Ingénierie qui ont assuré conjointement le rôle d'assistance à maîtrise d'ouvrage pour l'ensemble des prestataires du projet.

Le BRGM RHA a assuré spécifiquement la coordination des prestations suivantes :

- Intervention du LEHNA/IPE, laboratoire des Sciences de l'Environnement de l'ENTPE (par le biais d'INSAVALOR SA) pour son expérience dans le cadre de prélèvement, d'échantillonnage, de caractérisation et d'analyse des sédiments du Rhône via l'étude d'archives sédimentaires ;
- Intervention de la société Soltech/GPMO chargée des forages spécifiques à l'étude ;
- Intervention des services Risques Naturels et Sécurité du Stockage du CO2 (RNSC, Géologie (GEO) et Métrologie, Monitoring et Analyse (MMA) du BRGM respectivement dans le cadre de l'étude géophysique du casier Girardon, l'étude géostatistique et de la réalisation de certaines analyses chimiques spécifiques.
- Le BRGM a assuré la rédaction du rapport de fin d'étude ainsi que les étapes de communication/validation avec le soutien de CNR Ingénierie et le LEHNA/IPE

La CNR Ingénierie a assuré spécifiquement la coordination des prestations suivantes :

- Intervention des agents et mise à disposition des moyens techniques de CNR Ingénierie. Organisation des autorisations d'accès au site, nécessaires en raison de son appartenance à une Réserve Naturelle.

- Envoi et suivi des échantillons auprès du laboratoire qui réalise les analyses (laboratoire Wessling).
- Intervention de la société ISS chargé du débroussaillage du casier en préalable des analyses géophysiques et des forages.

### 1.2.2. Volet financier

Le montant total de cette étude s'élève à 301 k€ HT La répartition des montants entre les intervenants est indiquée dans le tableau ci-dessous :

Intervenants	Budget
BRGM coordination et études géophysiques, géostatistiques, analyses spécifiques	81 k€
CNR Ingénierie	72 k€
LEHNA/IPE (incluant budget analytique spécifique)	55 k€
Laboratoire Wessling (analyses), Soltech/GPMO (carottages), ISS (débroussaillage)	93 k€

Les financeurs du projet présentés par ordre alphabétique sont les suivants : Agence de l'Eau RM&C, CNR, Fonds Européens (Feder) et Région Rhône-Alpes. La DREAL RHA Délégation de Bassin a financé le BRGM pour l'élaboration du cahier des charges.



## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. CHOIX DU SITE D'ETUDE : UN CASIER GIRARDON DE L'ILE DES GRAVIERS (ILE DE LA PLATIERE)

#### 2.1.1. Les Epis et casiers Girardon : des structures d'aménagement spécifiques, représentatifs de l'aménagement du Rhône à l'aval de Lyon.

Un rappel historique des aménagements sur le Rhône est fait ci-après, il est repris d'une synthèse réalisée par Jean Paul Bravard dans la revue Drômoise (Mars 2010). Différents ouvrages dont Escudé et Combe, 1991 décrivent également cette période de première grande correction du fleuve.

Les premiers aménagements sur la plaine alluviale du Rhône à l'aval de Lyon ont été réalisés afin de lutter contre les inondations entre 1650 et 1850. Ils consistaient en des levées de terre ou des endiguements mais souvent isolés et réalisés à l'initiative privée puis de l'Etat.

Par la suite, des programmes de travaux très conséquents se sont succédés dont la finalité était essentiellement l'amélioration des conditions de la navigation et, dans une moindre mesure, la protection de la plaine, à savoir :

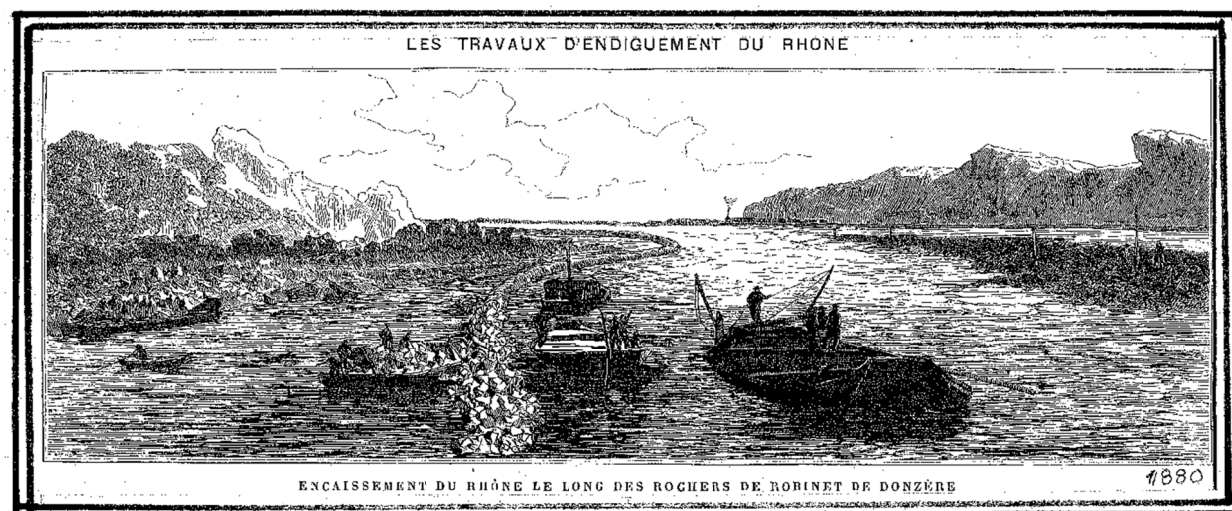
- entre 1840 et 1856, des digues mises en place par le Service Spécial du Rhône afin de favoriser un chenal principal,
- entre 1848 et 1876, des digues submersibles en hautes eaux afin de concentrer les eaux moyennes sous forme de chenal,
- entre 1876 et 1890 (Illustration 1), des digues basses disposées au-devant des digues submersibles en hautes eaux et reliées par des tenons. Des épis plongeurs complètent l'ensemble du dispositif dont la finalité est la concentration de la lame d'eau à l'étiage.
- entre 1884 et 1940, les digues « Girardon » ont repris les principes précédents mais en intégrant le fonctionnement morphologique du fleuve (maintien de mouilles, fermeture des bras secondaires,...).

Toutes ces phases d'aménagement ont contribué à la constitution de structures d'endiguement complexes qui se traduisent par une multitude d'ouvrages (digues hautes, épis, traverses, tenons...) de caractéristiques différentes (typologie, géométrie, pente, orientation, implantation) et qui ont été mises en œuvre sur une période étalée dans le temps.

L'ingénieur en chef Girardon a synthétisé des types généraux d'intervention liés à l'amélioration de la navigation en relation étroite avec le fonctionnement géomorphologique du fleuve (Girardon, 1894). Ces types sont les suivants :

- « Type de mauvais passage » : zone où la divagation est importante, changement brusque du chenal d'une rive à l'autre...,
- « Type 2 d'un bon passage » : secteur où les eaux sont dans un chenal unique avec stabilité des rives,
- « Passage d'un type à l'autre : zone de transition entre le deux types précédents,

- « Concentration des eaux » : zone devant faire l'objet une concentration par fermeture des bras secondaires,
- « Fixation des profondeurs dans les parties courbes » : fixation du thalweg dans la partie concave et maintien de la rive convexe par des dispositifs qui évitent tout attrait de force hydraulique,
- « Tracé de la rive concave » : réalisation d'une rive concave à l'aide d'une digue,
- « Tracé de la rive convexe » : réalisation d'une rive convexe afin de fixer des profondeurs sur la rive opposée,
- « Position de l'inflexion – fixité du seuil » : fixer la position des inflexions entre les tracés des rives,
- « Orientation des seuils » : favoriser une transition progressive d'une concavité à une autre en assurant une hauteur d'eau suffisante,
- « Ecoulement des graviers » : le principe de ces aménagements doit permettre le transport successif des graviers par étape mais les localisations de ces étapes est fixé à l'avance.

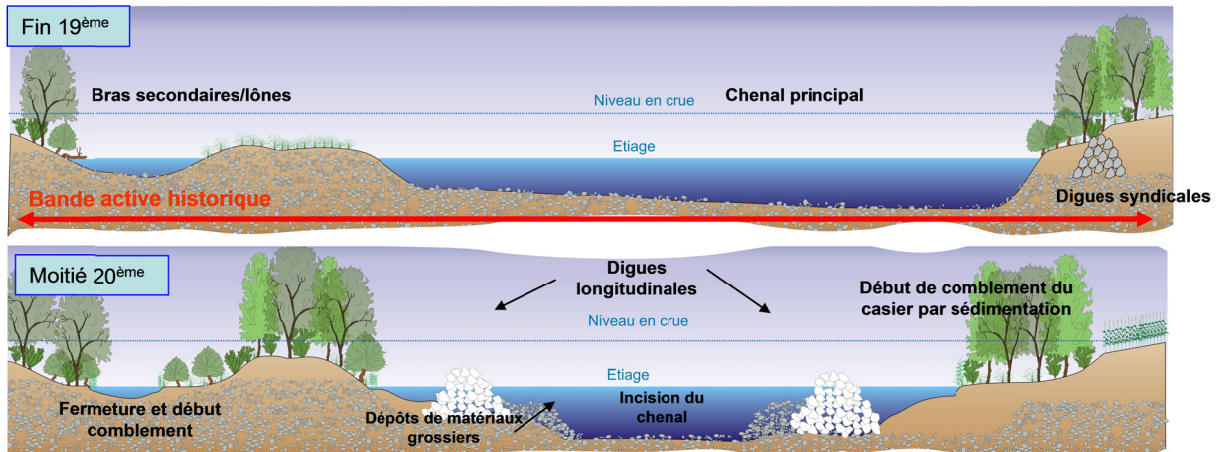


*Illustration 1 : Les endiguements du Rhône.*

Enfin, les aménagements hydroélectriques (considérés comme la deuxième grande correction) ont conduit à dériver le débit du fleuve dans un canal équipé d'une usine. Cette transformation profonde de l'hydro-système a donné naissance à des tronçons court-circuités de Rhône, dénommés aujourd'hui Vieux Rhône, alimentés par un débit réservé.

L'évolution sédimentaire sur les marges alluviales suite à ces deux périodes est synthétisée par l'illustration 2 avec ses principes généraux.

**Une première phase (1840-1940) pour la protection contre les crues et l'amélioration de la navigation**



**Une deuxième phase (1937-1986) pour le développement de la production d'énergie, de l'irrigation et de la navigation**

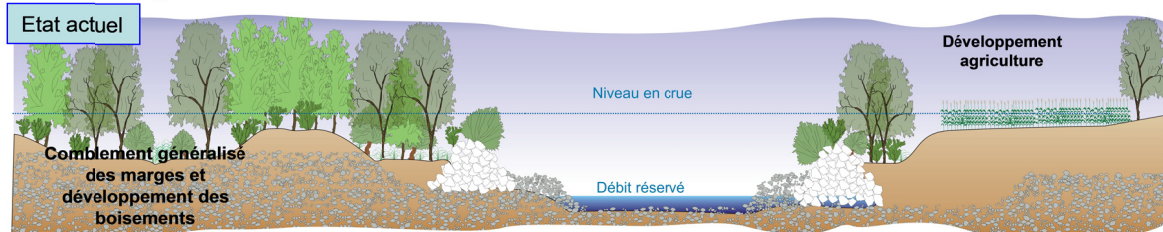


Illustration 2 : Schéma d'évolution de la bande active historique suite aux aménagements anthropiques.

**2.1.2. Choix du site de l'île des Gravieres**

Le choix du site d'étude a porté sur un casier Girardon de l'île de la Platière, au lieu-dit de l'île des Gravieres. La zone de l'épi étudiée devrait être une des premières remobilisées dans le cadre de la réhabilitation écologique du Vieux Rhône dans la zone de Péage-du-Roussillon. Sa situation, à l'extrados du fleuve, en fait un site particulièrement intéressant afin d'évaluer les capacités de remobilisation naturelle. Par ailleurs, l'absence d'enjeu aux abords des casiers permettra un démantèlement assez conséquent des structures ce qui rend ce site assez représentatif du fort degré de remobilisation attendu sur les marges.

La représentativité structurelle des ouvrages (épis, digue, traverse) n'est pas abordée à ce stade d'étude compte tenu de la complexité de ces ouvrages (cf ci-dessus). Une vision globale doit être conservée dans un premier temps et s'arrêter aux principes généraux d'aménagement. Ainsi, ce site peut être rattaché au type « Fixation des profondeurs dans les parties courbes ».

Par ailleurs, sur le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon, d'autres complexes d'endiguement sont également présents (Illustration 3) :

- les casiers d'Arcoules en rive droite entre les PK 52.5 et 53.7 ;
- les casiers d'entonnement de la lône de la Platière en rive gauche, entre les PK 54 et 54.3,
- les casiers de Limony, en rive droite entre les PK 56 et 56.72 ;

- les casiers de Serrières en rive gauche entre les PK 56.52 et 57.3,
- les casiers de Peyraud, en rive droite entre les PK 61.15 et 62.

Une fois les structures (constituées d'enrochements) démantelées, l'énergie du Rhône lors des crues devrait naturellement et progressivement permettre d'évacuer partiellement ou intégralement les sédiments piégés, d'où la nécessité de bien caractériser la qualité de ces derniers.

