

Dynamique hydro-sédimentaire des annexes fluviales et caractérisation de leur capacité d'archivage

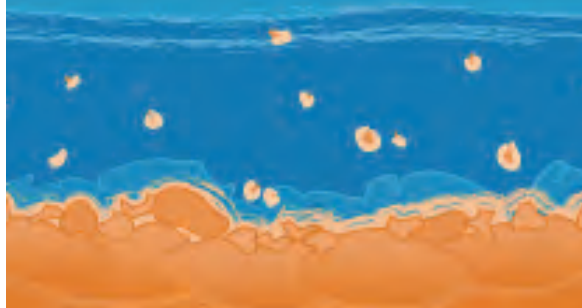
Version de janvier 2013



Observatoire
des Sédiments
du Rhône



2
0
1
2
S
E
M
E
S
T
R
E
6



Equipe projet et collaborations mises en place pour l'action 4 de l'OSR (2010-2013)

<i>Coordination générale</i>	<i>Coordination scientifique</i>	<i>Chercheur contractuel OSR (Auteur du rapport)</i>
<p>Yves Perrodin Directeur adjoint du LEHNA Responsable du site ENTPE du LEHNA Laboratoire LEHNA UMR 5023 CNRS/ Université de Lyon/ENTPE</p>	<p>Jean-Philippe Bedell Chargé de recherche, Laboratoire LEHNA UMR 5023 CNRS/ Université de Lyon/ENTPE</p> <p>Marc Desmet, Professeur, Université de Tours, Laboratoire GÉHCO</p>	<p>Brice Mourier Laboratoire LEHNA UMR 5023 CNRS/ Université de Lyon/ENTPE</p>
<i>Collaborations</i>		
<p>Ovidiu Ursache</p> <p>Stagiaire Master 1, Université de Tours, Laboratoire GÉHCO.</p>	<p>Barbara MALHER, Peter VAN METRE</p> <p>(USGS, Austin, Texas).</p>	<p>Gwenaelle Roux Ingénieur d'étude, Laboratoire LEHNA UMR 5023 CNRS/ Université de Lyon/ENTPE</p>

Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'un aménagement hydroélectrique au fil de l'eau (DIREN, 2008).....	10
Figure 2 : Sites de prélèvements, aménagements & tronçons hydrologiques.....	11
Figure 3 : Contribution hydrologique et topographique des principaux sous bassins versants du Rhône (modifié d'après CNR)	13
Figure 4 : Photos aériennes des sites d'études et localisation (cercle blanc) des sites de carottage	16
Figure 5 : Dispositif de prélèvement des carottes de sédiments couplant une embarcation de type Quadri-Raft avec ouverture centrale et un dispositif de carottage mettant en œuvre un carottier UWITEC.....	18
Figure 6 : Représentation du diagramme de Passega (1957 ; 1964) et interprétation des modes de dépôt et de transit des particules en fonction de la valeur des deux paramètres granulométriques (D50 et D99).....	19
Figure 7 : Triangle textural des sites dont le remplissage sédimentaire est majoritairement fin. Pour comparaison, les paramètres granulométriques de la carotte du lac de Paladru sont présentés.....	24
Figure 8 : Triangle textural des sites dont le remplissage sédimentaire est plus grossier et dispersé. Pour comparaison, les paramètres granulométriques des carottes de l'île de la Platière (PLA) sont présentés.....	25
Figure 9 : Profils granulométriques pour chaque annexe étudiée. Les cercles noirs correspondent au pourcentage de sable tandis que les cercles blancs correspondent au pourcentage de silt.....	26
Figure 10 : Représentation des paramètres granulométriques D50 et D99 pour l'ensemble des niveaux mesurés, toute annexe confondue. Les différents pourcentages de sables sont différenciés.....	28
Figure 11 : Représentation des paramètres granulométriques D50 et D99 pour chaque site. En noir sont représentés les points assimilés à une sédimentation fine, en rouge sont représentés les échantillons identifiés en tant que dépôt de crue. Les sites sont représentés dans l'ordre suivant de haut en bas sur la colonne de gauche puis celle de droite : ETL, MTE, GDL, CPX, TBR, BRE, ARS, GEC.....	29
Figure 12 : Interprétation des milieux de dépôt dans le diagramme de Passega, d'après Bravard (1983)	31

Figure 13 : Histogrammes et courbes de fréquence pour les sites ETL, MTE, GDL, CPX et TBR. En rouge sont représentées les données des incursions sableuses (crue), et en noir les niveaux à sédimentation continue.	33
Figure 14 : Histogrammes et courbe de fréquence pour les sites BRE, ARS, GEC et PAL. En rouge sont représentées les données des incursions sableuses (crue), et en noir les niveaux à sédimentation continue.....	34
Figure 15 : Profils d'activités massiques en ^{137}Cs (Bq/kg de MS) des 8 enregistrements sédimentaires.....	38
Figure 16 : Taux de sable en fonction de l'âge estimé par les analyses de radioéléments (^{137}Cs). Les crues majeures des 30 dernières années, par tronçons hydrologiques (Tableau 7), sont représentées en bleu.....	40
Figure 17 : Relation entre débits liquides post-1986 mesurés en station de Ternay 2, paramètres granulométrique (% fraction fine) et activités en ^{137}Cs du site de TBR.....	42
Figure 18 : Relation entre les événements de crue post 1986 mesurés en station de Viviers, paramètres granulométrique (D 50, μm) et activités en ^{137}Cs du site de GEC.	43
Figure 19 : Modèles d'âge-profondeur des 8 sites étudiés dans cette étude. A titre de comparaison, le modèle du lac de Paladru (PAL).....	46

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Comparaison physiographique du Rhône et de la Loire	9
Tableau 2 : Régime hydrologique détaillé du Rhône.....	12
Tableau 3 : Récapitulatif des sites étudiés & position précise	13
Tableau 4 : Moyenne des classes granulométriques associées à chaque site.....	22
Tableau 5 : Seuils de dépassement et décompte des événements de crue.....	28
Tableau 6: Synthèse des histogrammes et courbes de fréquence.....	35
Tableau 7 : Récapitulatif des crues majeures au sein des tronçons hydrologiques.....	39
Tableau 8 : Liste des marqueurs temporels utilisés pour construire un modèle âge-profondeur pour chaque site.....	44
Tableau 9 : Valeurs des taux d'accumulation sédimentaire (cm/an) dans le Rhône & autres hydrosystèmes.....	46

Table des matières

Résumé	6
Introduction	7
I. Site d'étude	8
1. Cadre général, caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques du Rhône.....	8
2. Définition des tronçons hydrologiques	10
3. Localisation des sites d'études	13
II. Matériel & méthodes	17
1. Échantillonnage	17
2. Analyses effectuées	18
a. Granulométrie et sédimentologie.....	18
b. Datation du sédiment	20
III. Interprétation et exploitation des résultats obtenus	22
1. Granulométrie et motifs de remplissage.....	22
2. Processus de dépôt	27
3. Granularité des dépôts	31
4. Teneurs en Radionucléides.....	36
5. Archivage des crues.....	39
6. Modèle âge-profondeur et taux d'accumulation sédimentaire des annexes fluviales étudiées	43
IV. Conclusion	47
Bibliographie.....	49

Résumé

Dans le cadre des différentes études concernant la pollution du Rhône par les PCBs, une campagne de carottages menée entre 2008 et 2012 selon un axe amont-aval a permis de prélever de nombreuses carottes dans différents types d'annexes fluviales. Des analyses sédimentologiques multiproxys ont été réalisées sur chaque site : granulométrie laser à haute fréquence d'échantillonnage, datation par spectrométrie gamma, spectrophotométrie.

Les modèles d'âge mettent en évidence un remplissage qui remonte entre 1960 et 1980 selon l'annexe, car les taux d'accumulation étant variables d'un site à l'autre, et ce, en raison de la typologie de l'annexe. Les taux d'accumulation calculés varient entre 1,5 à 6,9 cm/an. Les données granulométriques permettent de mettre en évidence une archive sédimentaire à dominante silto-argileuse avec des incursions de sable identifiées comme des apports engendrés par les crues majeures du Rhône et de ses affluents. Les motifs de remplissage sont, en revanche, très variés et dépendent de plusieurs facteurs tels que la connectivité avec le chenal principal, les aménagements et la sensibilité de l'annexe quant à l'archivage des crues. Plusieurs sites ont une sédimentation continue peu perturbée, tandis que d'autres possèdent une capacité d'archivage des crues, permettant d'affiner des modèles d'âge.

Ce travail fournit une nouvelle typologie des sédiments du Rhône par grands tronçons hydrologiques, et intégrant le mode de remplissage des annexes fluviales. Cette typologie sera notamment utile pour la caractérisation, à l'échelle du fleuve, des relations entre les dynamiques sédimentaires, et la répartition spatio-temporelle des polluants.

Introduction

En raison des nombreuses agglomérations et activités industrielles, situées le long de son bassin versant, le Rhône est soumis à une multitude d'émissions anthropiques (contaminants métalliques, organiques, émergents) potentiellement dangereuses pour les écosystèmes. La prise de conscience effectuée au cours du XXe siècle quant à l'importance de ces émissions sur les hydrosystèmes, et aux risques qu'elles représentent, se traduit aujourd'hui par la recrudescence de recherches scientifiques visant à en quantifier le degré et l'étendue spatiale. Dans l'eau, la plupart des éléments présents à l'état de trace (dont les métaux), des polluants organiques persistants (POP) ont une forte affinité pour les matières en suspension (MES) et en particulier pour les particules les plus fines présentant une plus grande surface spécifique pour leur fixation (Viers et al., 2009). Si actuellement, des recherches sont entreprises pour consolider un réseau de mesure des flux de matières en suspensions et des polluants (Axe 2, action 6 de l'OSR) sur l'ensemble du bassin, les jeux de données sur le long terme ne sont pas disponibles. Ce manque de connaissance constitue potentiellement un handicap et un danger pour les écosystèmes aquatiques, et la santé humaine, notamment à travers la réactivation des stocks historiques contaminés présents sur l'ensemble du corridor. Une des manières pour palier à ce manque de données sur le long terme consiste à reconstruire des chroniques à partir d'archives sédimentaires naturelles prélevées en milieu fluvial (berges, plaines d'inondations, annexes fluviales). Les archives sédimentaires (ou carottes de sédiment) ont déjà été utilisées à de nombreuses reprises en milieu lacustre, peu de tentatives en milieu fluvial ont été réalisées, les reconstructions à partir de carotte requièrent des périodes de dépôts longues et une sédimentation continue (Babek et al. 2011).