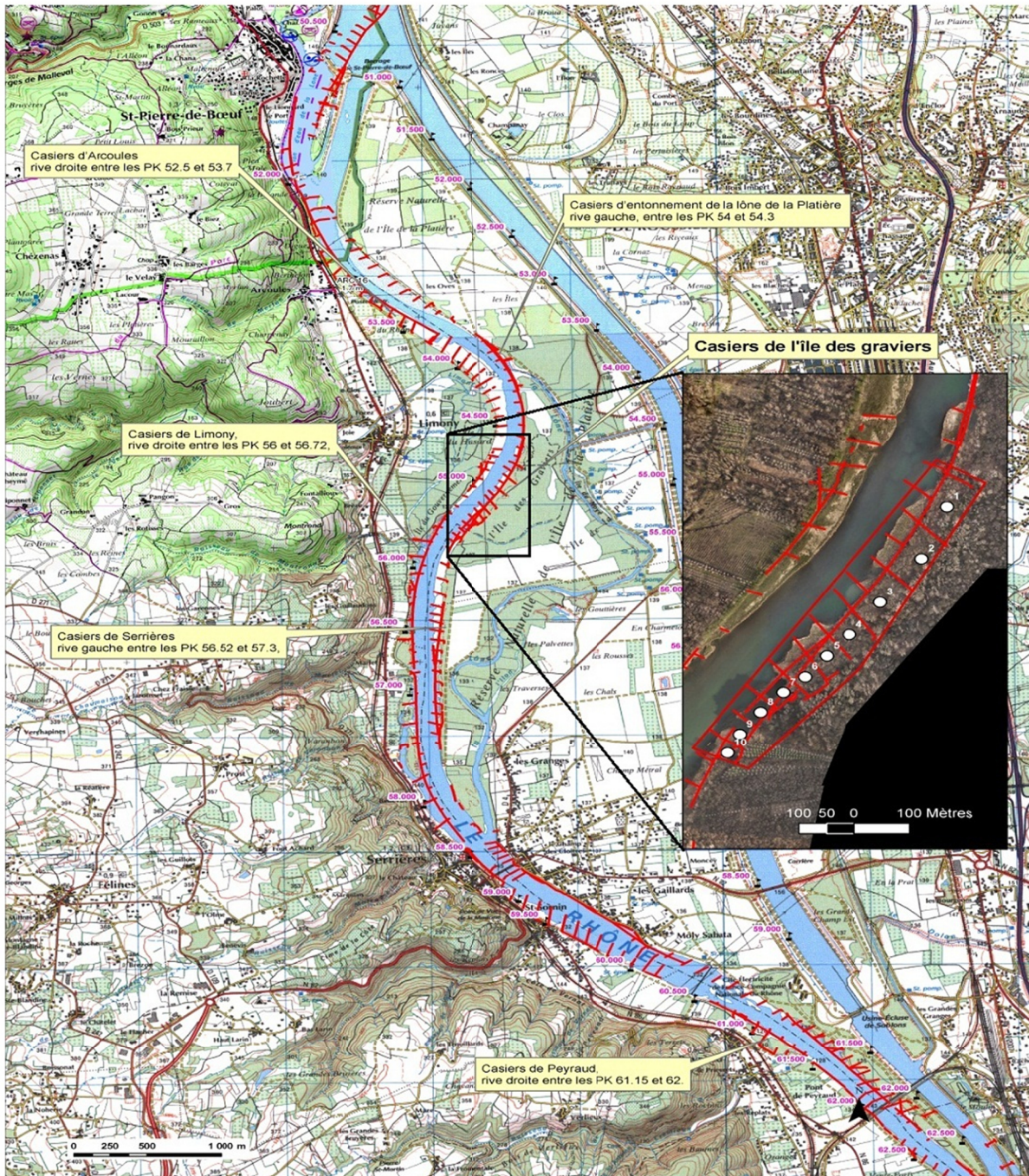


Illustration 3: Localisation des différents groupes de "casiers Girardon" sur le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon. Zoom sur l'île des Graviers

### 2.1.3. Choix du casier

L'illustration 4 indique la localisation plus détaillée des casiers de l'île des graviers et notamment l'emplacement du casier retenu pour cette expérimentation.

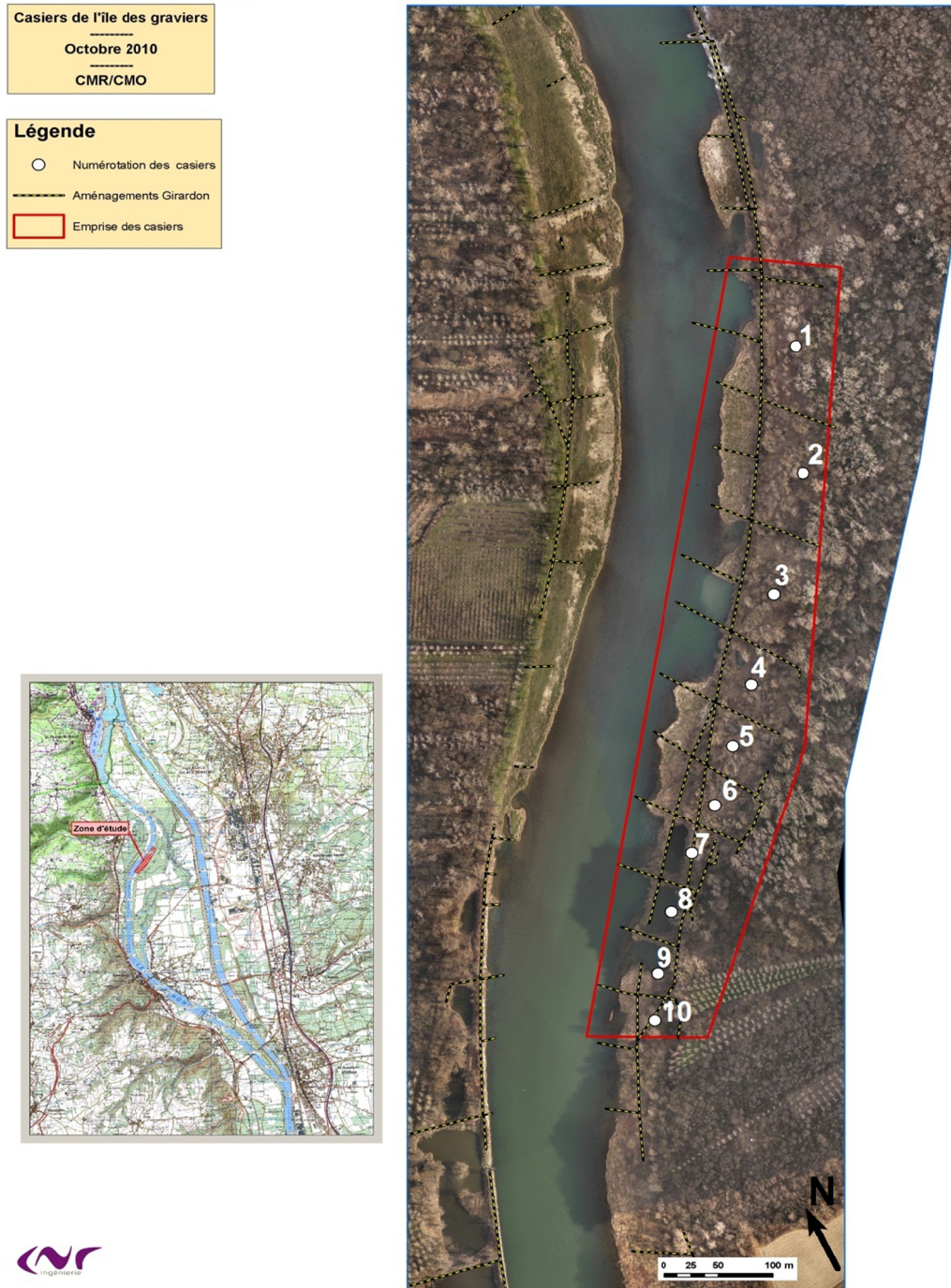


Illustration 4 : Localisation du casier étudié (2<sup>ème</sup> point en partant du nord)

Le casier étudié identifié n°2 (Illustration 4) présente une morphologie de surface un peu plus homogène que les autres casiers. Globalement cet ensemble de casiers présente les mêmes caractéristiques morphologiques (cf. Illustration 6, sur le plan d'échantillonnage avec la topographie Lidar) : point bas sous forme d'une vaste dépression à l'arrière immédiat de l'épi transversal amont, un talweg parallèle à la berge traversant le casier, des points hauts sous forme de bosses plus ou moins marquées. Le casier n°3 a fait l'objet d'une reconnaissance à la perche pendant l'été 2010.

Les trois premiers casiers présentent des dimensions très homogènes (environ 120 m X 70 m).

#### **2.1.4. Interface avec le schéma directeur de remobilisation des marges alluviales**

Les travaux récents menés par Mme Pauline Gaydou, chercheuse à l'université Lyon 2, dans le cadre de l'OSR<sup>2</sup> (publication en cours), basés sur la nature et l'étude historique de l'implantation des structures Girardon, ont permis d'identifier 97 unités modifiées par les aménagements Girardon sur 15 Vieux Rhône. Ces unités se répartissent en 4 types :

- Le type 1, correspond aux complexes de casiers extraits au chenal principal et qui sont potentiellement remobilisables par la puissance hydraulique du Rhône. Dix-neuf complexes de casiers ont été identifiés : 1 sur St Vallier, 2 sur Bourg-Lès-Valence, 3 à Beauchastel, 3 sur Logis Neuf, 1 sur Montélimar, 4 sur Donzère Mondragon, 2 à Avignon et 3 sur Péage-de-Roussillon (dont le complexe où le casier est étudié dans le cadre de cette étude). **Ils représentent 19 millions de m<sup>3</sup> de sédiments.**
- Le type 2, correspond au cas de la restauration des îlons, forcément contrôlée car elles ne sont pas situées dans le chenal du Rhône,
- Le type 3 est constitué des bancs de galets,
- Le type 4 identifie les aménagements sous eau nécessitant une remobilisation.

Les concentrations en PCB mesurées dans le cadre des études d'avant-projet de restauration des îlons sur cette zone sont dans la gamme de celles rencontrées le long des épis et casiers analysés par la CNR entre Saint-Pierre de Bœuf et le seuil de Peyraud, à hauteur de Saint-Rambert d'Albon (20 à 180 µg/kg).

## **2.2. ETUDE GEOMORPHOLOGIQUE DU CASIER**

### **2.2.1. Méthode de suivi de l'évolution des berges**

#### ***Fond documentaire analysé et analyse historique des cartes***

L'étude géomorphologique du casier nécessite d'analyser l'évolution de l'occupation du sol au sein des casiers. Pour ce faire, nous avons réuni un important fond cartographique et photographique présenté dans le tableau suivant (Tableau 1).

---

<sup>2</sup> L'OSR (<http://www.graie.org/osr/>) outre son rôle d'animation et programmation scientifique met à disposition cartes et données communes acquises dans son cadre.

Date	Type	Origine	Source	Observation	Débit
1860	Carte	Pont et chaussées	CNR	Etat initial du site avant aménagements	Etiage ?
1911	Carte Branciard		CNR	Levé de l'implantation des aménagements Girardon	Etiage ?
1938	Photo aérienne	IGN	OSR	Avant aménagement hydroélectrique	< 800 m <sup>3</sup> /s
1948	Photo aérienne	IGN	OSR	Avant aménagement hydroélectrique	800 m <sup>3</sup> /s
1949	Photo aérienne	IGN	CNR	Avant aménagement hydroélectrique	342 m <sup>3</sup> /s
1958	Photo aérienne	IGN	OSR	Avant aménagement hydroélectrique	995 m <sup>3</sup> /s
1971	Carte levé avant travaux	CNR	CNR	Avant aménagement hydroélectrique	Etiage ?
1978	Photo aérienne	IGN	CNR	Immédiatement après aménagement hydroélectrique	20 m <sup>3</sup> /s
1983	Photo aérienne	IGN	CNR	Après aménagement hydroélectrique	20 m <sup>3</sup> /s
1998	Orthophotoplan	IGN	CNR	Après aménagement hydroélectrique	20 m <sup>3</sup> /s
2009	Levé lidar et photo aérienne	ATM 3D	CNR	Etat actuel	20 m <sup>3</sup> /s

Tableau 1 : Liste des fonds cartographiques et photographiques utilisés.

### **Méthode d'analyse des données**

L'interprétation des données cartographique (photos et plans) a été réalisée sous système d'information géographique (Arc-map), différentes étapes ont été nécessaires :

- le géo référencement des fonds de plans afin de projeter les informations, puis :
- la digitalisation des fonds de plan afin de reproduire les éléments suivants :
  - o Aménagements (digues, épis et traverses),
  - o Secteur en eau,
  - o Bancs de matériaux frais (sables et/ou galets),
  - o Formation végétales pionnières (herbacées et saulaies),
  - o Formations végétales évoluées (forêts).

Ces deux étapes permettent d'obtenir une vue en plan des différentes entités digitalisées et de calculer les surfaces de chaque unité. Ceci permet de connaître l'évolution de l'occupation du sol au sein des casiers et notamment l'avancée de la forêt qui traduit le degré d'atterrissement et de fermeture du casier. L'enveloppe de dessin est comprise entre la digue longitudinale à l'ouest et le haut de talus en 1911 qui correspond à la berge la plus ancienne.

#### **2.2.2. Acquisition des données hydrologiques et hydrauliques**

L'hydrologie du Rhône durant la période d'étude est la variable principale impactant l'évolution de la sédimentation à l'intérieur des casiers. Plusieurs stations limnimétriques ont été utilisées dans le cadre de cette étude, ces données ont permis d'analyser les chroniques de débit entre 1920 et nos jours.

- Station de Ternay : station de référence du Rhône, donne le débit sur le secteur avant aménagement CNR.
- Station de Serrières : elle donne les débits dans le Rhône court-circuité (Vieux Rhône).
- Station usine de Sablons : située sur l'usine de Sablons, elle donne les débits turbinés. Ceci permet de connaître par différence avec Ternay, le débit dans le Vieux Rhône lors des pannes de la station de Serrières.

Les données hydrauliques et notamment la courbe de relation hauteur/débit permettent de connaître les débits de débordement dans les casiers. Elle provient du modèle mathématique du Rhône.

### **2.2.3. Expertise hydrodynamique**

Les données recueillies sur les évolutions historiques (analyse de l'occupation du sol, ...) ont été soumises pour expertise et analyse à Jean Paul Bravard, professeur de Géographie à l'université Lyon 2, spécialiste en morphodynamique fluviale et géoarchéologie des plaines alluviales. Une visite de terrain et plusieurs réunions de travail ont complété les échanges. La rédaction d'une note de synthèse est présentée en Annexe 1.

### **2.2.4. Evaluation du volume de sédiment**

La topographie de la surface actuelle de l'épi (profil de terrain naturel - TN -) est connue avec une grande précision grâce à une cartographie récente élaborée au LIDAR (télédétection par laser).

Une évaluation de l'épaisseur de sédiment est réalisée au moyen d'une tige métallique (diamètre 1 cm) enfoncée manuellement jusqu'à atteindre le niveau grossier de galets constituant l'ancien lit du Rhône ou toit des graviers. Cette technique manuelle semble avoir fait ses preuves mais elle est basée sur une parfaite connaissance de l'opérateur et il a été souhaité de tester l'efficacité des méthodes géophysiques pour localiser l'interface entre le massif sédimentaire et le toit des graviers.

### **2.2.5. Recherche des structures souterraines par étude géophysique**

L'étude géophysique vise à mettre en évidence les éventuelles discontinuités physiques structurant le casier (limite du toit des graviers, couches sédimentaires de granulométrie distinctes...). Le choix de l'approche géophysique a porté sur l'emploi des techniques électriques. Le radar géologique, bien que très mobile et dans le principe facilement applicable sur le terrain, a été écarté par mesure de précaution. En effet, le radar géologique (ou GPR, ground penetrating radar) est une méthode efficace pour caractériser les dépôts alluviaux dans la mesure où la conductivité électrique n'est pas trop haute (<20 mS/m). La présence possible de niveaux argileux et de passées humides laisse craindre une conductivité électrique défavorable qui empêcherait la visualisation des structures sous-jacentes. C'est ainsi que le choix a porté sur la tomographie de la résistivité électrique (Electrical resistivity tomography – ERT), méthode qui a fait ses preuves dans le domaine de l'environnement.

La caractérisation de l'épi a été réalisée au moyen de trois profils perpendiculaires au sens d'écoulement du Rhône de plus de 90 m de long chacun. Les résultats de la géophysique sont ensuite confrontés aux résultats des carottages afin d'apporter des éléments de calage et d'interprétation à ces mesures.

### 2.3. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE AU SEIN DU CASIER ET PRELEVEMENT

Les PCB ont été émis dans l'environnement en France essentiellement entre le milieu des années 1950 et la fin des années 1980. Ils montrent en général une affinité forte pour les particules fines et organiques. On comprend ainsi que la caractérisation des dépôts sédimentaires va devoir prendre en compte principalement deux paramètres : l'âge de la mise en place du massif sédimentaire (plus exactement la période couverte par la mise en place du dépôt) et la répartition des fractions fines au sein de ce massif. Au début de l'étude, les quelques prélèvements disponibles ne permettaient pas de prendre en compte la complexité potentielle de ce type d'accumulation sédimentaire, et les concentrations minimales et maximales de PCB n'étaient pas connues. Il s'ensuit que l'évaluation de la masse potentielle de PCB qui serait remise au Rhône lors de la redynamisation de ces marges alluviales n'est pas possible, alors qu'elle est indispensable avant toute opération.

Le guide d'Environnement Canada (2002) dans la partie qu'il consacre à l'assurance qualité des données d'échantillonnage indique que la première des sources d'erreur est la méconnaissance de la distribution spatiale des contaminants. Pour réduire cette source d'erreur, ce guide indique qu'il est très fréquemment profitable d'élaborer un modèle hydrosédimentologique conceptuel (à ne pas confondre avec un modèle numérique). Il s'agit d'une représentation cartographique/géographique des conditions hydro-sédimentologiques, basée sur l'interprétation des données disponibles sur la nature des sédiments et des conditions hydrodynamiques de la zone d'accumulation. L'élaboration d'un tel modèle vise à déterminer les zones sujettes à l'érosion, au transport et à l'accumulation sédimentaire et à vérifier les variations saisonnières dans la nature des sédiments de façon à pouvoir mieux cibler le plan d'échantillonnage. Elle vise aussi et surtout à définir des zones homogènes quant aux caractéristiques physico-chimiques afin de cibler les zones d'accumulations des sédiments fins, supposés être les plus contaminés et ainsi localiser plus efficacement l'emplacement des points de prélèvements des échantillons.

En l'état de nos recherches, nous n'avons pas identifié de littérature relative à la mise en place de l'accumulation sédimentaire au sein des épis-casiers Girardon. Aussi, il a été fait le choix de mener un échantillonnage « non orienté » et c'est une **approche systématique de type grille** qui a été privilégiée pour définir la position des points de prélèvements.

Le casier, d'une superficie d'environ 120 mètres x 70 mètres, a fait l'objet d'une **trentaine de points de prélèvement**, espacés d'environ 15 mètres (Illustration 6). Toute la hauteur de sédiment du casier est prélevée et découpée en échantillon de 30 cm d'épaisseur, ce qui revient à générer entre 5 et 12 échantillons par points de prélèvement compte-tenu des épaisseurs de sédiments pré-évaluées à la perche (entre 1,5 et 3,7 m).

**En parallèle de l'échantillonnage systématique, des carottes spécifiques sont prélevées** pour être étudiée par le LEHNA/IPE. Ces carottes font l'objet d'une caractérisation très fine avec un pas d'échantillonnage, non plus intégrateur, mais en fonction de la variabilité sédimentologique apparente. En effet, ce type d'accumulation (accumulation sédimentaire plutôt sablo-limoneuse) n'a fait l'objet d'aucune recherche approfondie vis-à-vis des conditions de sédimentation et de leurs influences potentielles sur l'accumulation des PCB. La connaissance apportée par la caractérisation de ces carottes, incluant des datations, des déterminations chimiques et minéralogiques fines, doit permettre de mieux cerner la relation

entre la dynamique hydro-sédimentaire et les contaminants. Ces carottes sont appelées « carotte de référence » dans la suite du texte.

### 2.3.1. Mise en place de la grille d'échantillonnage

Afin de réaliser les mesures géophysiques puis les prélèvements dans de bonnes conditions (y compris les mouvements des opérateurs) et de pouvoir mettre en place le plan d'échantillonnage de manière précise, il convenait au préalable de supprimer la végétation herbacée et arbustive, les casiers de l'île des graviers étant occupés par une végétation dense (Illustration 5) constituée de différentes strates :

- Strate herbacée : dominée par l'ortie et la pariétaire,
- Strate arbustive : dominée par la renouée du Japon, présence sporadique de jeunes individus de frêne, saules blancs et érable negundo,
- Strate arborée : dominée par le peuplier noir, présence de frêne et d'érable negundo.

La végétation intéressante (saule blanc et peuplier noir) a été préservée (Site Nature 2000 et Réserve Naturelle) en concertation avec le gestionnaire du site. En définitive, le débroussaillage a surtout porté sur la renouée du Japon (espèce exotique envahissante). Les parties aériennes ont été finement coupées et laissées sur place. Cette opération a été réalisée entre le 16 et le 17 septembre 2011 par l'entreprise ISS.



*Illustration 5 : Photos du casier avant et après débroussaillage*

Un maillage physique initial a été mis en place sur le terrain afin de repérer la localisation des différentes carottes (points de prélèvement).

- Mise en place du profil en long des têtes de profil en travers sur la digue longitudinale : pose d'un cordeau puis piquetage des têtes de profil au décimètre (espacement de 15 m).
- Mise en place du premier profil en travers amont : cordeau posé « à vue » en relation avec le levé Lidar. La grande précision du levé et les variations topographiques ont permis une bonne adéquation entre la localisation prévisionnelle réalisée sur plan et la mise en place sur le terrain, puis piquetage des points d'échantillonnage.

- Mise en place du maillage : les autres points ont été mis en place au fur et à mesure en reportant les distances voulues sur le terrain avec deux décamètres. Le croisement des deux décamètres à la distance voulue (en long et en travers) permettait de piqueter le point avec précision. La vérification du bon alignement des points à l'avancement a permis de corriger les éventuelles erreurs dues aux arbres qui occasionnaient parfois des déviations du décamètre. Des cordons ont finalement été placés et gradués tous les 15 m afin de valider le bon alignement des points.

Le piquetage final est légèrement différent du maillage initial car certaines carottes ont été déplacées à cause de la trop grande proximité d'un arbre ou du blocage du carottier sur des racines. Un levé au GPS différentiel à post-traitement (Geo XH 6000) a été utilisé afin de localiser précisément la position des têtes des carottes. Afin de s'affranchir au maximum des erreurs induites par la canopée (multi-trajets), le levé a été fait après la chute des feuilles. L'illustration 6 indique la localisation finale des points de prélèvements sur fond topographique.

Le report des profils à la perche visant à déterminer le toit des graviers a été fait suivant une méthode mathématique (calcul trigonométrique) grâce aux données suivantes : position XY de la tête de profil, angle du profil, distance entre le point et la tête de profil. Le croisement du nuage de point avec la modélisation du levé lidar permet alors d'obtenir la cote de chaque point.

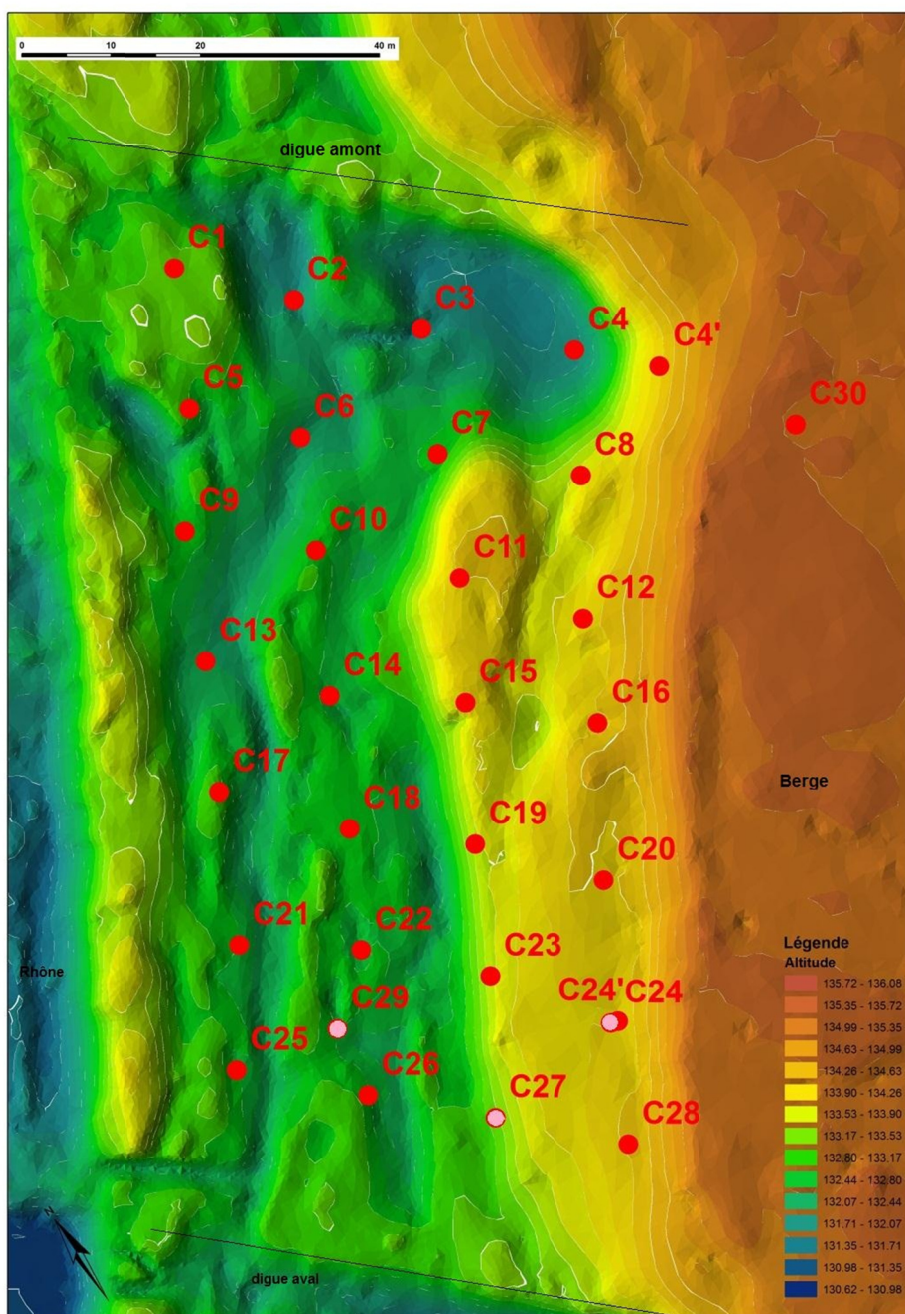


Illustration 6 : Localisation des carottes (les carottes de référence sont représentées en rose) représentée sur la topographie Lidar (légende des altitudes).

### 2.3.2. Les méthodes de carottage et la campagne de prélèvement

Les exigences liées au cadre de cette étude ont fortement limité les moyens d'intervention et ont imposé de nombreuses précautions :

- Travail en Réserve Naturelle : accès par le fleuve, impossibilité de travailler avec du gros matériel,
- Conservation de l'intégrité de la carotte (carottage de l'ensemble du dépôt sédimentaire fin sur une épaisseur pouvant atteindre 4 m ) en évitant les mélanges et les tassements,

- Eviter la chute de matériaux au fond de la dernière passe afin de ne pas « polluer » les échantillons par les strates supérieures,
- Besoin d'un volume d'échantillon conséquent permettant de réaliser l'ensemble du programme analytique prévu.

La société Soltech/GPMO a proposé la méthode du carottage gainé à diamètre décroissant. Le principe de cette méthode est l'utilisation de carottier de 70 cm de long dont le diamètre va en décroissant au fur et à mesure de l'avancée du travail. Chaque passée est ensuite tubée avant la passée suivante. Cette méthode présente deux avantages, d'une part la réduction du diamètre des carottes permet de limiter le frottement du carottier contre les parois, ce qui en facilite l'extraction ; d'autre part, le tubage de la passée précédente permet de tenir les terrains en place afin d'éviter les éboulements de sol qui entraîneraient un mélange des strates et une non-représentativité des carottes vis-à-vis du massif sédimentaire en place.

Le schéma suivant (Illustration 7) illustre le principe des carottages à diamètre décroissant (source Soltech/GPMO).

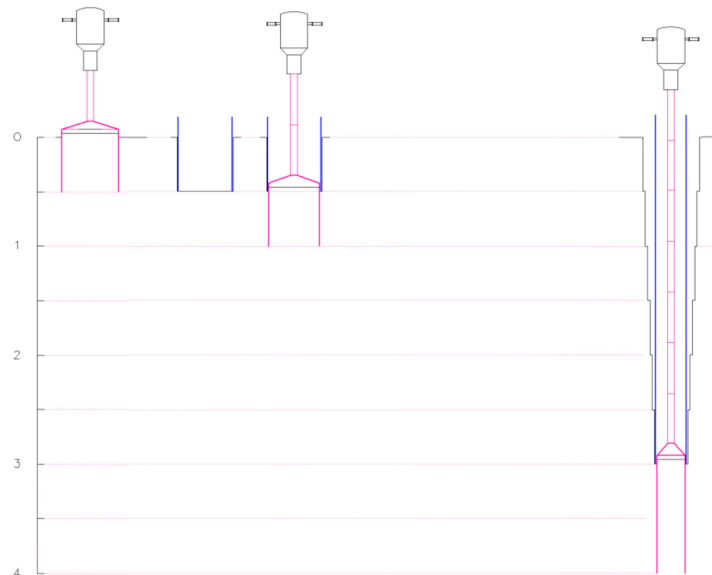


Illustration 7 : Schéma de principe des modalités de carottage.