L'utilisation des archives sédimentaires dans le but de reconstituer les tendances des contaminations a une longue histoire (Davis, 1980). Dans les hydrosystèmes, les matières particulaires peuvent s'accumuler de façon plus ou moins temporaire en fonction des divers processus de sédimentation et de remobilisation auxquels elles sont soumises (Meybeck and Vörösmarty, 2005). La charge solide peut notamment s'accumuler latéralement et verticalement sur les marges fluviales et les plaines d'inondation (Provansal et al., 2010 ; 2012). Lorsqu'ils sont bien conservés, ces dépôts sédimentaires, constitués au sein de

certaines marges alluviales, représentent alors des milieux intégrateurs de la qualité des flux solides ayant transité au cours du temps.

Nettement moins d'étude ont portées sur des séquences sédimentaires au sein des annexes fluviales toujours en eau (bras mort toujours en eau, retenue, darse, étang...). À l'exception des études utilisant des carottes prélevés dans des réservoirs (par exemple, Callender et Robbins, 1993; Mètre Van et al., 1997, Mahler et al., 2006), l'approche est rarement appliquée aux situations riveraines toujours en eau en raison de l'exigence de non perturbation des sédiments à l'échelle de temps d'intérêt, c'est-à-dire ici à l'échelle pluri-décennale. Les réservoirs créés par les barrages sur le Rhône ont été vidangés environ tous les trois ans (chasses de 1965 à 2003 et 2012) pour évacuer les sédiments déposés, et ne répondent donc pas aux critères d'archivage. Toutefois, dans un grand hydrosystème comme le Rhône, les sédiments peuvent s'accumuler sur de longues périodes dans des milieux autres que les réservoirs. Dans une étude récente effectuée sur 3 sites en amont et en aval de la ville de Lyon, nous avons montré que sur la base de leurs profils de radionucléides et d'autres marqueurs chronologiques, il est possible d'obtenir des séquences sédimentaires couvrant une période de 25 à 50 ans (Desmet et al., 2012). Dès lors, des études sur les modalités de remplissage des annexes fluviales offrent une perspective intéressante pour améliorer la notion d'archivage sédimentaire en milieu fluvial, là ou souvent, les données historiques n'existent pas.

Dans ce contexte, et compte-tenu des données disponibles, accumulées au cours des différentes campagnes de carottages évoquées ci-dessus, l'objectif de ce travail est de répondre à deux questions majeures pour la compréhension et la gestion du fleuve Rhône : (i) peut-on proposer une typologie des sédiments en fonction des grands tronçons hydrologiques en utilisant les remplissages sédimentaires des annexes fluviales (ii) quelle est la capacité d'archivage de ces milieux et sur quelle période de temps?

I. Site d'étude

1. Cadre général, caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques du Rhône

Le Rhône, avec une longueur de 810km est le quatrième plus long fleuve d'Europe derrière le Danube, le Rhin et le Pô. Il prend sa source en Suisse à 1753 m d'altitude, au Glacier de la Furka dans le massif alpin du Saint-Gothard et traverse le sud-est de la France avant de se

jeter dans la Mer Méditerranée. Son bassin versant d'environ 96 500 km² est caractérisé par une grande diversité tant au niveau géologique que hydrologique. Cette diversité confère au Rhône un régime hydrologique complexe regroupant trois composantes : glaciaire, nivale et pluviale. Compte tenu de cette triple alimentation, les apports du Rhône sont diversifiés et abondants tout au long de l'année avec un régime saisonnier assez régulier. Il est soumis à deux influences climatiques majeures : les pluies abondantes de la saison froide dues à la contribution du climat océanique d'une part, et les violentes pluies d'automne engendrées par le climat méditerranéen de l'autre (Racassi, 2008). Il existe également des crues ponctuelles à la fin du printemps ; elles correspondent au pic de fusion nivale dans les têtes de bassin versant.

Tableau 1 : Comparaison physiographique du Rhône et de la Loire

	Surface BV (km ²)	Longueur (km)	Q moyen (m ³ /s)	Q spécifique (l/s/km ²)
Rhône	96500	810	1700	17,6
Loire	117000	1013	931	8,0

Le Rhône est par ses dimensions le deuxième fleuve de France derrière la Loire, mais le premier en termes de débit (Tableau 1), toutefois son abondance relative (ou débit spécifique exprimé en l/s/km² égal au débit total rapporté à la superficie du bassin versant) le place au même rang que les grands fleuves tels que l'Amazone. La topographie du bassin versant du Rhône avec un relief élevé et accidenté, ainsi que le débit annuel important (1 700 m³/s en moyenne, jusqu'à 11 500 m³/s en crue) a conduit à la construction de nombreux aménagements hydro-électriques dès 1871, mais s'est intensifié surtout après la seconde guerre mondiale avec les aménagements de production hydroélectrique et nucléaire. Entre 1943 et 1986, 18 barrages à but hydroélectrique sont construits tout au long du Rhône associés aux aménagements liés à la navigation. La construction des barrages implique théoriquement un piégeage important de sédiments qu'il faut évacuer grâce à des chasses théoriquement triennales (la dernière a eu lieu en juin 2012, la précédente neuf ans plus tôt).

Dans son état naturel, le Rhône présente un style fluvial à chenaux multiples avec la présence de nombreuses îles et lônes ou bras morts. Les aménagements concernant la navigation et la production hydroélectrique ont évidemment altéré l'état naturel. Dans sa grande majorité, le style fluvial est aujourd'hui de type chenal unique rectiligne, ou sinueux. Il existe des bifurcations artificielles du lit du Rhône pour chaque retenue ou barrage construit : cette

bifurcation divise le cours d'eau en un Rhône court-circuité et un canal de navigation jusqu'à une restitution aval pouvant se situer à plus de 25 km de l'ouvrage hydroélectrique (Figure 1).

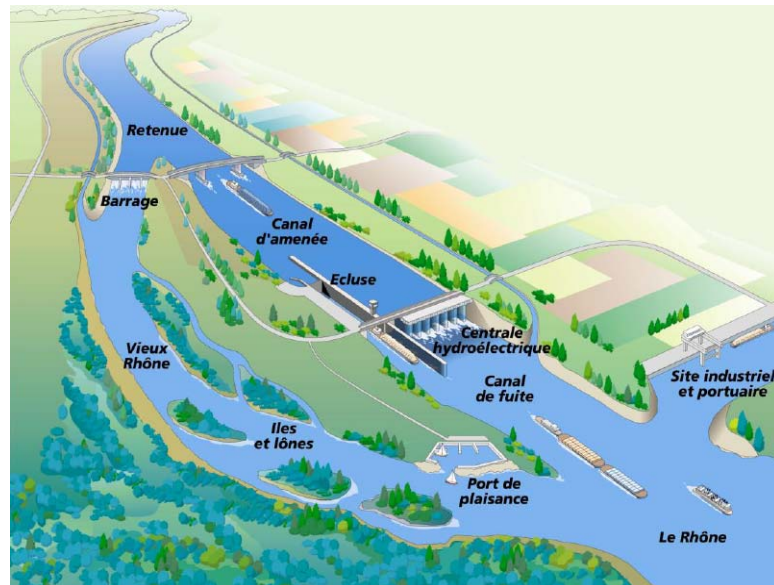


Figure 1 : Exemple d'un aménagement hydroélectrique au fil de l'eau (DIREN, 2008)

Les annexes fluviales, telles que les îlônes¹, représentent des sites de carottage privilégiés : en effet, les processus de dépôt et la nature des sédiments impliquent des phénomènes de décantation continus de matériel fin (silts et argiles majoritairement). Ces dépôts continus silto-argileux sont entrecoupés par des dépôts sableux liés à des apports de crues donnant des motifs caractéristiques dits en arête de poisson. Ces conditions optimales (hormis les apports sableux liés aux crues) justifient le choix des carottages dans les annexes fluviales type îlône.