Cette méthodologie de prélèvement a été mise en place grâce à un marteau électropneumatique de type COBRA (alimenté par un groupe électrogène insonorisé) et d'un tripode muni d'un palan afin de retirer l'outillage (Illustration 8, vue du campement : Illustration 9). Le jeu de carottier a été réalisé sur mesure pour les besoins de la mission. Chaque carottier contient une gaine à usage unique (PVC ou plexiglas) qui permet de conserver l'intégrité de l'échantillon. Des obturateurs à lamelles permettent de retenir les échantillons les moins cohésifs. Les carottiers sont couplés au marteau pneumatique par un train de tige en acier plein de 50 cm de long.

Dès sa sortie du carottier, la carotte est fermée (mousse de fleuriste pour combler les éventuels vides à chaque extrémité, capuchon plastique, bande adhésive) et référencée (haut/bas, numéro du sondage, numéro de la passe).

Toute la hauteur de sédiment a été prélevée sous la forme de passes gainées de 60 à 75 cm d'épaisseur qui seront divisées en échantillons de 30 cm d'épaisseur, ce qui reviendra à

générer entre 5 et 12 échantillons par points de prélèvement compte tenu des épaisseurs de sédiments pré-évaluées (entre 1,5 et 3,7 m).

Les carottes sont transportées jusqu'au laboratoire CNR à Gerland.



*Illustration 8 : Dispositif de carottage.*



*Illustration 9 : Installations lors de la phase de prélèvement.*

La période d'intervention sur le terrain (août-septembre) a été choisie afin de limiter les impacts sur la faune ; il s'agissait surtout de se placer en dehors des périodes de nidification. La campagne de carottage a été menée du 5 au 21/09/2011. L'ensemble des moyens matériels et humains a été acheminé par bateau (Illustration 10) via le Rhône depuis Serrières.

Les principales difficultés rencontrées durant les phases de terrains ont été :

- Le blocage du carottier sur de grosses racines a nécessité le déplacement de quelques mètres de certains points.
- La casse du raccord carottier à la tige, un poste à souder présent sur place a permis une réparation rapide.



*Illustration 10 : Illustration de l'acheminement du matériel.*

## **2.4. ANALYSE DES POLLUANTS ET DES PARAMETRES PERMETTANT DE COMPRENDRE LEUR PRESENCE DANS LE CASIER**

Les carottes ainsi prélevées sont emmenées au laboratoire (laboratoire CNR) où elles sont ouvertes longitudinalement à l'aide d'une scie diamantée, prises en photo et font l'objet d'une description sédimentologique fine. Cette description contribue à la connaissance de la variabilité sédimentologique au sein du casier. Elle apporte également des éléments d'interprétation à la caractérisation géophysique et permet de conserver la mémoire des structures sédimentaires qui seront ensuite oblitérées lors de la préparation des échantillons.

### **2.4.1. Préparation des échantillons**

La carotte est découpée en échantillons de 30 cm d'épaisseur. La numérotation des échantillons est constituée du n° de la carotte et d'un incrément représentant la partition ; l'échantillon 0-30 cm de profondeur est le numéro 1, l'échantillon 30-60 est le numéro 2 etc. ; ainsi par exemple, l'échantillon E8-5 est l'échantillon n°5 prélevé entre 1m20 et 1m50 de profondeur au point de carottage n°8.

A l'ouverture des carottes, une grande diversité des lithofaciès a été mise en évidence. Cette diversité était suspectée lors des prélèvements à la tarière à main mais son importance était néanmoins sous-estimée. L'alternance de passées sableuses peu consolidées et relativement sèches avec des passées à dominante argileuses et humides a empêché une homogénéisation directe pour un certain nombre d'échantillons. Dans ces cas précis, les carottes ont été pré-séchées à température ambiante ou à faible température (35°C). Les parties à dominante argileuse ont ensuite été démottées et regroupées avec les parties non cohésives, et l'ensemble des échantillons a été homogénéisé. L'échantillon fait ensuite l'objet d'une succession de quartages successifs pour atteindre les volumes correspondant aux différents besoins analytiques.

#### **2.4.2. Le programme analytique**

Le programme porte sur l'ensemble des analyses qu'il apparaît indispensable d'acquérir pour répondre immédiatement à la question posée, à savoir, quelles concentrations en PCB et autres polluants seront remobilisées lors de la remise en suspension des sédiments de l'épi. S'intègrent également les paramètres qui constituent les métadonnées utiles à la compréhension du comportement des polluants dans le but notamment de normalisation et/ou de comparaison de variances intra ou inter-épi tels que ceux issus des propositions de l'étude ONEMA - AquaRef- Cemagref (Schiavone et Coquery, 2009) auxquels s'ajoutent quelques éléments que l'expérience ou la consultation d'une littérature récente nous porte à considérer également.

#### ***Les polluants relevant des protocoles classiques de caractérisation***

Pour avoir un aperçu des PCB présents dans l'environnement sans avoir à rechercher l'ensemble des congénères, il est couramment réalisé la mesure des 7 PCB dits indicateurs (PCBi<sup>3</sup>), les plus régulièrement rencontrés et qui représentent en général près de 50% de la quantité totale des PCB. C'est la somme de ces 7 PCBi qui est utilisée dans les « recommandations relatives aux travaux impliquant des sédiments aquatiques susceptibles d'être contaminés par des PCB » et qui est employée dans la grande majorité des publications scientifiques françaises et internationales. Les PCBi ont été mesurés systématiquement sur les échantillons prélevés. La limite de détection pour chacun des 7 congénères a été recherchée pour être assez basse afin de pouvoir gérer correctement, lors de la phase d'exploitation des données, les valeurs inférieures à la limite de détection.

Afin d'affiner la connaissance globale des PCB présents dans le massif sédimentaire, il a également été réalisé, pour une trentaine d'échantillons, non pas une recherche des seuls 7 PCBi mais un profil global de l'ensemble des congénères répartis en familles en fonction de l'importance des substitutions du chlore PCB.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont également analysés. Il s'agit des principaux HAP indicateurs définis dans la liste EPA (16 HAP).

Sur tous les échantillons sont également mesurés les principaux métaux (et métalloïdes) suivants : Cd, Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Hg et As.

Les analyses des HAP comme celles des métaux, outre leur importance par rapport aux règles de bonnes pratiques de gestion des sédiments, constituent également des indicateurs pertinents de l'activité anthropique.

---

<sup>3</sup> Les PCB indicateurs sont les congénères 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180.

## **Autres analyses**

Des mesures complémentaires systématiques sont menées à des fins de normalisation (pour comparer les résultats) et de compréhension des mécanismes de transfert, d'accumulation et de comportement des PCB. Ce sont les mêmes mesures qui sont prises pour les micropolluants organiques et pour les métaux traces<sup>4</sup>, à savoir :

- le carbone organique total (COT) est mesuré préférentiellement à la perte au feu pour laquelle, il n'existe pas d'homogénéité relative aux températures employées ;
- l'analyse de la distribution granulométrique des particules.

Les principaux éléments majeurs : Si, Ca, Na, K, Fe, Mg, S, P et Al (ce dernier étant généralement employé pour normaliser la fraction argileuse équivalente ce qui reste un ordre de grandeur) et certains éléments métalliques (V, Sr, Ba, Ti, Sb, Sn) sont analysés et le pourcentage de matière sèche (MS) est relevé.

Le détail des protocoles employés, ainsi qu'une étude comparée de l'influence de ces derniers sur les concentrations en métaux sont présentés en Annexe 2.

## **Mesures et analyses des carottes de référence**

Outre des mesures plus ponctuelles des mêmes paramètres que pour le protocole analytique menés sur les échantillons de 30 cm (PCBi, métaux, COT, granulométrie) les carottes de référence font l'objet d'une caractérisation sédimentologique et chimique plus fine (analyses des dioxines/furannes, des PCB<sub>DL</sub>) et de mesures de radioéléments en vue de datation. Les critères ayant prévalu au choix de ces carottes sont présentés dans le chapitre éponyme.

Le détail des mesures et analyses réalisées et des protocoles employés est présenté dans la partie analytique développée en Annexe 2.

La description détaillée de la carotte et son échantillonnage en vue des différentes analyses ont été réalisés par le LEHNA/IPE.

## **2.5. MESURES DE TERRAIN**

Compte tenu de la complexité et du coût d'analyses complètes pour l'interprétation de polluants tels que les PCB, il serait nécessaire à terme de se limiter à un petit nombre d'échantillons pour caractériser les sédiments. Ceci va à l'encontre d'une représentativité souhaitable pour une géométrie complexe du « gisement » : variabilité au long du cours du fleuve, variabilité transversale reflétant celle des régimes, variabilité verticale selon l'historique de la sédimentation... Cette dernière variabilité est particulièrement importante car elle reproduit l'historique de la pollution, avec une topologie peu sujette à variations et qui est schématisée dans le Tableau 2.

---

<sup>4</sup> Issues de « l'analyse comparative et critique des documents guides ou normes pour le prélèvement des sédiments en milieu continental » de Schiavone et Coquery, 2009. Ce document comparait les Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP), le guide édité par AE LB (2006) et les normes NF EN ISO 5667-1 (2007) et ISO 5667-12 (1995).

Epoque	Type de sédimentation	Profondeur (profil type)	Polluants types
Depuis 1980	Après l'interdiction PCB (et réduction des autres émissions)	?	Métaux, composés organiques (atténués)
1920-1980	Chimie moderne	?	Métaux, HAP, PCB, pesticides,...
Vers 1920	Construction des casiers	Substratum des casiers : 2 à 4 m	
1750-1920	Industrialisation	?	Métaux, HAP
Avant 1750 ?	Epoque pré-industrielle	?	Néant (sauf cas particulier localisé)

Tableau 2 : Topologie des périodes de sédimentation et des polluants potentiels.

Lorsque les techniques analytiques de terrain sont disponibles, il est souvent intéressant de réaliser un nombre important de mesures indicatives, afin de pouvoir disposer d'une cartographie des pollutions, et d'orienter le choix des prélèvements à analyser par le laboratoire (ASAP (Adaptive Sampling and Analysis Program<sup>5</sup>), US-DOE, 2001).

Dans le cas des PCB, la détermination sur le terrain fait appel à une technique délicate et coûteuse (GC-MS – Chromatographie en phase gazeuse, spectrométrie de masse, portable -), qui de toute façon s'avère inadaptée à la situation présente (les teneurs en PCB sont trop faibles par rapport au développement technologique actuel et il n'existe pas de protocole simple permettant de mettre en évidence la présence de PCB à des concentrations de l'ordre de quelques dizaines de µg/kg).

Il a donc été envisagé de délimiter le volume des sédiments représentant la tranche « Chimie moderne (et PCB) » à partir de sa signature en d'autres polluants, plus abondants et plus faciles à analyser par des méthodes de terrain tels que les métaux (fluorescence X portable - FPXRF -) ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques (Spectroscopie de Fluorescence par laser, LIFS). Le principe consiste donc à identifier les volumes ou épaisseurs de sédiments concernés par les pollutions en métaux (notamment Pb, Zn, Cu) et en HAP qui permettrait de cibler les volumes ou épaisseurs contenant potentiellement des PCB, puisque l'époque de production et d'émission des PCB correspond à celle du maximum des HAP et de métaux.

Dans l'immédiat, l'emploi d'un détecteur d'HAP n'est pas envisagé (pas de disponibilité sur le marché de la location). Nous avons testé cette approche au moyen du suivi des métaux par fluorescence X portatif. L'appareil de fluorescence X portatif (Field Portable X-ray fluorescence) permet de mesurer qualitativement un ensemble d'éléments métalliques (Pb, Zn, Cu, Fe selon la gamme des concentrations attendues) directement sur le terrain en quelques minutes, sur le sol ou le sédiment.

<sup>5</sup>Adaptive Sampling and Analysis Programs (ASAPs) 2001 -Characterization, Monitoring, and Sensor Technology Crosscutting Program and Subsurface Contaminants Focus Area. U.S. Department of Energy Office (DEO) of Environmental Management Office of Science and Technology

### 3. Elements de connaissance relatifs à la zone d'accumulation

#### 3.1. HISTORIQUE DE LA CONSTRUCTION DES STRUCTURES DES DIGUES ET EPIS ET EVOLUTIONS CONSTATEES

L'objectif des aménagements Girardon est de maintenir un chenal caractérisé par un mouillage et des vitesses d'écoulement compatibles avec la navigation. Le principe général est de composer avec le profil naturel du cours d'eau (succession seuil / mouille) sans chercher à obtenir une pente régulière de la ligne d'eau (profil impossible à obtenir dans un cours d'eau à fond mobile). Pour atteindre ce but, différents types d'aménagements ont été mis en place, chacun ayant une fonction propre.

La digue longitudinale est placée dans une concavité, elle dessine une berge ayant un rayon de courbure compatible avec la navigation. Elle fixe également le chenal en son pied et ferme l'alimentation des bras secondaires en basses eaux. Elle est complétée par des épis en rive convexe qui dessinent une plage en pente douce. Un talweg compatible avec la navigation est donc maintenu en place entre ces deux types d'ouvrages.

Les tenons ou traverses relient la digue longitudinale à la berge originelle. Ces ouvrages ont pour but de casser les vitesses en arrière de la digue afin d'éviter qu'un nouveau chenal ne se forme lors des submersions de la digue. Ce sont ces structures (digues longitudinales et traverses) qui sont appelées casiers de nos jours.

Enfin des épis noyés finissent de dessiner le chenal et évitent le surcreusement de ce dernier ce qui entraînerait une baisse de la ligne d'eau sur la mouille amont et une augmentation de la chute sur le seuil amont. Ils permettent également de fixer l'orientation du seuil afin qu'il soit compatible avec la navigation.

Historiquement, la zone de l'île de la Gravière était une zone d'alluvions actuelles et récentes du Rhône (formation géologique Fz de la vallée du Rhône). Située en zone «externe» par rapport au lit du fleuve dans les années 1860, ces alluvions ont été soumises à une forte érosion qui accompagnait le déplacement latéral (en rive gauche) du Rhône.

Sur le site d'étude les aménagements ont été réalisés à des dates différentes (Illustration 11). Dans les années 1880 une digue longitudinale submersible (appelée digue des graviers) et des premières traverses ont été construites pour limiter cette érosion latérale. Pour compléter l'effet de cette digue, des épis noyés ont été installés en 1885. Un deuxième jeu d'épis et de traverses est ensuite mis en place entre 1903 et 1906.