2. Définition des tronçons hydrologiques

Au total huit sites ont été carottés sur l'ensemble du corridor rhodanien (Figure 2)

¹ Bras mort d'un fleuve, alimenté par infiltration ou en période de crue. Terme utilisé spécifiquement pour le Rhône, mais aussi étendu à certains de ces affluents (Isère par exemple)

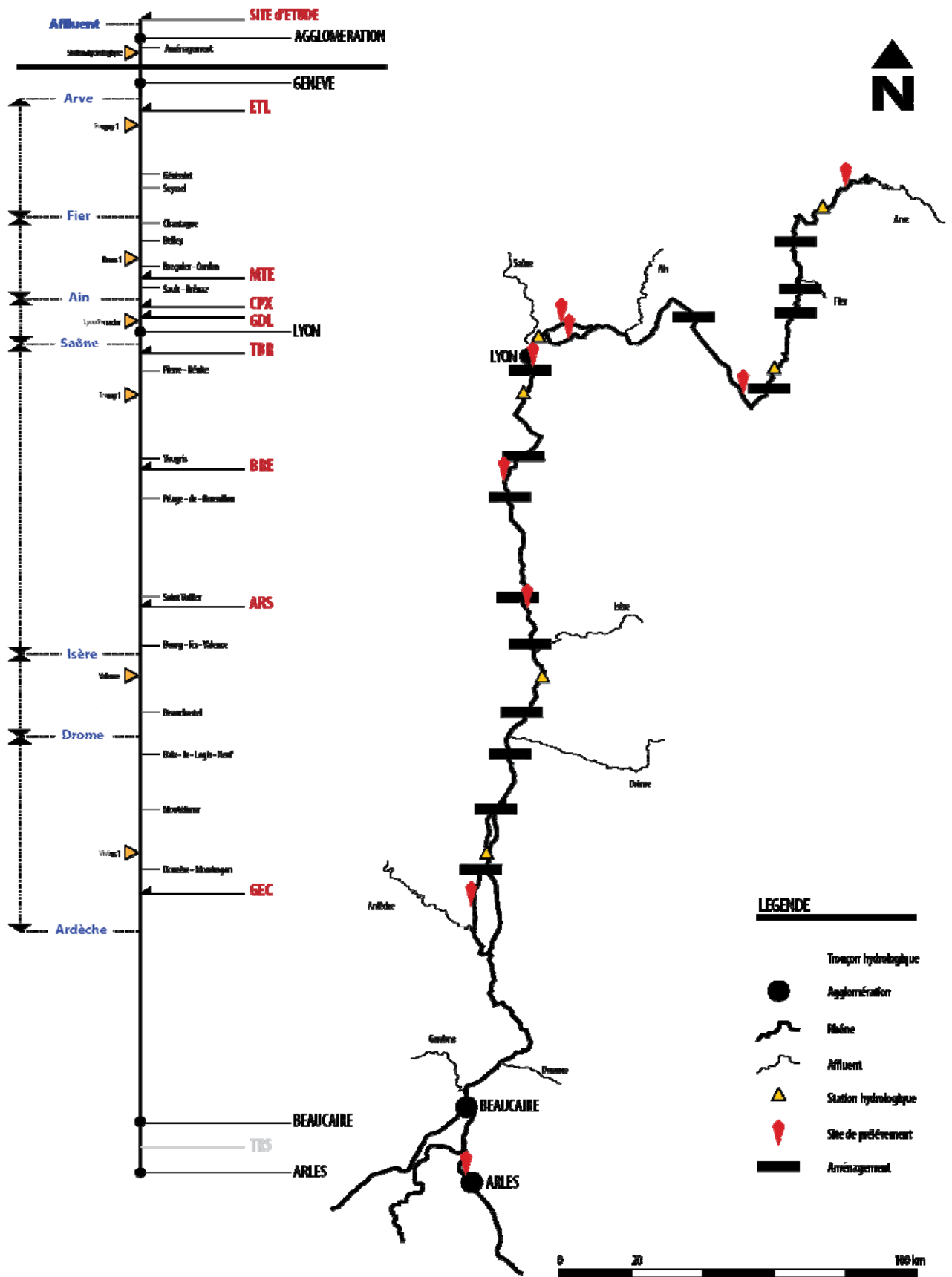


Figure 2 : Sites de prélèvements, aménagements & tronçons hydrologiques

Chaque emplacement est choisi de façon à être situé si possible à l'aval d'un des affluents majeurs du Rhône. De cette manière, six tronçons hydrologiques ont été définis entre le lac Léman et la confluence avec l'Ardèche afin de mettre en évidence une signature spécifique potentielle de ces affluents : Arve, Fier, Ain, Saône, Isère, Drôme, Ardèche.

Les flux liquides et solides de tous ces affluents contribuent de manière majeure dans le régime hydro-sédimentaire du Rhône (Tableau 2). Par exemple, le bassin versant de la Saône constitue la moitié du bassin versant du Rhône avant la confluence, tandis qu'en terme de débit liquide, en aval de la confluence le module annuel augmente de 40 %, passant de 600 à 1030 m³/s (Figure 3). Le module annuel proche du débit semi-permanent² démontre une régularité du régime hydrologique. La double influence climatique méditerranéenne et océanique (respectivement au sud et au nord du bassin versant) induit quatre types de crues : océaniques, cévenoles, méditerranéennes et enfin générales. Une importante base de données (Banque Hydro © MEDD/DE HYDRO) concernant le débit du Rhône a pu être compilée à différentes stations proches des sites étudiés entre les années 1980 et 2005.

Tableau 2 : Régime hydrologique détaillé du Rhône

	Secteur du Rhône					
	Aval confluence de l'Arve	Amont confluence de l'Ain	Amont confluence de la Saône	Aval confluence de la Saône	Aval confluence de l'Isère	Amont delta
Bassin versant (km ²)	10320	15320	20300	50560	66400	95500
Module annuel relatif (l/s/km ²)	32	30	30	20	21	18
Module annuel	335	455	600	1030	1400	1700
Débit semi-permanent	300	415	525	830	1210	1450
Étiage conventionnel	120	180	215	315	480	580
VCN30	90	120	175	235	330	395
Crue annuelle	700	990	1460	2765	3415	4280
Crue décennale	1200	1800	3100	4450	5600	8400
Crue centennale	1450	2400	4250	5900	7500	11300
Crue millénaire	1800	2950	5300	7300	9350	14150

² Débit moyen journalier dépassé six mois dans l'année

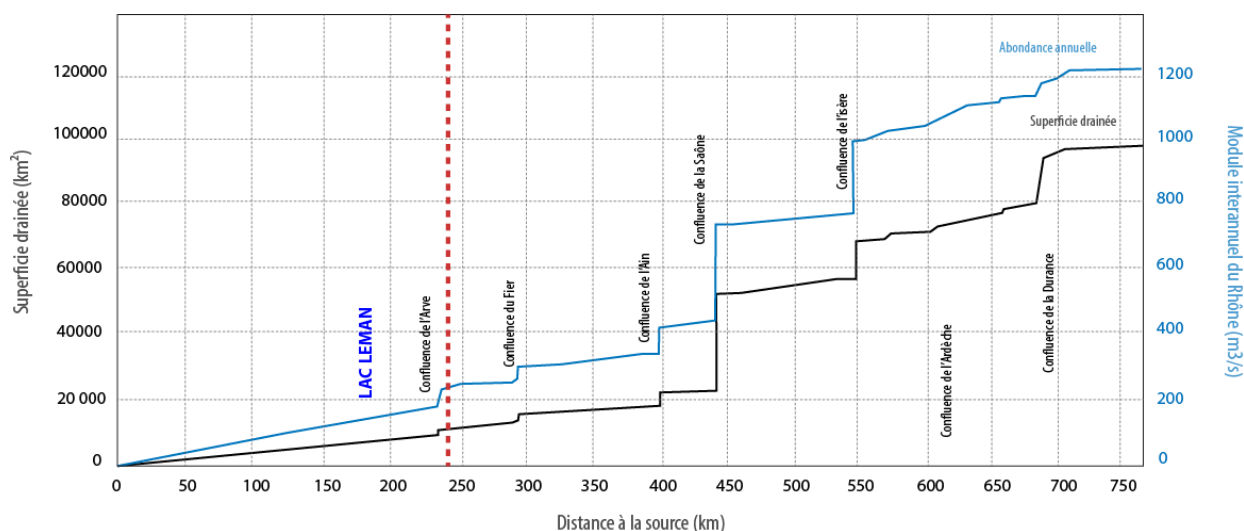


Figure 3 : Contribution hydrologique et topographique des principaux sous bassins versants du Rhône (modifié d'après CNR)

3. Localisation des sites d'études

Tous les sites étudiés sont récapitulés dans le tableau 3 et sur la figure 4. Aucun site favorable n'a été trouvé sur l'axe du Rhône entre l'Isère et l'Ardèche. Le dernier site carotté, situé dans la partie aval (avant Arles), n'est pas présenté dans ce rapport. Il est en cours d'exploitation.

Tableau 3 : Récapitulatif des sites étudiés & position précise

Nom	ID	Type d'annexe	Carottes	Prélèvement	X	Y
Étang des Eternels	ETL	Ancienne gravière, rive droite	2	Mars 2010	46°07'54.80"	5°56'08.17"
La Morte	MTE	Lône par connexion aval	5	Avril 2008	45°42'05.71"	5°33'14.58"
Grand Large	GDL	Plan d'eau, réservoir, bassin de décantation	2	Décembre 2009	45°46'42.43"	4°58'19.48"
Crépieux	CPX	Ancienne gravière, rive droite	4	Avril 2008	45°48'10.98"	4°54'58.73"
Table Ronde	TBR	Lône, vieux Rhône	2	Décembre 2010	45°37'37.72"	4°48'23.23"
Ile du beurre	BRE	Lône	3	Avril 2008	45°28'35.00"	4°46'55.46"
Barrage d'Arras	ARS	Retenue de barrage	2	Mars 2010	45°07'57.15"	4°48'26.31"
Grange Ecrasée	GEC	Lône, connexion amont	4	Février 2011	44°23'24.10"	4°39'20.90"
Mas des Tours (Ile de Saxy)	TRS	Casier Girardon	2	Juin 2012	43°43'30,6"	4°37'07.2"

La gravière des Eternels (5°56,24 E, 46°07,49 N) est située en amont de la confluence de la Valserine. Ce site (Fig.4a) se situe à quelques kilomètres de la frontière suisse. La retenue de Verbois (Suisse) et de Pougny (France) sont les seuls ouvrages impactant les flux solides et liquides. Dans ce secteur, la couleur laiteuse de l'eau témoigne des apports argileux (illite) provenant de l'Arve et drainant les glaciers du Massif du Mont-Blanc et du Haut-Giffre. Les données présentées proviennent d'une unique carotte (ETL 10-02) d'un diamètre de 90 mm et d'une longueur de 124 cm, prélevée le 8 mars 2010.