L'historique du comblement de ces casiers est donc a priori intéressant vis-à-vis de notre problématique. Mis en place à l'aube des années 1910, **ces casiers ont potentiellement été l'objet d'une sédimentation sur toute la période d'émission de PCB dans l'environnement.**

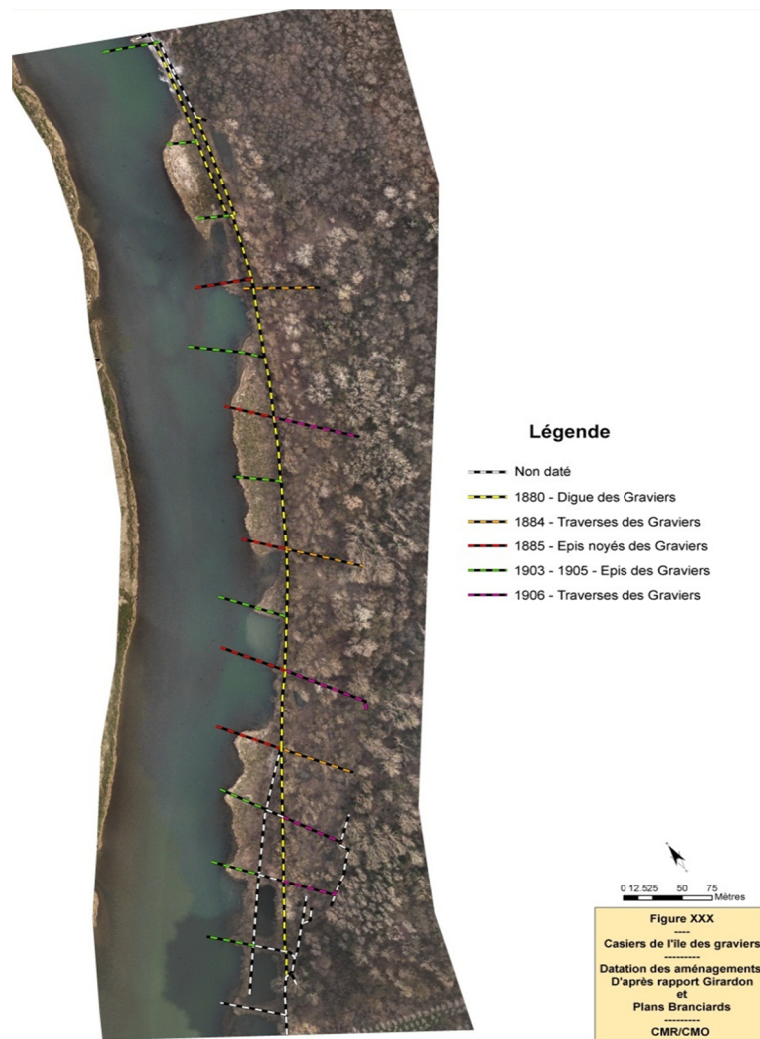


Illustration 11 : Historique de la construction des casiers.

## 3.2. ETUDE DIACHRONIQUE

L'étude des différents fonds documentaires (cartographies, photos aériennes, levées topographiques) permet de retracer l'évolution géomorphologique (via l'occupation du sol) des casiers de l'île des graviers.

### 3.2.1. Analyse spatiale

#### ➤ Ensemble des casiers

Le tableau suivant (Tableau 3) présente l'évolution en pourcentage de l'occupation du sol des casiers de l'île des graviers (4.6 ha) entre 1911 et 2009. L'Annexe 3 et l'Annexe 4 illustrent et synthétisent cette évolution.

Date	Eau	Forêt	Graviers	Prairie	Pionnier
1911	70	28	2	0	0
1938	59	39	2	0	0
1948	67	33	0	0	0
1949	54	32	14	0	0
1958	68	30	0	2	0
1971	67	33	0	0	0
1978	38	41	20	0	0
1983	13	65	4	0	18
1998	4	94	0	0	2
2009	4	96	0	0	0

Tableau 3 : Pourcentage d'occupation du sol sur l'ensemble des casiers de l'île des Graviers.

**1860** : La carte de 1860 établie par les Ponts et Chaussées représente le Rhône avant les aménagements type Jacquet, Girardon. Elle sera par conséquent peu utilisée dans le cadre de cette étude. Son observation permet néanmoins de connaître la position de la berge en 1860 sur le secteur d'étude. A l'époque elle était soumise à un fort phénomène d'érosion dû à sa position dans la concavité. L'érosion latérale a conduit à son recul de l'ordre de 110 m entre 1860 et 1911.

**1911** : Le plan dit Branciard au 1/2000<sup>ème</sup> est la référence historique de cette étude. Il est très précis et présente notamment des cotes altitudinales. En revanche, ce plan ne donne pas d'indications sur la nature de l'occupation du sol (hormis les bancs de sable ou de graviers). En conséquence, c'est le haut de berge qui sert de berge de référence et qui définit la limite spatiale de l'enveloppe d'étude. La limite ouest étant représentée par la digue. En 1911 l'ensemble des casiers est largement en eau (70% contre 28% pour la forêt). Néanmoins la berge a déjà commencé à progresser et quelques dépôts (probablement de sables) sont présents.

**1938 à 1971** : Durant ces années, l'occupation du sol des casiers est relativement stable. La forêt occupe entre 30 et 39 % de la zone d'étude. La photo de 1948 laisse voir des brèches dans la digue et les épis qui induisent des entrées d'eau assez vives dans les casiers. La photo de 1949 prise à l'étiage est intéressante car elle montre la présence des bancs de sable ou de graviers au fond du casier. Les casiers étant inondés la majeure partie de l'année, la végétation ne s'installe pas sur ces bancs.

**1978** : La photo aérienne de 1978 présente l'état de la zone d'étude lors de mise en service de l'aménagement et de la coupure du Rhône. Les bancs de 1949 sont toujours présents. La forêt a peu progressé (41%). Chaque casier présente des zones en eau de superficie encore relativement importante (38%).

**1983** : Cette photo montre nettement la colonisation des bancs (maintenant exondés la majeure partie de l'année) par les espèces pionnières et notamment les saules. La superficie en eau se réduit fortement (13%) sous l'effet de la sédimentation qui est favorisée par la diminution de l'énergie dans les casiers (diminution des débits de crue et disparition des petites crues fréquentes). De plus, l'installation de la végétation favorise la décantation des matières en suspension. La forêt occupe dorénavant 65 % de l'espace étudié.

**1998-2009** : A partir de 1998 la progression de la forêt est complète et l'ensemble de l'espace est colonisé (94%). Quelques mares subsistent à l'aval des épis sur des zones de dissipation de l'énergie. En 2009, les mares restantes voient leur surface se réduire encore.

➤ Analyse à l'échelle du casier n°2

Une analyse plus poussée permet, au sein du casier n°2, d'observer la position de la berge au cours du temps au regard des évènements hydrologiques. Elle permet également de mesurer la surface d'érosion et / ou d'accrétion durant ces différentes périodes. L'Annexe 5 présente l'évolution diachronique de la berge au sein du casier n°2.

L'évolution de la structure interne du casier sera mise en relation avec les différents débits rencontrés sur la période. Voici le détail de la signification des débits utilisés :

- En deçà de 600 m<sup>3</sup>/s les casiers sont déconnectés du fleuve,
- A partir de 600 m<sup>3</sup>/s début de déversement par les brèches les plus basses,
- A partir de 800 m<sup>3</sup>/s déversement généralisé,
- A partir de 1600 m<sup>3</sup>/s submersion totale des digues,
- 2650 m<sup>3</sup>/s : crue quinquennale<sup>6</sup>,
- 3100 m<sup>3</sup>/s : crue décennale,
- 5300 m<sup>3</sup>/s : crue centennale.

Ces données sont issues du croisement du profil en long de la digue avec la courbe Q/h (débit/hauteur) avant aménagement du secteur d'étude. Ces différentes classes de débits vont donc influencer différemment la structure interne des casiers. Suivant les forces tractrices induites par ces débits, différents phénomènes peuvent s'enchaîner au cours du temps. A titre d'exemple on pourra citer :

- Dépôts de matériaux fins externes au casier par sédimentation (sables et limons),
- Remaniement des matériaux fins au sein du casier,
- Erosion et exportation des matériaux fins,
- Erosion des matériaux fins accumulés en berge,
- Remaniement des matériaux grossiers du casier (matelas alluvial).

Ces phénomènes sont influencés par la puissance et la durée des crues. Ils seront par conséquent profondément modifiés lors de la mise au débit réservé.

Le Tableau 4 présente l'historique des chroniques de débits en relation avec les périodes étudiées (nombre de jours total pour chaque classe de débit). Le Tableau 5 présente ces données ramenées en nombre de jour par an pour chaque période considérée.

---

<sup>6</sup> Les débits associés aux crues quinquennale (récurrence tous les 5 ans), décennale (récurrence tous les 10 ans), centennale (récurrence tous les 100 ans) sont le fruit d'une analyse statistique des débits. Dans les faits, ces débits peuvent être rencontrés beaucoup plus ou moins souvent.

Débits	01/1920- 07/1938	10/1938- 05/1948	06/1948- 05/1958	05/1958- 12/1971	09/1971- 06/1978	06/1978 - 08/1983	08/1983 - 12/1998
<600	1625	1170	1277	1549	857	1656	5207
600-800	1187	800	671	865	442	44	124
800-1600	2657	1127	1206	1637	757	125	231
1600-2650	1067	408	396	772	265	52	59
2650-3100	135	63	58	72	37	4	5
3100 - 5300	86	53	61	22	26	0	0
>5300	0	0	0	0	0	0	0
maximum	3450	4730	5060	3550	4010	3 100	2761

Tableau 4 : Chronique des débits classés.

**Période 1911 – 1938 :**

Cette période marque les premiers impacts des aménagements Girardon sur la morphologie du secteur. L'érosion très active observée entre 1860 et 1911 est stoppée très rapidement puisqu'en 1938 la berge a déjà progressé d'une quinzaine de mètres (soit environ 1100 m<sup>2</sup> de progression). Ce phénomène est la réponse directe et rapide de l'hydrosystème face à une modification radicale d'une de ses composantes (baisse des forces tractrices en berge par chutes des vitesses grâce à la digue longitudinale et aux tenons). Cette période est marquée par une nette dominance des débits entre 800 et 1600 m<sup>3</sup>/s. On notera également quelques crues de moyenne importance (max 3450 m<sup>3</sup>/s).

**Période 1938 – 1948 :**

En 10 ans, l'évolution de la berge est bien moins marquée que lors de la période précédente. L'amont du casier est marqué par un recul de la berge de moins de 10 m. L'érosion semble être dominante à cette période (600 m<sup>2</sup> contre 80 m<sup>2</sup> d'accrétion). La chronique hydrologique de cette période présente également une dominance des débits moyens. Les crues sont du même ordre de grandeur mais le maximum enregistré est supérieur de 1000 m<sup>3</sup>/s par rapport à la période précédente. Cet événement hydrologique important est peut-être à l'origine des érosions de berge constatées.

**Période 1948 – 1958 :**

Lors de ces 10 années, la berge n'évolue pas. Les modifications observées ne sont pas suffisamment significatives au regard des incertitudes liées à la méthode de travail. Le rapport accrétion (150m<sup>2</sup>) / érosion (180m<sup>2</sup>) proche de l'égalité permet de qualifier cette période comme stable. L'hydrologie est encore similaire à la période précédente.

**Période 1958 – 1971 :**

Autre période de relative stabilité, le casier semble néanmoins dominé par l'érosion bien que les largeurs concernées soient faibles (<10m) et restent peu significatives. L'hydrologie est moins soutenue avec une fréquence de débit supérieur à 3100 m<sup>3</sup>/s plus faible et un pic de crue moins important (3500 m<sup>3</sup>/s).

### **Période 1971 – 1978 :**

Cette période est marquée par un retour vers des phénomènes d'accrétion plus marqué. En effet la berge progresse de 10 à 20 m sur l'ensemble du casier (1500 m<sup>2</sup>). La chronique hydrologique est similaire on remarquera le retour d'une crue supérieure à 4000m<sup>3</sup>/s.

### **Période 1978 – 1983 et 1983 - 1998:**

Cette période marque le deuxième évènement majeur du fonctionnement du fleuve sur le secteur par la construction des aménagements hydroélectriques.

Cette modification se traduit par :

- L'application d'un débit réservé de 20 m<sup>3</sup>/s toute l'année,
- L'effacement des crues inférieures à 1600 m<sup>3</sup>/s,
- La diminution des débits de crue de 1600 m<sup>3</sup>/s et plus.

Ceci se traduit par la poursuite et l'accélération des phénomènes d'accrétion (1900 m<sup>2</sup> pour 1978-1983 et 2700 m<sup>2</sup> pour 1983-1998).

En plus des modifications des débits de crue dont le rôle est assez difficile à appréhender, la mise au débit réservé favorise fortement le remplissage du casier.

En effet les dépôts sédimentaires (sables – graviers – galets) déposés dans le casier (par mouvement interne ou apport externe) sous formes de bancs plus ou moins hauts (cf. Annexe 3, carte de l'occupation du sol de 1978) se retrouvent exondés la majeure partie de l'année. Les formations végétales typiques des milieux pionniers alluviaux (cariçaies, phalaridaies, puis saulaies) se développent rapidement (cf. Annexe 3, carte de l'occupation du sol en 1978 et 1983). La végétation des berges est une variable de contrôle secondaire qui influence fortement le transit sédimentaire :

- Baisse de l'érodabilité des sols par la présence des systèmes racinaires bien développés.
- Augmentation de la décantation des matériaux fins transportés lors des crues suite au piégeage à travers la végétation.

La sédimentation fine étant favorable à l'implantation de la végétation, il se crée une boucle de rétroaction positive qui accélère le remplissage du casier.

Ainsi, en 20 ans (1978-1998) la surface colonisée par la forêt (4700 m<sup>2</sup>) est plus importante que la surface colonisée en 67 ans (1911-1978, 3000 m<sup>2</sup>).

Le tableau suivant (Tableau 5) présente les mêmes données de chronique hydrologique que le tableau précédent (Tableau 4) ramenées au nombre de jours/an.

Débits	01/1920- 07/1938	10/1938- 05/1948	06/1948- 05/1958	05/1958- 12/1971	09/1971- 06/1978	06/1978 - 08/1983	08/1983 - 12/1998
<600	88	118	127	115	131	321	338
600-800	64	81	67	64	68	9	8
800-1600	144	114	120	122	116	24	15
1600-2650	58	41	39	57	41	10	4
2650-3100	7	6	6	5	6	1	0
3100 - 5300	5	5	6	2	4	0	0
>5300	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 5 : Nombre de jour moyen selon les débits classés.

Ainsi nous observons à partir de 1978 :

- Une augmentation nette du nombre de jours par an de débits faibles (< 600 m<sup>3</sup>/s) qui sont maintenant présents quasiment toute l'année.
- Une diminution de 80 % des débits moyens (600 à 1600 m<sup>3</sup>/s),
- Une quasi disparition des débits de petites crues (1600 à 2650 m<sup>3</sup>/s),
- La disparition des crues fortes qui peuvent être susceptibles de remodeler profondément le casier.

### 3.2.2. Topographie

L'approche précédente nous renseigne sur l'évolution en plan du casier. Afin d'affiner la compréhension des processus de sédimentation, il convient de travailler sur l'évolution des altitudes du terrain naturel dans le casier. Peu de données sont disponibles, néanmoins on pourra s'appuyer sur les sources suivantes :

- Levés Branciard au 1/2000, présence de cotes essentiellement sur les digues et les berges,
- Levés avant travaux, cotes assez bien réparties sauf sur les zones en eau,
- Levé lidar réalisé en prévision de cette étude,
- Interpolation des mesures à la perche pour définir la cote du toit des graviers sur la zone d'étude.

L'exploitation de ces différentes sources de données permet de dresser des profils en travers. Ces profils sont calés sur les profils de carottages et sont présentés en Annexe 6.

Sur chaque profil sont présentés :

- Le profil du terrain naturel issu du Lidar,
- Le profil de la berge issu de la modélisation du plan avant travaux de 1971,
- Le profil du toit des graviers issu des sondages à la perche,
- La position de la berge au cours du temps,
- L'extrémité des épis,
- La position des carottes.

Le report de la limite spatiale où les sédiments n'ont pas bougé depuis 1938 permet d'émettre l'hypothèse que les sédiments situés dans cette zone en profondeur ne sont pas contaminés par les polluants (ou faiblement). Néanmoins sur les strates les plus proches de la surface, cette hypothèse ne peut être faite car le terrain a pu s'exhausser par sédimentation ultérieure une fois la zone hors d'eau et la végétation installée.

Ainsi, les carottes C4', C20, C24, C28 ne devraient pas présenter de PCB dans leurs strates inférieures.

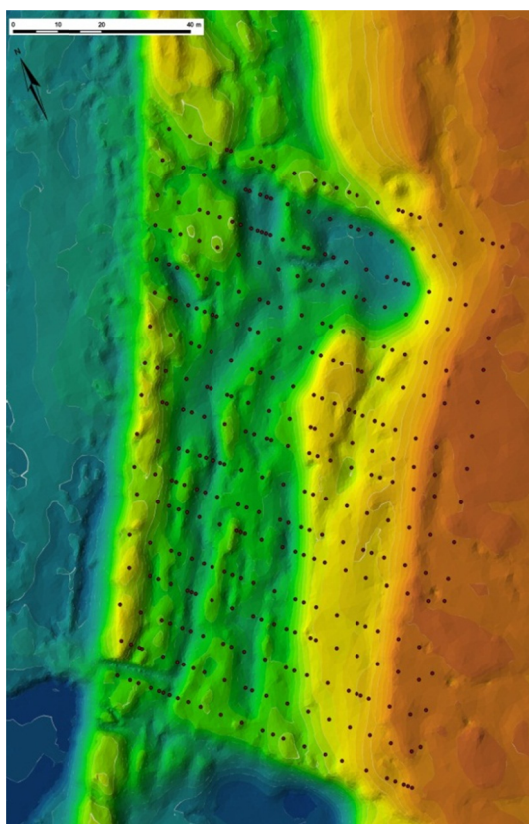
➤ Analyse des profils en travers (Annexe 6) :

La comparaison des profils de 1971 avec ceux de 2009 nous renseigne sur la fraction des dépôts qui se sont déposés entre ces deux dates. Du fait de l'absence de données sous l'eau en 1971, il faut prendre le plan d'eau de 1971 comme référence.

- Le profil A ne présente que peu de différences entre 1971 et 2009. Cette zone est toujours une zone de dissipation de l'énergie et semble être stable.
- Les profils B D G montrent une accrétion régulière et homogène sur l'ensemble du talus.
- Les profils C E et F présentent une accrétion de type bombement qui prend appui à mi-pente sur le talus existant.
- On remarquera la quasi absence de sédimentation sur le haut de berge.

➤ Modélisation 3D de la topographie :

La localisation de la profondeur du toit des graviers sous le terrain naturel a été réalisée à la perche. La figure suivante (Illustration 12) localise les points de sondages.



*Illustration 12 : Localisation des sondages à la perche.*

L'illustration 13 présente l'interpolation à l'aide du logiciel 3D analyst du toit des graviers et du terrain naturel d'après le levé Lidar. En comparant les deux modèles, on peut observer que la topographie de l'horizon graveleux est sensiblement différente du terrain naturel. Le toit des graviers s'exhausse vers la berge, sa topographie est marquée par une fosse sur la partie nord du casier (profil A). Cette fosse est très nette sur sa partie ouest à la jonction du tenon amont et de la digue longitudinale. Ces points bas sont probablement postérieurs aux aménagements et sont dus à la dissipation de l'énergie en crue lors des déversements par-dessus les tenons.

Le toit des graviers présente également un bombement médian dont l'amont est probablement issu du dépôt des matériaux arrachés en aval de l'épis. Ce bombement délimite avec la berge un « couloir » plus bas.

En ce qui concerne la topographie de surface, on retrouve le point bas en aval du tenon mais uniquement sur la partie est du casier, sur la partie ouest à l'endroit exact de la fosse, le terrain naturel présente un bombement bien marqué (cf. profil A).

Cette différence indique une modification au cours du temps du fonctionnement hydraulique puisque l'on passe d'une zone de forte érosion (aboutissant au creusement d'une fosse dans le plancher alluvial) à une zone de sédimentation (bosse sur le terrain naturel). La modification des débits lors de la mise en place de la dérivation peut-être à l'origine de ce phénomène. Il est également possible mais moins probable car non reporté dans l'historique des travaux et non visible sur le terrain que ceci soit dû au comblement d'une brèche dans l'épi.

La partie est peut-être considérée comme la berge actuelle, elle présente une pente relativement douce qui rejoint la topographie de la plaine. La moitié ouest présente un réseau de petits chenaux qui est la résultante des écoulements actuels dans le casier lors des crues.

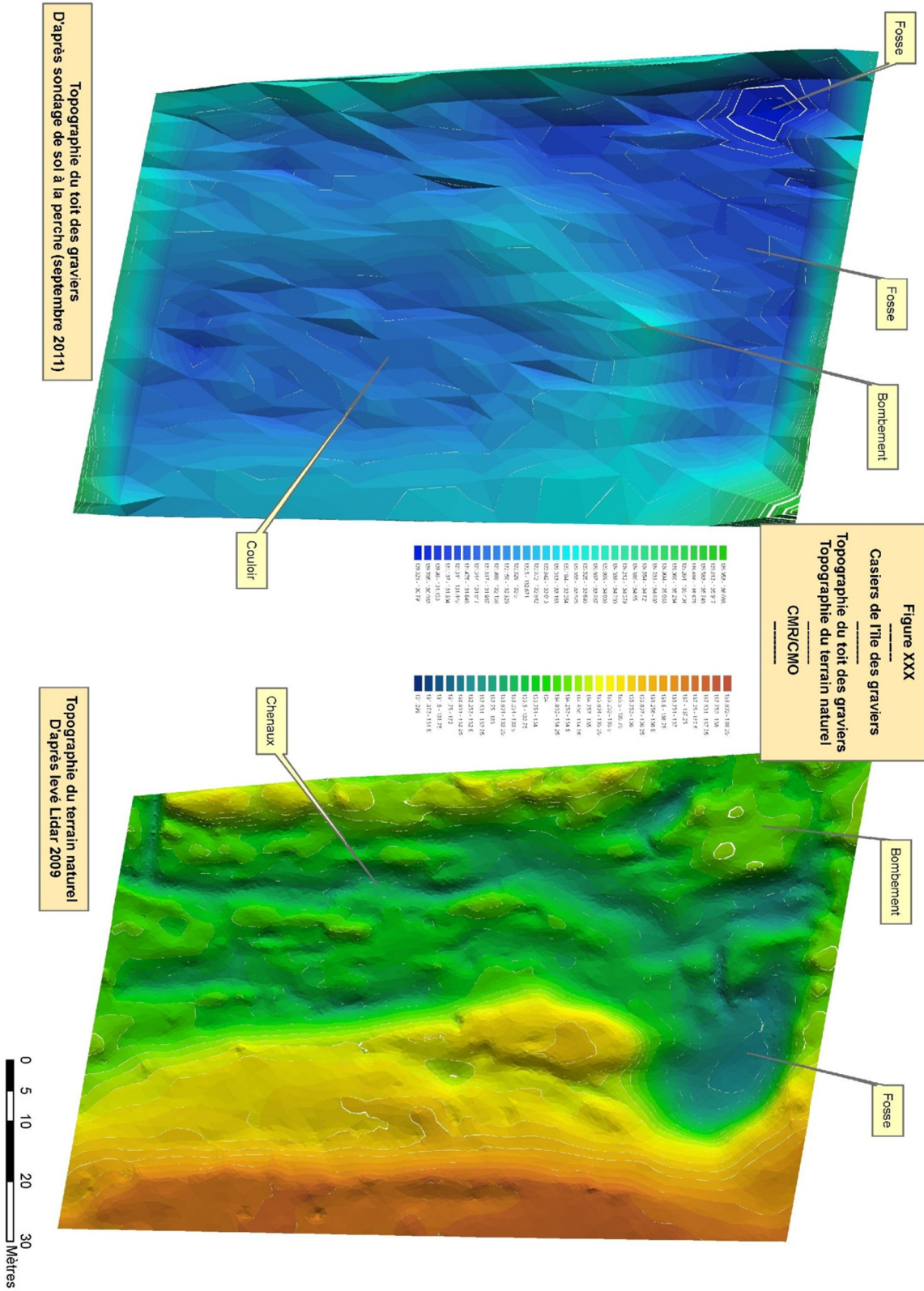
La comparaison des modèles de terrain naturel et du toit des graviers avec 3D analyst permet d'estimer le volume de sédiments fins dans l'emprise du casier à **20 000m<sup>3</sup>**.

La superposition de l'altimétrie du toit des graviers avec l'évolution de la berge et de l'occupation de sol au cours du temps permet d'observer :

- La berge de 1911 est située au niveau du pied du « talus » du toit des graviers.
- Les évolutions de faible ampleur lors de la période de stabilité relative de la berge (entre 1938 et 1971) se cantonnent au « couloir » situé derrière le bombement médian. Ce bombement est déjà présent et affleure sur la photo de 1949.

Lors de la période de comblement final du casier (post 1971), le « couloir » est la première zone à se remplir (Annexe 5: 1971 – 1978). Il est probable que cette zone soit protégée par le bombement en gravier qui « casse » les vitesses sur son aval et favorise les dépôts en aval.

La progression de la berge dès 1978 montre bien que la végétation s'appuie sur ce bombement lors de sa progression.



### 3.2.3. Conclusion et éléments de connaissance relatifs à la zone d'accumulation

L'analyse des documents historiques est riche d'enseignements sur l'évolution morphologique des casiers de l'île des Gravieres en général et du casier n°2 en particulier. L'important fond documentaire existant sur le Rhône depuis 1860 est une bonne source d'information et permet de relativement bien cerner ces évolutions. En revanche, s'il est aisé de raisonner en plan par la superposition des différentes couches d'informations, l'estimation des volumes mis en jeu passe par une comparaison de données altimétriques qui font défaut sur l'intérieur des casiers.

Les éléments suivants ont pu être mis en évidence dans le cadre de cette étude :

Trois périodes, caractérisées par des fonctionnements différents, peuvent être mises en avant depuis 1911 :

**Entre 1911 et 1938** : réponse rapide de l'hydrosystème aux aménagements Girardon. L'érosion forte et active observée entre 1860 et 1911 est remplacée par une accrétion nette de la berge. Dans un même temps on assiste au remaniement du toit des galets à l'intérieur du casier notamment par la dissipation de l'énergie lors des déversements. Cette énergie forme une fosse à l'aval du tenon, et les matériaux arrachés au fond se déposent un peu plus loin sous forme d'un bombement médian. Ce bombement aura un impact important sur le remplissage ultérieur du casier ainsi que sur l'installation de la végétation.

**Entre 1938 et 1971** : le casier présente une certaine stabilité et l'évolution du trait de berge est faible et variable dans le temps et dans l'espace.

**Entre 1971 et nos jours** : reprise des phénomènes d'accrétion et accélération suite au passage au débit réservé.

Malgré les petites périodes d'érosion entre 1938 et 1971, le retour au niveau de berge historique de 1911 n'a jamais été constaté.

Le croisement des informations en plan et en profil en travers, permet de comprendre les périodes d'accumulation des sédiments, périodes qui seront plus ou moins favorables à la présence de polluants en fonction de l'historique des apports.

**Cette démarche devra être faite en préalable avant une future caractérisation du stock de polluants au sein de casiers. Une fois l'historique de la pollution circulant dans ce tronçon hydrologique appréhendé, cette démarche permettra de bien cerner les zones potentiellement polluées et les zones potentiellement saines en fonction de la chronologie de sédimentation analysée au travers des avancées et des reculs de berge. Le plan d'échantillonnage mis en place à la suite sera donc désormais guidé et optimisé.**



## 4. Etude géophysique du casier

### 4.1. LE PRINCIPE DE L'ETUDE GEOPHYSIQUE MENE

La campagne de géophysique vise à « sonder » la structure interne du massif sédimentaire. Il est attendu qu'elle mette en évidence des structures sous-jacentes (telles que des alternances de couches, le toit des graviers, la forme des digues) qui éclaireraient la compréhension de la mise en place des différents dépôts formant le massif. La méthode employée est celle de la tomographie de la résistivité électrique.

La résistivité électrique<sup>7</sup> des roches, en l'absence d'accumulation massive de certains minéraux (certains sulfures, oxydes de fer, éléments sous forme métallique comme l'or, l'argent...) est presque exclusivement liée à la présence d'eau (et des ions qu'elle contient) dans les pores de la roche. Elle va donc dépendre de la résistivité de l'eau d'imbibition et de la quantité de cette eau contenue dans l'unité de volume de roche, c'est-à-dire du volume de pores et de la connectivité entre ces pores.