Localisé sur le haut Rhône, la lône de La Morte ($5^{\circ}33'18,5''$ E ; $45^{\circ}42'00,8''$ N) se situe à l'amont de l'usine de Brégnier-Cordon (mise en service en 1984), au niveau du méandre du Saugey (Fig.4b). Cette lône présente une connexion aval au Rhône, et est située à l'amont de la zone industrielle de Saint-Vulbas, source possible de contamination du fleuve. Le barrage de Brégnier-Cordon affecte la dynamique sédimentaire. Les données proviennent d'une carotte unique (MTE 08-03) d'une longueur de 66 cm et d'un diamètre de 60 mm, prélevée au cours du mois de mai 2008 dans l'axe médian de la lône.

Le décanteur du Grand Large ($4^{\circ}58'640''$ E ; $45^{\circ}47'051''$ N) est une retenue artificielle située en rive gauche du canal de Jonage, en amont de l'usine hydroélectrique de Cusset (Fig. 4c). Sur la figure 4c, on remarque très nettement qu'il s'agit d'un décanteur isolé du Rhône (par une série de palplanches) sauf sur sa partie très aval. Des activités nautiques existent depuis plus de 40 ans. En 2005, EDF a procédé à des curages en différents secteurs; il semblerait que la géolocalisation de ces sites de curages soit très imprécise puisqu'aux dires de pêcheurs professionnels, certains secteurs n'ont pas fait l'objet d'intervention. Les données proviennent d'une unique carotte (GDL 09-07), prélevée le 15 décembre 2009, d'un diamètre de 90 mm et d'une longueur de 55 cm, et ce dans un secteur non curé.

La darse de Crépieux ($4^{\circ} 55'058$ E ; $45^{\circ}48'175''$ N) est située au nord-est de l'agglomération lyonnaise, au niveau du champ captant de Crépieux-Charmy et en connexion avec le Rhône court-circuité de Miribel (Fig.4d). Le creusement de cette enclave, consécutif à l'extraction des granulats, date du début des années 1980. Les données présentées proviennent d'une carotte (CPX 08-02) d'un diamètre de 60 mm et d'une longueur de 94 cm carottes, prélevées en juillet 2008.

La reculée de La Table Ronde ($4^{\circ}47'59.8''$ E; $45^{\circ}36'37.7''$ N) correspond à une ancienne lône entièrement colmatée depuis la fin du Petit Age Glaciaire (Fig. 4e). Sur ce tronçon hydrologique, il a été particulièrement difficile d'identifier un site répondant aux critères listés en précédemment. A ce titre, le site est qualifié de « reculée ». Il est situé sur le Vieux Rhône, en aval du barrage de Pierre Bénite construit en 1967. Lors du prélèvement, nous avons pu constater l'existence d'une très grande connectivité hydraulique avec le Rhône. La carotte a été prélevée le 15 décembre 2009. L'ensemble des données proviennent d'une seule archive sédimentaire (TBR 09-01), d'un diamètre de 90 mm et d'une longueur de 123 cm.

La lône de l'île du Beurre ($4^{\circ}46'827''$ E ; $45^{\circ}28'483''$ N) est situé en aval du barrage de Vaugris (aménagement CNR de 1986). La lône de l'île du Beurre (Fig. 4f) est en eau depuis

le Petit Age Glaciaire mais la connexion amont a été interrompue suite au dépôt de déchets dans les années 1970. En 1984, la CNR procède à des travaux conduisant à la remise en eau de la lône par l'amont. Les données proviennent d'une carotte (BRE 08-03), d'un diamètre de 60 mm, prélevée en mai 2008.

En amont de l'agglomération de Valence, le site d'Arras ($4^{\circ}48,25$ E ; $45^{\circ}08$ N) est situé sur l'île construite à l'occasion de la mise en place du barrage d'Arras en 1973 (Fig. 4g). Il s'agit d'une masse d'eau uniquement connectée en aval vers le vieux Rhône. Les données proviennent d'une carotte unique (ARS 10-02), d'un diamètre de 90 mm et d'une longueur de 134 cm prélevée le 9 mars 2010.

La lône de la Grange Ecrasée ($4^{\circ}39'21.4''$ E ; $44^{\circ}23'23,2''$ N) est située sur la commune de Bourg-Saint-Andéol (07), en amont de la confluence de l'Ardèche (Fig. 4h). En amont du site de carottage, la lône se divise en deux bras dont l'un est connecté au Rhône. L'écoulement de la lône en période de crue se fait par l'aval au niveau d'un seuil situé à 2m au dessus du Rhône en période d'étiage. En 1986, la CNR a procédé à un recalibrage et à un reprofilage du lit, ainsi qu'à un terrassement de l'exutoire aval et un entonnement amont. Les données proviennent d'une unique carotte (GEC11-04) d'un diamètre de 90 mm et d'une longueur de 99,7 cm

Le site de carottage du Mas des Tours ($43^{\circ}43'30,6''$ N; $4^{\circ}37'07.2''$ E) se situe sur la commune d'Arles, environ 6 km en amont de la ville, au niveau de l'île de Saxy. La construction d'épis Girardon dans le chenal à la fin du XIXème siècle a favorisé les dépôts sédimentaires dans les secteurs étudiés et protège les berges de l'érosion. Si au sein de la zone, des processus d'érosion / dépôt se sont succédés depuis la création de l'aménagement, la zone de carottage reste peu touché par l'érosion depuis 1950 (Racassi, 2008). Les apports se font principalement via la connexion aval de la dépression. Les données proviennent d'une unique carotte (TRS 12-04) d'un diamètre de 90 mm et d'une longueur de 99,7 cm

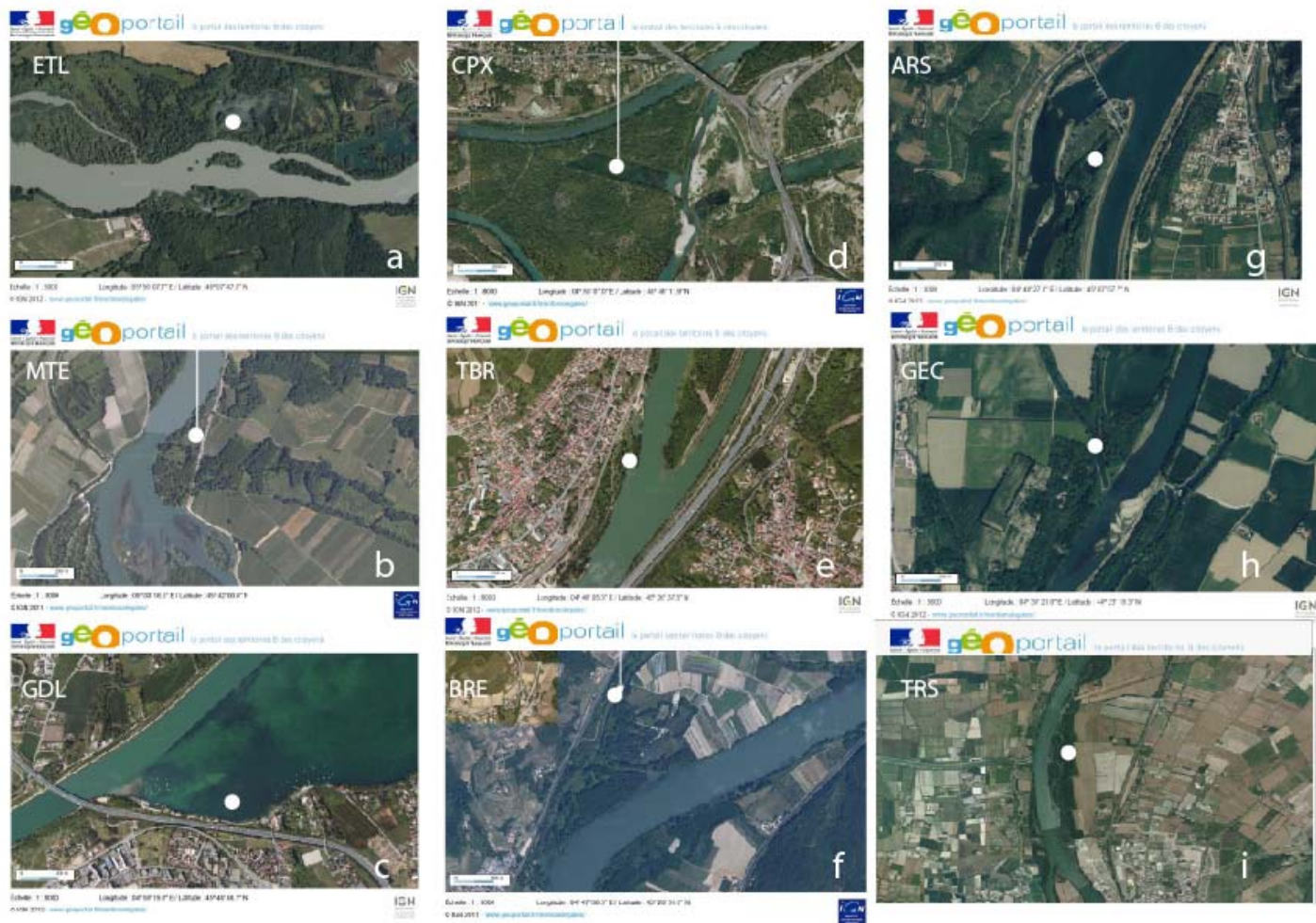


Figure 4 : Photos aériennes des sites d'études et localisation (cercle blanc) des sites de carottage

II. Matériel & méthodes

1. Échantillonnage

Les carottes ont été prélevées sous tranche d'eau à l'aide d'un dispositif mis au point dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Tours et l'ENTPE, couplant un carottier court de type UWITEC (avec liner en PVC transparent d'une longueur de 2 m et 90 mm de diamètre) et une embarcation quadri-raft (Figure 5). Le dispositif permet un prélèvement unique et se distingue donc des techniques de carottage, notamment celle par carottier à piston de type COBRA©, où plusieurs sections sont nécessaires.