Dans le cas présent, le massif à caractériser est un dépôt détritique relativement meuble (non consolidé) de graviers, sables et argiles accumulés depuis moins d'une centaine d'année. Ce contexte ne laisse pas présager de présence de phases minérales pouvant être à l'origine d'une salinité spécifique (pas de gypse - sulfate -, encore moins de NaCl - chlorure -). La porosité du dépôt, en relation avec le volume d'eau, devrait avoir conservé son caractère primaire, c'est-à-dire similaire à celle qui a prévalu à sa mise en place. Cette porosité inter granulaire dépend du degré de classement des grains et de leur forme. Pour les granulométries les plus fines du dépôt, la taille des pores ne permet plus la circulation de l'eau, la connectivité est réduite voire absente dans le cas des argiles où l'eau est essentiellement de l'eau liée. Dans ces conditions, l'eau ne circulant pas, elle se charge d'ions, augmentant la conductivité (diminuant la résistivité).

La formation sous-jacente au dépôt, le substratum, de nature détritique également (alluvions fluviales récentes du lit majeur du Rhône - Fz -) mais plus ancienne, peut avoir une porosité primaire réduite sous l'effet de la compaction et de la cimentation entraînant également une charge de l'eau en ions et une diminution de la résistivité.

L'injection d'un courant d'intensité connue et la mesure de sa distribution, par le biais de différentes électrodes, nous donne ainsi une estimation de la résistivité apparente du sol. Le profil de résistivité électrique caractérise la capacité du courant électrique à traverser le milieu naturel et permet de mettre en évidence les structures en 2D perpendiculaires au profil tel que l'interface entre la zone d'accumulation sédimentaire et le « bedrock » ou des niveaux de granulométries distinctes.

Le principe détaillé de la tomographie de résistivité électrique est présenté en Annexe 7.

---

<sup>7</sup>La résistivité  $\rho$  d'un milieu est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à laisser passer le courant électrique. La résistivité est la résistance ohmique d'un cylindre de section et de longueur unitaire.  $R = \rho L/s$  avec R : résistance (ohm) et  $\rho$  : résistivité (ohm.m). La conductivité est l'inverse de la résistivité.

## **4.2. LA CAMPAGNE DE TERRAIN**

La campagne de mesures s'est déroulée du 22/08 au 25/11/2011 et a été effectuée par F. Mathieu et D. Lequin, géophysiciens de l'unité RIS/RSC du BRGM. Cette équipe a reçu l'appui de C. Mora (CNR) et de B. Clozel (BRGM).

### **4.2.1. Equipement**

- 1 SyscalPro (IRIS Instruments)
- 1 jeu de flûtes à 5m (6 bobines de 80m)
- Electrodes inox et câbles de connexion
- 1 niveau automatique Wild
- 1 micro-ordinateur portable

### **4.2.2. Travaux réalisés**

Les profils ont été acquis successivement selon différentes configurations de disposition d'électrodes (types dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger – cf. Annexe 7) pour optimiser la résolution des structures géoélectriques.

L'espacement entre les électrodes, la longueur du profil et la résolution recherchée ont été définis afin d'obtenir une investigation verticale d'environ 5 m sur l'ensemble du profil de pseudo section 2D. Trois panneaux électriques d'une longueur de 95,5m (3 dispositifs embrayés de 47,5m) ont été réalisés, avec un espacement entre les électrodes de 0,5m (Illustration 14).

Le nivellement des profils a été effectué avec un niveau automatique de chantier. L'espacement entre les stations est de 1m et la précision est de l'ordre du cm. L'altitude de référence a été prise sur la borne située sur l'abscisse 15m du profil P1.

La localisation en X, Y des extrémités des profils a été levée par la CNR avec un GPS différentiel.



*Illustration 14 : Photos illustrant l'installation du câble reliant les électrodes (espacées de 50 cm).*

### 4.2.3. Positions des profils

Les profils ont été choisis de façon à être approximativement perpendiculaires au cours du Rhône (Illustration 15). Pour aider au repérage, le profil P1 centre, a été positionné précisément au niveau du pK 54, 900, en profitant des bornes existantes le long du Rhône et plus en retrait à l'est sur la berge. Les deux autres profils ont été installés en amont (à 20 m, P2 amont) et en aval (à 35m, P3 aval), parallèlement au profil P1.

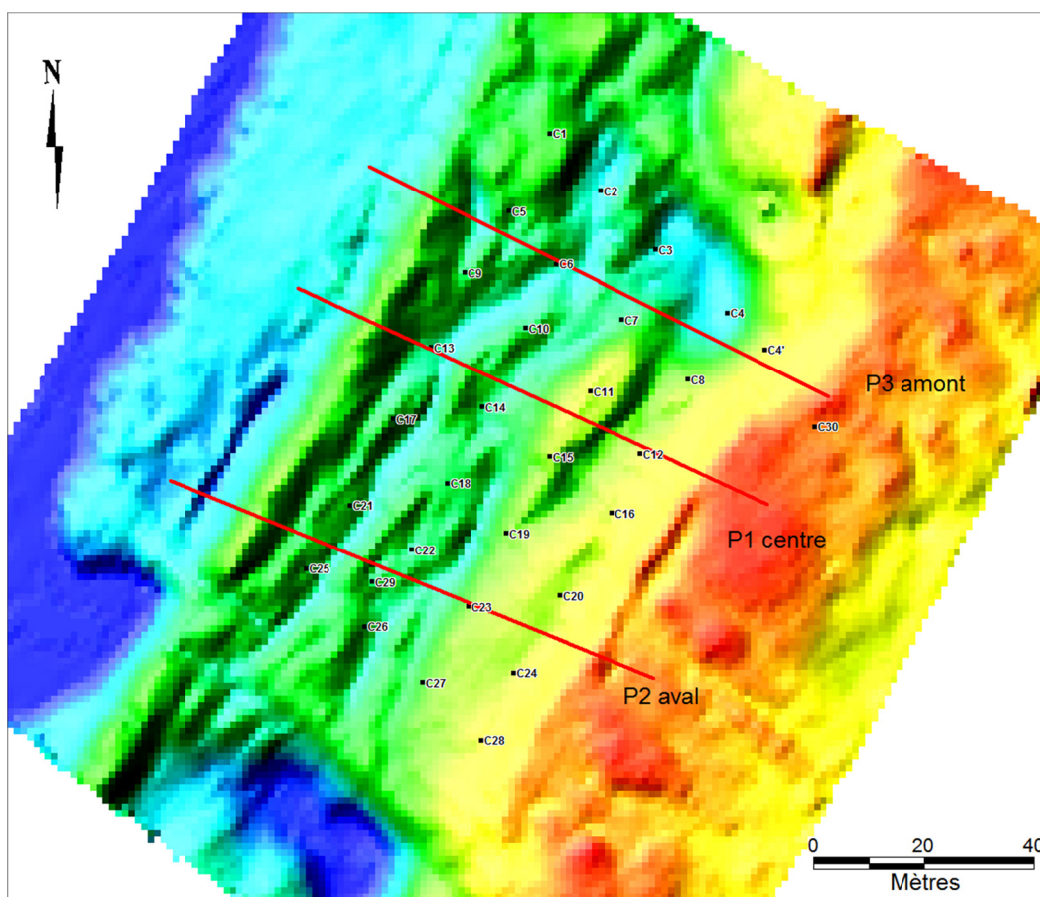


Illustration 15 : Position des trois profils géophysiques. Image Lidar de la topographie

## 4.3. RESULTATS DE LA CAMPAGNE GEOPHYSIQUE

### 4.3.1. Les pseudos-sections

Les pseudo-sections des trois profils (P3 amont -Illustration 16-, P1 centre -Illustration 17- et P2 aval -Illustration 18-) sont présentées avec une échelle de couleur qui met en avant les résistivités les plus faibles (conductivités élevées) avec des teintes rouge brique à rouge. La répartition des formations sédimentaires en groupes relativement homogènes en termes de propriétés électriques a été tentée, et des contours (trait noir continu) ont été proposés. Le niveau du toit des graviers est représenté par un trait rouge tel que déterminé par les mesures géophysiques et par un pointillé blanc tel que déterminé par les sondages à la perche.

Le niveau de la nappe est situé à la côte NGF : 131,5m à la date de l'expérimentation.

Enfin, une pseudo-section n'est pas égale à une coupe de résistivité et des profondeurs vraies du sous-sol, car elle intègre notamment le comportement électrique des matériaux situés latéralement à la pseudo-section.

Seul un calage basé sur les carottages et les descriptions sédimentologiques (dont granulométriques) associés permettent d'attribuer avec certitude la signification des résistivités observées mais quelques observations déterminantes peuvent déjà être établies sur la base des pseudo-sections établies selon les trois profils (P3 amont, P1 centre, P2 aval).

#### **4.3.2. La digue longitudinale**

La caractérisation géophysique au passage de la digue longitudinale (à gauche des pseudo-sections) montre d'une part, qu'il n'existe pas de contraste net de résistivité entre l'enrochement et le dépôt de sable sec qui est venu coiffer cette digue. Ces deux corps sont résistants ( $\rho > 500\text{ohm.m}$ ) ; Sur le flanc SE de la digue, un horizon conducteur est également présent ( $\rho < 400\text{ohm.m}$ , épaisseur 0,5m).

A cette période de l'année (août 2011), la nappe phréatique s'avère basse (cote NGF : 131,5m) et n'atteint que partiellement le massif sédimentaire considéré. Aussi, les différences de résistivités observées au-dessus de cette altitude ne seront que peu imputables à la présence d'eau de la zone saturée mais bien à des différences de nature entre les dépôts.

L'horizon conducteur du flanc SE de la digue est situé à environ 50cm sous la surface et a été traversé par les sondages à la perche, il s'agirait donc de sédiments fins et meubles ; L'enrochement ne serait donc présent que sur le flanc NW de la digue. Son épaisseur serait de l'ordre de 1,5 m et son emprise de l'ordre de 4 à 6 m. Il serait adossé à un relief pré-existant correspondant au lit mineur (basses eaux) du Rhône avant mise en place des épis. Cette géométrie de l'enrochement est donc différente de celles des épis perpendiculaires au Rhône.

C'est juste après cette digue longitudinale que sont observés parmi les points les plus bas du casier (mouille de près de 4 mètres), en particulier sur le profil amont.

#### **4.3.3. Les anciennes berges**

Les 3 profils électriques mettent en évidence des discontinuités nettes, qui correspondent précisément aux ressauts topographiques et qui correspondraient à différentes berges. Ces anciennes berges sont marquées par des interruptions brutales des différents horizons géoélectriques. L'amplitude de ces interruptions est relativement faible, de l'ordre de 0.5m mais est perceptible sur plusieurs mètres d'épaisseurs et semble traduire des coupures nettes dans le massif sédimentaire. Le positionnement de ces berges est présenté sur l'illustration suivante (Illustration 19). La berge 1 est visible sur la topographie et sur chacun des profils géophysiques. Les berges 2, 3 et 4 sont, elles, représentées par des segments de droite entre les points où elles sont identifiées sur chacun des profils.