Le carottage nécessite un site relativement peu bioturbé et de préférence sans végétaux. Le carottier est enfoncé manuellement grâce à une tige télescopique. Dans certains cas, un marteau disposé sur le carottier est actionné par un système de câbles facilitant la pénétration. La carotte est ensuite remontée à bord puis scellée afin d'éviter de perturber les sédiments. Pour préserver le contact eau-sédiment, on utilise de la mousse de fleuriste surmontée d'un bouchon en caoutchouc, ce dernier étant également utilisé pour sceller la base de la carotte. Compte tenu de la nature des sédiments, aucun système de maintien n'est utilisé (type « core catcher »), l'effet de succion suffit seul à maintenir le sédiment au sein du liner. Après prélèvement, les carottes sont maintenues en chambre froide et à l'obscurité avant et après ouverture.

Les carottes sont ouvertes puis décrites au laboratoire. Le liner est découpé longitudinalement de façon à obtenir deux demi-carottes à l'aide d'une scie à disque en diamant afin d'éviter des contaminations potentielles en métaux. Le sédiment est découpé au sein du liner à l'aide d'un fil de pêche ou deux plaques de polycarbonate ; les deux demi-carottes sont ensuite séparées et décrites. Le prélèvement de carottes de 90 mm de diamètre permet d'effectuer sur une seule archive l'ensemble des analyses nécessaire à notre étude (sédimentologiques, radiochimiques, minéralogiques, géochimiques, organiques et minérales).



Figure 5 : Dispositif de prélèvement des carottes de sédiments couplant une embarcation de type Quadri-Raft avec ouverture centrale et un dispositif de carottage mettant en œuvre un carottier UWITEC.

Dans un premier temps, des analyses sédimentologiques à haute résolution (c'est-à-dire tous les cm) sont effectuées en complément de la description stratigraphique visuelle. Ces mesures (dont la méthode est détaillée ci-après) incluent la granulométrie laser, la susceptibilité magnétique, la spectrophotométrie. L'interprétation de ces signaux permet d'affiner/modifier le pas d'échantillonnage pour les analyses chimiques (contaminants organiques, radionucléides) et de cibler l'influence des processus hydrosédimentaires sur le transport des contaminants. Ces dernières sont effectuées à un pas de 1 échantillon tous les 4 cm soit 25 échantillons pour une carotte de 100 cm.

2. Analyses effectuées

a. Granulométrie et sédimentologie

La répartition des différentes classes granulométriques est étudiée en continu et à haute résolution pour chaque site. Pour chaque demi-carotte, un prélèvement est effectué en profondeur tous les cm. Chaque prélèvement est analysé grâce à un micro-granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000 équipé d'une cellule de dispersion (intervalle de mesure comprise entre $0.02\mu\text{m}$ et $2000\mu\text{m}$). Chaque échantillon analysé vérifie une valeur d'obscurité comprise entre 10 et 20 % exclue, idéalement située autour de 13 %. Les échantillons sont dispersés pendant environ 1 min dans la cuve par ultrasons avant chaque analyse. Afin de réduire au maximum l'erreur de mesure liée à l'opérateur, toutes les mesures sont

préconfigurées dans un fichier SOP (mesure du bruit de fond, vitesse de la pompe, ultra-sons). Les données obtenues sont ensuite traitées sous Gradistat (Blott, 2000) qui fournit la médiane (classe granulométrique la plus représentée), l'asymétrie de distribution ainsi que le classement des particules. Les données granulométriques sont également analysées en termes de nature et processus de transit et de dépôt des sédiments afin d'être incluses dans un diagramme de Passega, (Passega, 1957, 1964).

Un critère simple de différenciation des modes de dépôt et de transit des particules, autrement dit de l'énergie nécessaire à leur mise en mouvement et de dépôt, est la méthode de l'image granulométrique de Passega. Nous avons mis en évidence précédemment une distribution du remplissage sédimentaire autour de deux classes majoritaires : les dépôts sableux et les particules fines. Dans cette partie, les paramètres granulométriques D50 et D99 disponibles pour chaque échantillon mesuré, dans le cadre de chaque site étudié, nous permet de représenter la dispersion des échantillons dans le diagramme de Passega ou diagramme CM.

Le diagramme CM délimite plusieurs types de transports à partir de la dispersion des points sur le graphique (Figure 6) : suspension uniforme (branche SR), suspension graduée sans roulement (RQ), suspension de fond et roulement (PO), et enfin roulement (ON) (Passega, 1957).

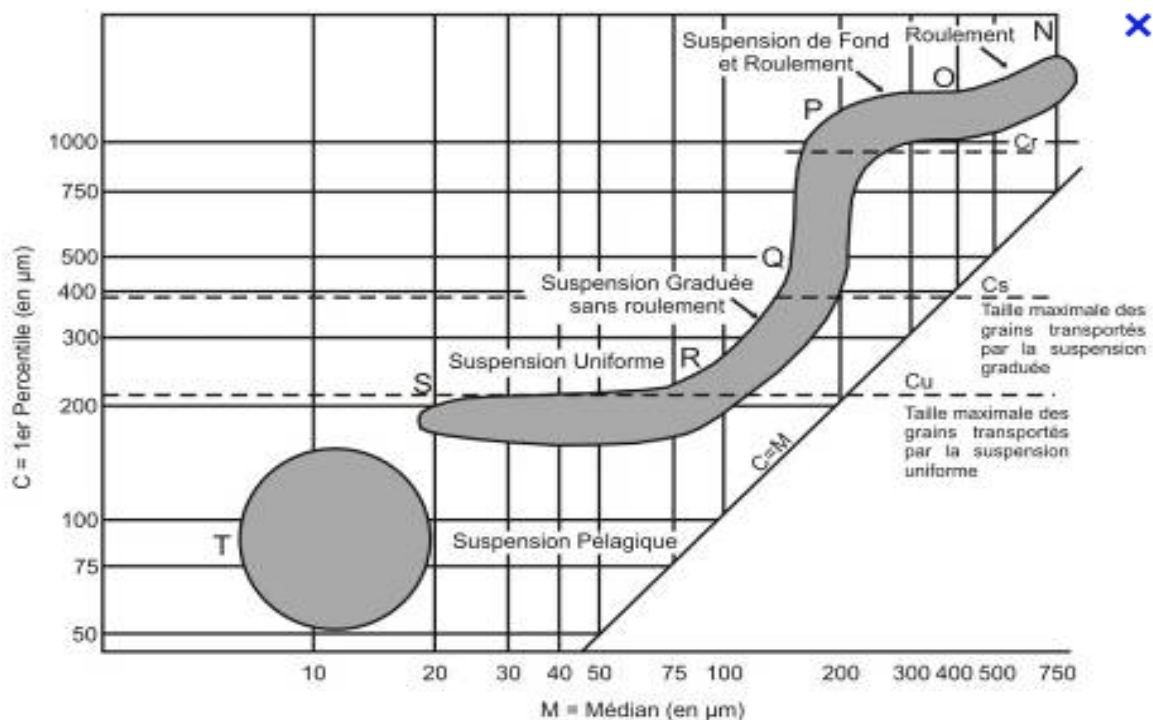


Figure 6 : Représentation du diagramme de Passega (1957 ; 1964) et interprétation des modes de dépôt et de transit des particules en fonction de la valeur des deux paramètres granulométriques (D50 et D99).

b. Datation du sédiment

- Mesure des Radioéléments de courte période par spectrométrie gamma

Les carottes MTE08-05, CPX08-02, BRE08-03, TBR09-01, BRC09-02, PAL09-P3, GdL09-07, ETL10-02, ARS10-02, GEC11-04 ont été échantillonnées à un pas de 1 échantillon tous les 4 cm soit 25 échantillons pour une carotte de 100 cm. Les mesures pour la carottes TRS 12-04 sont actuellement en cours. Les échantillons ont été séchés à 60°C pendant trois jours, puis conservés dans des boîtes en polystyrène. Ces analyses ont été effectuées au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), UMR 8212 - CEA- CNRS – UVSQ. L'échantillon est protégé de la radioactivité ambiante par un château de plomb. Les photons gamma sont détectés à l'aide d'un détecteur de germanium, caractérisé par une grande pureté, un bruit de fond très faible et une efficacité relative de 20,6%. Ce type de détecteur présente une excellente efficacité aux basses énergies, ce qui est particulièrement nécessaire pour les isotopes qui nous intéressent dans notre étude. Chaque comptage s'effectue sur une durée de 24 heures au minimum. Le spectre gamma ainsi obtenu met en évidence des marqueurs géochimiques (K, U, Th) et des marqueurs temporels (^7Be , ^{210}Pb , ^{137}Cs). Les détails de la méthode sont donnés dans Pinglot et Pourchet (1995).

- Construction des modèles âge-profondeur

Des chronologies précises et à haute résolution sont nécessaires dès lors que l'on s'intéresse à l'étude des sédiments du dernier siècle. En effet, ceci permet d'atteindre l'échelle temporelle pertinente pour comparer les reconstitutions obtenues entre les différentes carottes ou avec des données instrumentales et/ou historiques et ainsi pouvoir espérer obtenir des quantifications de paramètres climatiques ou autres. A cet effet, plusieurs méthodes sont ici utilisées et combinées pour dater les sédiments, mais toutes ne sont pas applicables sur toutes les séquences. C'est par l'utilisation, et surtout le croisement, de ces repères chronologiques que les modèles « âge-profondeur » sont construits. Différents marqueurs chronologiques sont utilisables dans les séquences sédimentaires en milieu fluvial :

- l'utilisation de Radioéléments de courte période. L'étude de la radioactivité permet une datation absolue des couches successives d'une carotte. Dans cette étude, une attention particulière a été portée à l'échelle du siècle, par l'étude des isotopes artificiels Cesium 137 (^{137}Cs) et Américium 241, (^{241}Am). Les retombées atmosphériques de ces radioéléments émis par les activités humaines peuvent être utilisées comme marqueurs chronostratigraphiques (Robbins and Edgington, 1975). Ces retombées de radioéléments, se retrouvent ainsi dans le

sol puis dans les sédiments. Deux pics de fortes activités dans les sédiments sont considérés comme marqueurs chronologiques : (i) les essais nucléaires atmosphériques qui ont débuté en 1954 et ont atteint leur maximum en 1963 dans l'hémisphère nord (avant le traité de non prolifération des armes atomiques) et, (ii) l'accident de la centrale de Tchernobyl en 1986.

Le Plomb 210 (^{210}Pb), un isotope radioactif du plomb issu de la chaîne de désintégration de l'Uranium 238 (^{238}U), a aussi été mesuré. C'est un radioélément couramment utilisé en paléolimnologie pour dater les sédiments sur les 100 à 150 dernières années (demi-vie de 22.3 ans). Néanmoins, cette méthode de datation est difficile à employer en milieu fluvial car elle suppose qu'il n'y a pas de mélange des sédiments, pas de variation du taux de sédimentation et pas de diffusion du ^{210}Pb au sein de la colonne de sédiment (Appleby and Oldfield, 1992). L'activité en ^{210}Pb est aussi très sensible aux granulométries contrastées, *e.g.* la capacité d'absorption des particules, et par conséquent leur concentration en ^{210}Pb ne sont pas constants. Nous n'avons donc pas utilisé le ^{210}Pb comme marqueur chronologique strict. Sur certains profils, l'activité du ^{210}Pb fournit néanmoins des corroborations sur la datation.

- la confrontation des données de débits liquides journaliers des stations en amont ou en aval des sites de prélèvements avec les faciès de crue observés dans les séquences sédimentaires. Les données de la banque HYDRO renseignent sur les variations de débits, et donc les dates des crues. Ces crues déposant un niveau sableux, ces événements hydrosédimentaires particuliers peuvent être ainsi repérés (à l'étape de la description mais essentiellement avec les analyses granulométriques réalisées à l'échelle du centimètre), et ainsi offrir de nouveaux points de calage des modèles,

- l'interface eau/sédiment : il est appelé t_0 , et correspond à la date du prélèvement,

- des activités (datées) liées à la gestion des sédiments, susceptible d'impacter la distribution granulométrique de la séquence: comme la mise en place d'un barrage, la construction de la darse ou de la lône, les dates de curages, la mise en place de la gravière...

Dans le cadre de nos études sur l'archivage en milieu fluvial, les repères chronologiques robustes et les plus récurrents, sont le pic d'activité de ^{137}Cs , des activités de gestion datées impactant la distribution granulométrique d'une séquence et l'interface eau-sédiment. Les crues historiques sont également utilisées comme des marqueurs stratigraphiques pour affiner la chronologie et prendre en compte les dépôts instantanés. Le contexte fluvial où les processus hydrosédimentaires apportent une très grande variabilité de sédimentation (dépôts

de sable pouvant atteindre plusieurs centimètres lors d'une crue), et l'utilisation d'un taux de sédimentation constant tout au long de l'archive sédimentaire ne sont pas satisfaisante pour établir un modèle d'âge. Les crues historiques n'ont été utilisées qu'*a posteriori*, pour valider et affiner les chroniques reconstituées, et afin d'éviter tout raisonnement circulaire.

III. Interprétation et exploitation des résultats obtenus

Les données exploitées en priorité concernent la description sédimentologique associée à chaque annexe (profils granulométriques, diagramme de Passega, taux d'accumulation sédimentaire) et aux mesures de radionucléides (principalement le ^{137}Cs) dans le but d'évaluer la capacité d'archivage de ces milieux (conditions de sédimentation, fenêtre temporelle recouverte).

1. Granulométrie et motifs de remplissage

Toutes les annexes sont caractérisées par un remplissage de matériau fin majoritairement silteux entrecoupé par des apports plus ou moins massifs de particules sableuses. Si chaque site présente un remplissage spécifique, plusieurs tendances générales peuvent en être dégagées (Tableau 4). A titre de comparaison, les paramètres granulométriques mesurées sur une carotte prélevée au lac de Paladru (PAL) et sur deux carottes du casier Girardon de l'île de la Platière (PLA) sont présentés (situation de marge fluviale). PAL est utilisé comme référence lacustre dans une première publication (Desmet *et al.*, 2012). Les pourcentages présents dans le tableau 4 correspondent à une moyenne de l'ensemble des échantillons de la carotte selon les trois classes granulométriques définies par Blott and Pye (2001) : argiles ($< 2 \mu\text{m}$), silts ($> 2 \mu\text{m}$ et $< 63 \mu\text{m}$), et sables ($> 63 \mu\text{m}$ et $< 2 \text{mm}$). Le pourcentage de fraction fine est la somme des argiles et des silts, est correspond donc aux particules inférieures à $63 \mu\text{m}$.

Tableau 4 : Moyenne des classes granulométriques associées à chaque site

	ETL	MTE	CPX	GDL	TBR	BRE	ARS	GEC	PAL	PLA
Argile	4 %	6 %	6 %	5 %	5 %	4 %	7 %	6 %	8 %	4 %
Silt	57 %	77 %	71 %	53 %	72 %	46 %	83 %	75 %	86 %	46 %
Sable	39 %	17 %	23 %	42 %	23 %	50 %	10 %	19 %	6 %	49 %
Fraction fine ($< 63 \mu\text{m}$)	61 %	83 %	77 %	58 %	77 %	50 %	90 %	81 %	94 %	51 %

MTE, ARS et GEC présentent des pourcentages de fraction fine supérieure à 80 %. Ces valeurs élevées restent néanmoins inférieures à celles mesurées sur une carotte du lac de Paladru (PAL). Dans ces trois annexes, la taille des sédiments est la plus proche de celle mesurée en contexte lacustre. Les sites GDL, BRE ont en revanche une proportion sableuse beaucoup plus importante avec des valeurs qui peuvent atteindre 50 % du remplissage dans le cas de l'Île du Beurre. La granulométrie de ces sites se rapprochent le plus de celle rencontrée à proximité immédiate du corridor principal, au niveau du casier Girardon (PLA). Les sites d'ETL, CPX et TBR ont des moyennes de classes granulométriques intermédiaires aux deux groupes évoqués ci-dessus. Le pourcentage d'argile est faible dans tous les sites avec des valeurs inférieures à 8 %.

La figure 7 représente un triangle textural de distribution des sédiments provenant des sites :

- Paladru (PAL) : le remplissage lacustre de référence, la texture des sédiments est centrée sur le pôle silteux.
- Arras (ARS) et Grange Ecrasée (GEC), sites pour lesquels la dispersion granulométrique reste centrée sur un pôle silto-sableux, avec quelques incursions vers le pôle sablo-silteux pour GEC. Pour des raisons de présentation, la dispersion granulométrique du site de la morte (MTE) n'est pas représentée mais elle est située entre PAL et ARS, sans incursions sableuses.
- TBR et CPX, deux sites présentant une distribution entre un pôle sableux représenté par les incursions grossières, et un pôle silto-argileux représenté par la sédimentation de particules fines propres à une annexe fluviale.

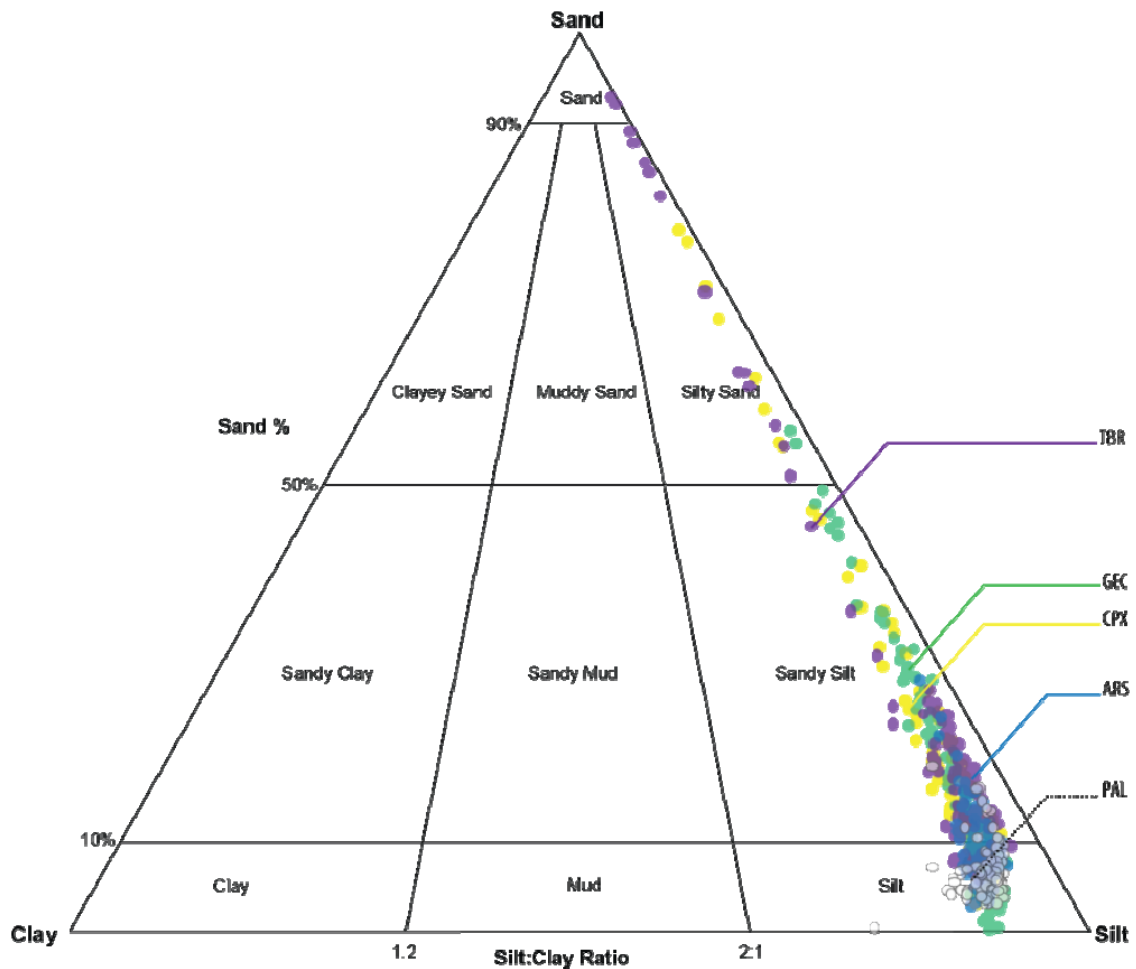


Figure 7 : Triangle textural des sites dont le remplissage sédimentaire est majoritairement fin. Pour comparaison, les paramètres granulométriques de la carotte du lac de Paladru sont présentés.