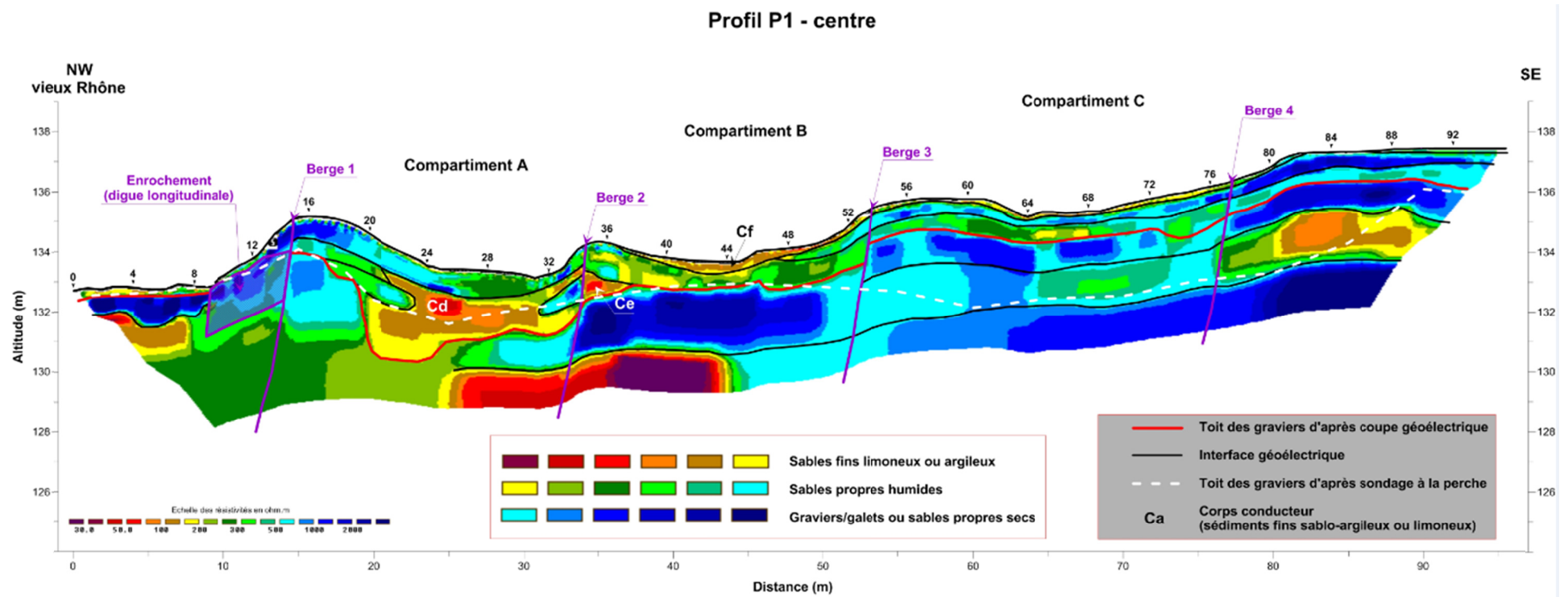


Illustration 17 : Pseudo-section du profil central

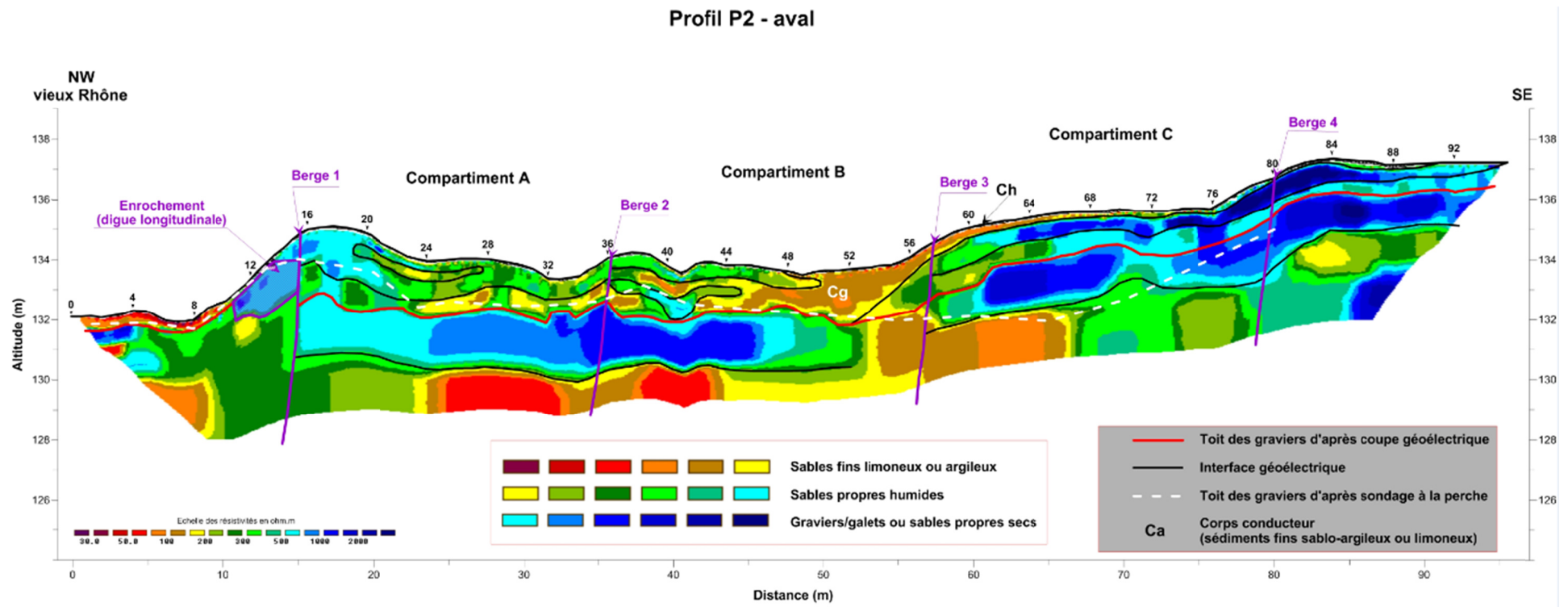


Illustration 18 : Pseudo-section du profil aval



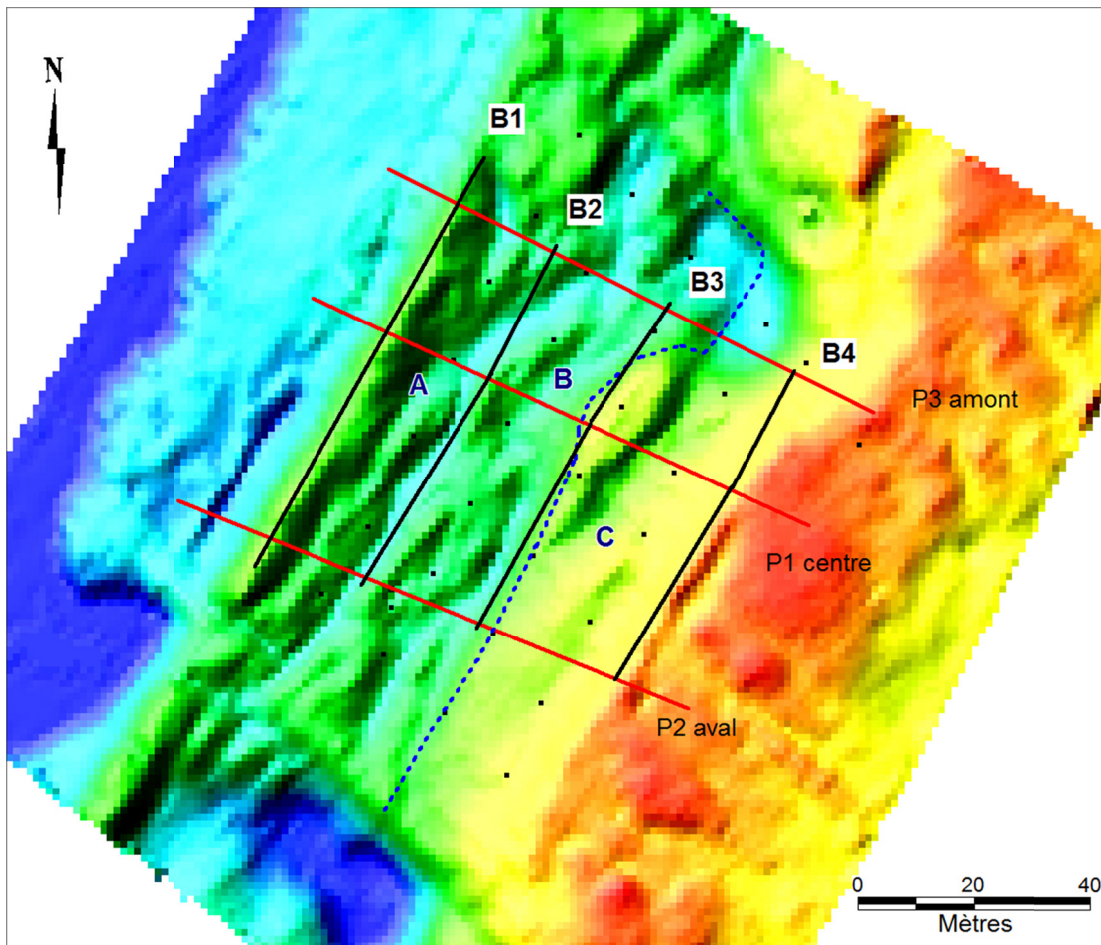


Illustration 19 : Représentation des berges visibles sur les profils géophysiques (tracés noirs). Image lidar de la topographie.

Ces interruptions sont comprises comme la signature de reprise majeure du massif sédimentaire lors de crues ou comme la manifestation de rupture de rythme d'accrétion du massif :

Berge 4 : bien visible sur les trois pseudo-sections, elle marque la limite avec la berge naturelle du Rhône développée dans la formation géologique des alluvions récentes du Rhône au moment de la construction des derniers épis Girardon. Cette berge géophysique est en parfaite corrélation avec un ressaut topographique sauf dans sa partie amont où la berge a subi et subit encore les turbulences liées à l'épi amont.

Berges 3 et 2 : situées à l'intérieur du casier, elles sont également en corrélation avec des ressauts topographiques. La berge 3, après confrontation avec les données issues de l'étude diachronique (représentation de la berge de 1978 en pointillé bleu sur l'illustration 19 précédente et les observations issues des carottes spécifiques), marque les modifications des conditions de dépôt suite à la mise en œuvre du barrage de Saint Pierre de Bœuf et le passage en débit réservé en 1978. Il n'a pas été trouvé d'interprétation à la berge 2.

Clairement mise en évidence sur les profils P1 et P2, cette corrélation avec la topographie est moins nette au niveau du profil P3 amont car celui-ci est implanté dans la zone de turbulence induite par l'épi amont.

Berge 1 : cette berge correspond à la digue longitudinale constituée d'un enrochement. Comme indiqué précédemment, au niveau de cette digue, les réponses géophysiques laissent supposer la présence d'une ancienne berge, antérieure à la mise en place des épis (berge du lit mineur du Rhône).

#### **4.3.4. Localisation du « substratum » (toit des graviers) à l'intérieur du casier**

A l'intérieur du casier Girardon les panneaux électriques mettent en évidence un empilement d'horizons géoélectriques de forme plus ou moins lenticulaire et alternativement résistants/conducteurs. En l'absence d'étalonnages, les hypothèses (essentiellement basées sur l'expérience) suivantes ont été retenues pour l'interprétation en termes de lithologie et de géométrie :

- Les horizons dont la résistivité est inférieure à 150 ohm.m correspondraient à des sables fins plus ou moins argileux ou limoneux.
- Les horizons dont la résistivité est comprise entre 150 et 500 ohm.m correspondraient à des sables propres humides ou saturés ;
- Les horizons dont la résistivité est supérieure à 500 ohm.m correspondraient soit à des niveaux de graviers/galets situés sous le niveau de la nappe ou dans la zone non saturée, soit à des horizons de sables propres situés au-dessus de la zone non saturée (zone sèche).

Le « substratum » du casier selon l'approche géophysique est caractérisé par un contact entre deux horizons électriquement différents. Cette interface doit correspondre au toit d'un horizon électriquement résistant profond.

La correspondance entre le toit des graviers/galets mis en évidence par les panneaux électriques et tel que déterminé par les sondages manuels à la perche n'est pas systématique, les limites et spécificités de chacune de ces méthodes peuvent expliquer ces distinctions.

Dans le détail cette correspondance est correcte sur les tronçons suivants :

- Sur le profil P1, dans le compartiment situé à l'est de la berge 4 et dans le compartiment B ;
- Sur le profil P2, dans le compartiment situé à l'est de la berge 4 et dans les compartiments A et B ;
- Sur le profil P3 amont, dans le compartiment situé à l'est de la berge 4 et dans le compartiment C et A (NB : la rectification des données perche qui correspondent aux données géophysiques n'a pas été répercutée sur l'illustration 16).

Les divergences entre les résultats des sondages à la perche et l'interprétation géophysique peuvent s'expliquer de plusieurs façons :

- Présence d'horizons de graviers de faible épaisseur (entre 5 à 10 cm) intercalés dans un dépôt de sédiments fins. Ces horizons peuvent occasionner un refus des sondages à la perche et ne pas avoir été mis en évidence sur la coupe géoélectrique du fait d'un manque de résolution de l'inversion à cette profondeur (cas du compartiment B du profil P3 et du compartiment A du profil P1) ;

- Certains horizons de graviers/galets ont pu être traversés par les sondages à la perche sans que l'opérateur n'enregistre de refus (cas des compartiments C des profils P1 et P2).
- L'hétérogénéité de la formation géologique des alluvions récentes du Rhône sous-jacente qui peut être aussi bien constituée d'horizons de limons que de sables et graviers, peut également compliquer l'interprétation des interfaces électriques.

Le toit des graviers tel qu'il a été défini par la géophysique présenterait dans la partie amont un approfondissement du SE (1m) vers le NW (2 à 3,5m) avec des ressauts de l'ordre de 50cm au niveau des berges 2 et 3. Dans la partie aval cette gradation serait moins importante, la profondeur du substratum passant de 1m au SE à moins de 2m au NW. Suite aux carottages, il apparaît néanmoins que les sondages à la perche ont été plus efficaces pour déterminer l'interface entre le toit des graviers et les sédiments (en particulier pour le compartiment C des profils P1 et P2) et l'approfondissement du SE vers le NW observé en géophysique n'est pas validé ; au contraire, le compartiment C constitue en fait la zone d'épaisseur de sédiment la plus forte. La confrontation avec les descriptions sédimentologiques des carottes n'a pas permis d'expliquer simplement la raison de ces différences d'interprétation.

#### **4.4. CONCLUSIONS DE L'ETUDE GEOPHYSIQUE**

L'étude géophysique du casier Girardon a permis d'apporter des informations sur la structure du massif sédimentaire. En particulier, elle démontre que les principaux ressauts topographiques sont accompagnés d'une structuration sous-jacente des horizons géoélectriques et ne sont pas qu'un « remodelage » de la surface du casier mais sont bien le fruit de processus physiques en relation avec la sédimentation au sein du casier :

- la berge 4 correspond à la zone d'attaque la plus ancienne des formations des alluvions du Rhône, avant la stabilisation et l'accrétion favorisées par les épis Girardon.

- la berge 3 a été pendant un temps interprétée comme une possible reprise du massif sédimentaire par une forte crue, la confrontation avec l'étude diachronique permet de montrer qu'il s'agit en fait de modifications des conditions d'accrétion de la berge (les vitesses de sédimentation qui seront déduites de l'étude des carottes de référence confortent également cette observation).

- la berge 1, sur laquelle la digue longitudinale s'appuie est un ressaut topographique historique.

Il n'a pas encore été trouvé d'interprétation pour la berge 2 identifiée sur les profils géophysiques.

Cette étude géophysique, en informant sur les structures sous-jacentes nous conforte dans l'intérêt de l'exploitation des données de la surface topographique qui ont un sens en termes de mise en place du massif sédimentaire. Les données LIDAR ont démontré leur efficacité pour cartographier la géomorphologie des vallées fluviales (Jones et al., 2007). Elles pourraient être exploitées plus systématiquement pour cerner ces évolutions.

L'étude géophysique ne s'est pas révélée infaillible pour distinguer le toit des graviers. Ainsi même si globalement les interprétations entre les données géophysiques et de sondages à la

perche se sont révélées concordantes, c'est le sondage à la perche qui a fourni les résultats les meilleurs, validés par les carottages, lorsque les interprétations divergeaient.

Enfin, les résistivités observées lors de cette étude (étude réalisée en août 2011) ne sont pas trop basses et sont compatibles avec l'emploi du radar géologique (GPR Ground penetrating radar) dont il serait intéressant de tester les capacités d'investigation sur ce type de massif sédimentaire.

## 5. Exploitation des analyses chimiques des sédiments, données non spatialisées

### 5.1. DESCRIPTION SEDIMENTOLOGIQUE PREALABLE

#### 5.1.1. Méthodes

La description sédimentologique des 30 carottes (soit 65,4m) a été réalisée par Gwenaëlle Roux du Lehna/IPE (Illustration 20) et est présentée en Annexe 8.

Les différents lithofaciès en présence sont décrits en renseignant la répartition granulométrique et le granoclassement (normal ou inverse<sup>8</sup>, quand il est visible), les évidences éventuelles de phénomènes physico-chimiques tels que l'oxydo-réduction et la nature des dépôts (présence de matière organique, paquets de sable, etc.). Cette description a été réalisée de manière très fine et précise (certaines couches ne dépassent pas le centimètre d'épaisseur), et des photos ont été réalisées de manière systématique sur chaque archive (Annexe 8, photos livrées dans CD joint). La couleur du sédiment est également renseignée selon le nuancier de Munsell.



*Illustration 20 : Ouverture et description des carottes par G. Roux.*

Pour faciliter la lecture de ces descriptions sédimentologiques en Annexe 8, le découpage ultérieur de ces carottes en échantillons de 30 cm, leurs teneurs en PCB et les résultats des analyses granulométriques sont présentés.

---

<sup>8</sup> Le granoclassement informe sur les conditions de dépôt. Un granoclassement positif ou normal se traduit par la diminution de la taille des grains avec le temps et indique une énergie de dépôt allant diminuant. Un granoclassement inverse ou négatif (particules les plus fines à la base devenant progressivement plus grosses vers le haut) traduit au contraire une montée en puissance de l'énergie de dépôt, comme celle qui accompagne un début de crue.