Les carottes des sites de GDL et BRE ont une distribution granulométrique plus dispersée avec significativement plus de niveaux appartenant au pôle sablo-silteux (Figure 8). Pour BRE, la distribution passe par des sables purs jusqu'à des silts purs. Dans ces sites d'étude, la distribution granulométrique des dépôts est plus proche des distributions observées au sein des marges, telles que les casiers Girardon (PLA).

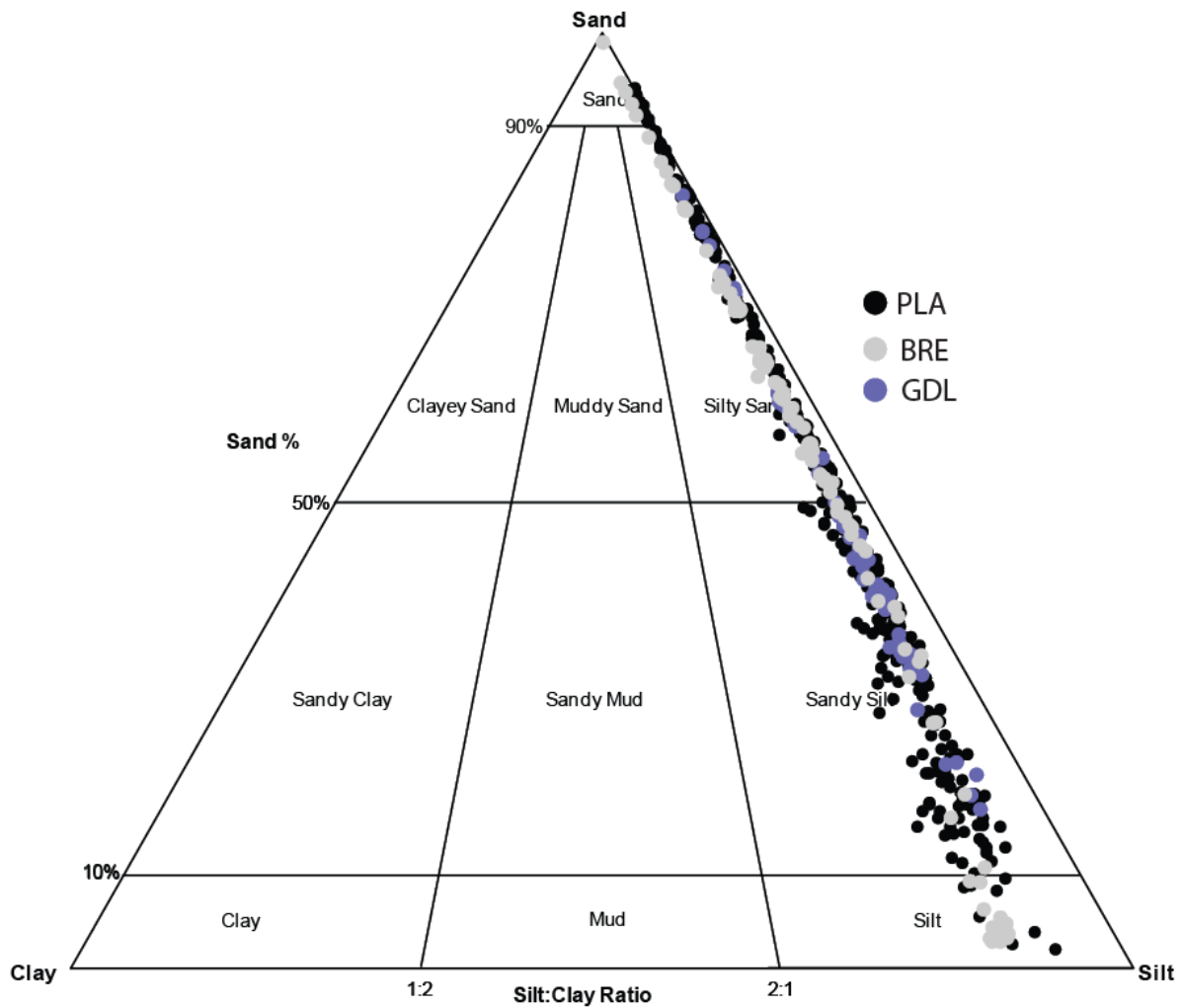


Figure 8 : Triangle textural des sites dont le remplissage sédimentaire est plus grossier et dispersé. Pour comparaison, les paramètres granulométriques des carottes de l'île de la Platière (PLA) sont présentés.

Dès lors, cette méthode de représentation permet de discriminer – sans hiérarchie de dépôt au sein de la carotte – les environnements à sédimentation silto-argileuse proche des environnements lacustres à sédimentation continue des environnements à haute énergie propice au dépôt de particules grossières, et potentiellement propices à des enregistrements événementiels.

Les profils granulométriques de la figure 9 restituent une image plus précise du remplissage sédimentaire des annexes et de leur fonctionnement hydro-sédimentaire.

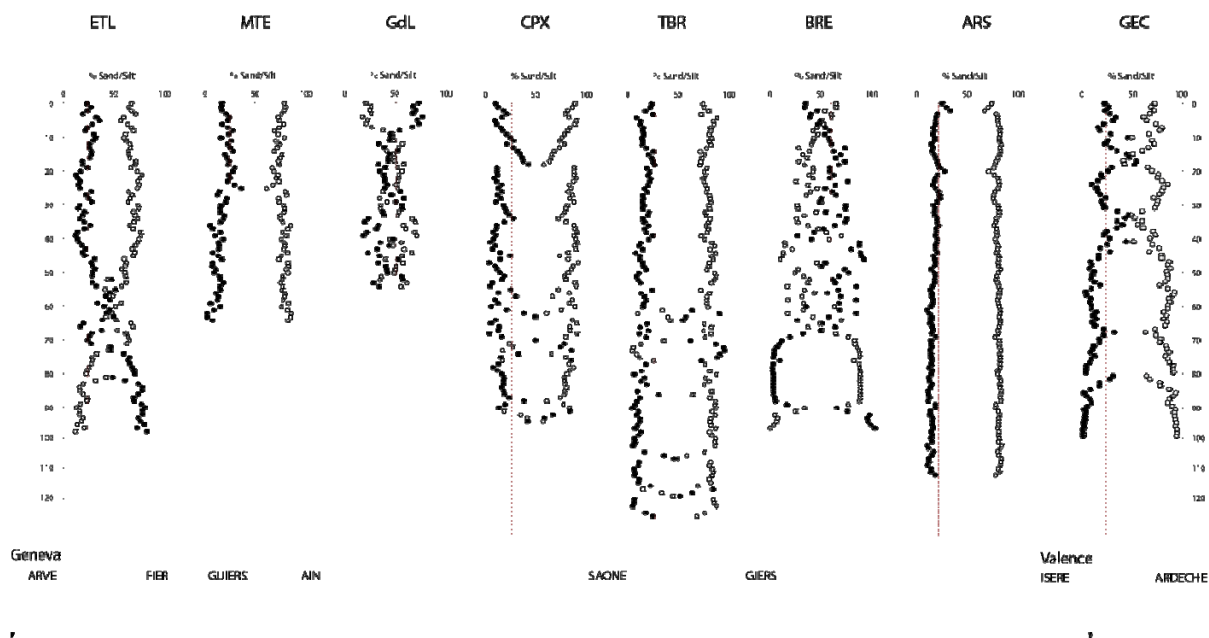


Figure 9 : Profils granulométriques pour chaque annexe étudiée. Les cercles noirs correspondent au pourcentage de sable tandis que les cercles blancs correspondent au pourcentage de silt.

Parmi ces huit profils, on distingue trois motifs de remplissage principaux :

- MTE, ARS et ETL (de 0 à 55 cm), sédimentation continue, fine et monotone
- CPX, TBR, GEC, structure en arrête de poisson ou se succèdent des périodes de sédimentation continue et des incursions sableuses.
- GDL et BRE, une forte variabilité de l'enregistrement des observée.

Les annexes ETL, MTE et ARS présentent un remplissage continu avec des profils relativement monotones. Dans cette interprétation il convient d'exclure la base du remplissage d'ETL comprise entre 124 et 55 cm, car il s'agit de dépôts avec des valeurs supérieures à 60 voire 70 %, liés à l'activité de la gravière. La fraction fine varie autour de 75 % du remplissage, avec quelques rares incursions de sables à 20, 30, 35 et cm de profondeur, d'amplitude très faible (30 % de sables). On peut noter que les sites MTE et ARS sont les l'annexes les plus proches des remplissages couramment observés en contexte lacustre.

Les sites CPX, TBR et GEC présentent un remplissage sédimentaire caractérisé par une fraction fine largement dominante, entrecoupée par de nombreux apports sableux massifs. Cette structure dite en « arête de poisson » est caractéristique d'une annexe dont la sédimentation se fait par (i) décantation en régime hydrique normal (accumulation de particules fines) et (ii) à forte énergie de courant, lors des crues, permettant le transport de particules plus grossières. Plusieurs apports d'amplitude variable peuvent être décomptés dans chaque annexe. GEC et CPX montrent respectivement 6 et 5 apports sableux pouvant représenter jusqu'à 50 % du remplissage. TBR possède en revanche un bruit de fond plus calme avec des pics beaucoup moins importants : le remplissage est fin jusqu'à 60 cm de profondeur, sans aucune grande incursion sableuse. En revanche d'importants changements au sein de la granulométrie s'opèrent de manière fréquente entre 65 et 120 cm de profondeur (à 65, 72, 86, 100, 111 et 120 cm) avec une amplitude pouvant atteindre 100 % de sable (cf figure 17 ci après)

Les annexes BRE et GDL présentent une granulométrie très variable dont la fraction sableuse est largement dominante avec des incursions dont les valeurs peuvent atteindre 50 %. Il convient de préciser que les niveaux compris entre 77 et 92 cm à BRE correspondent à un épisode de complète déconnexion de la lône se traduisant ainsi par un dépôt pseudo-varvé s'apparentant à un type lacustre.

Dès lors on distingue des sites propices à l'enregistrement des crues (CPX, TBR, GEC) alors que d'autres sont caractérisés par une sédimentation relativement continue et monotone (ETL, MTE et ARS). Les autres sites (GDL et BRE) ne correspondent à aucune des deux catégories précédentes. La dynamique hydro-sédimentaire de ces sites semble en partie liée à des pratiques de gestion des sédiments et des aménagements.

2. Processus de dépôt

La représentation des paramètres granulométriques D50 et D99 de l'ensemble des niveaux mesurés dans le cadre de cette étude dans le diagramme de Passega (Figure 10) montre une dispersion diffuse des points. En revanche la dissociation entre les différents pourcentages de sable montre, d'une part, la migration du nuage vers la gauche (diminution de la médiane), et d'autre part, un nuage de points qui tend vers une valeur de C autour de 800 μm . L'amplitude de la variation verticale tend à s'amoinrir avec l'augmentation de la médiane. La dispersion est majoritairement située dans la branche SR, avec des incursions vers RQ et PQ. Les sédiments sont, d'après l'interprétation du diagramme, transportés de manière générale par

suspension uniforme, voire graduée, avec néanmoins une minorité non négligeable transportés par roulement ou suspension de fond. Cette différence de mode de transport signifie une différence granulométrique, mais également un milieu énergétique différent. Il est intéressant de noter que le diagramme de Passega fut initialement conçu pour le système fluvial du Mississippi, dans le cas du Rhône la branche SR semble être aux alentours de 500 μm sur l'axe des ordonnées et non située vers 200 μm .

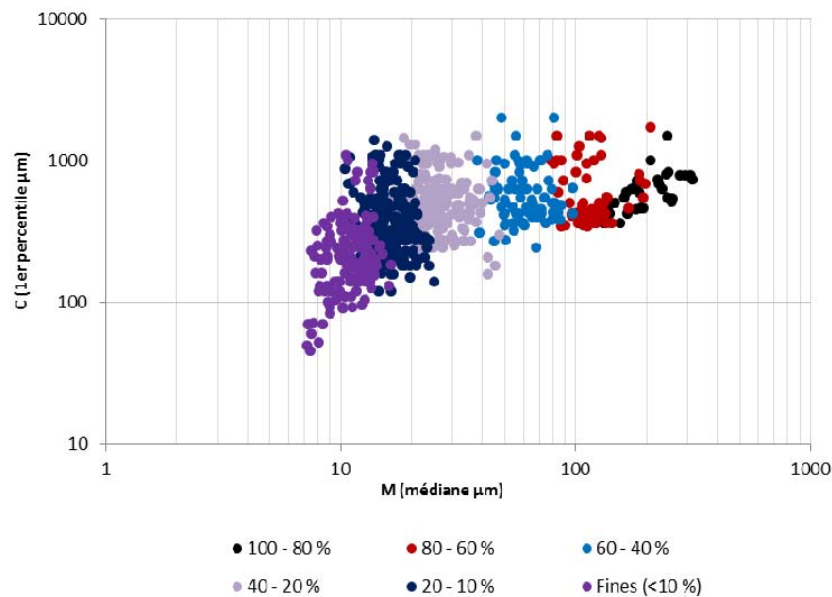


Figure 10 : Représentation des paramètres granulométriques D50 et D99 pour l'ensemble des niveaux mesurés, toute annexe confondue. Les différents pourcentages de sables sont différenciés.

Chaque remplissage sédimentaire est analysé individuellement dans la figure 11. Comme il a déjà été suggéré précédemment, on peut dissocier deux types de sédiments au sein des annexes : les apports grossiers et les particules fines issues de la décantation.

Pour chaque site cette distinction a été établie en fixant un seuil empirique (Tableau 5) prenant en compte le remplissage sédimentaire propre à chaque annexe. Cette limite correspond à un pourcentage de sable à partir duquel, on considère l'incursion de particules grossières (figurés rouges ; Figure 11) ayant une origine différente des processus hydro-sédimentaires propres à l'annexe en régime « normal » (figurés noirs ; Figure 11). Autrement dit ces incursions sableuses sont assimilées à des phénomènes tels que des crues suffisamment importantes pour permettre le développement de processus de charge de fond assimilés à de la suspension graduée avec ou sans roulements.

Tableau 5 : Seuils de dépassement et décompte des événements de crue

Site	ETL	MTE	CPX	GDL	TBR	BRE	ARS	GEC
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Limite des incursions sableuses (en % de sable)	25 %	25 %	25 %	50 %	25 %	55 %	20 %	25 %
Décompte des dépassements	10	5	9	6	8	11	3	7

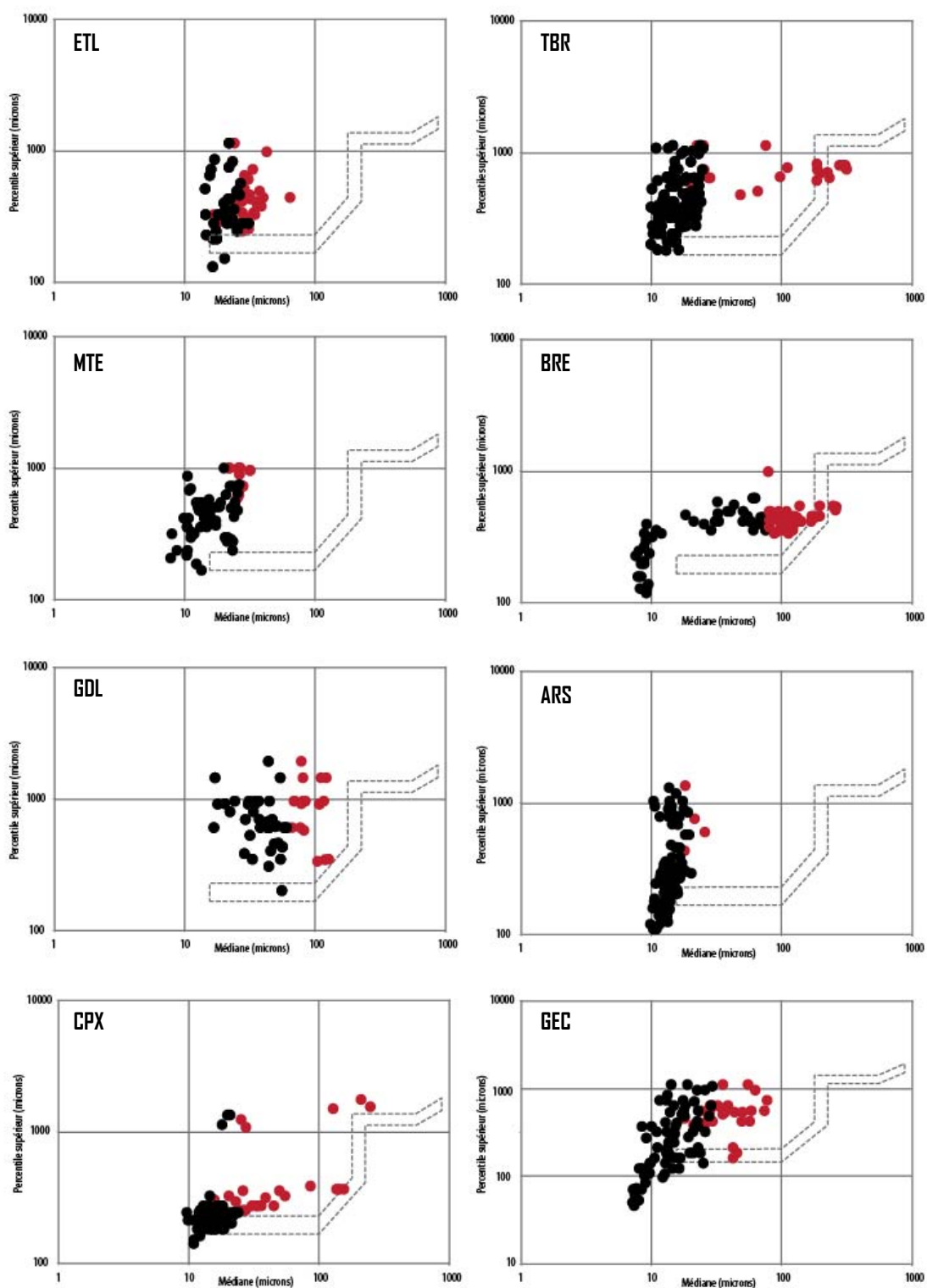


Figure 11 : Représentation des paramètres granulométriques D50 et D99 pour chaque site. En noir sont représentés les points assimilés à une sédimentation fine, en rouge sont représentés les échantillons identifiés en tant que dépôt de crue. Les sites sont représentés dans l'ordre suivant de haut en bas sur la colonne de gauche puis celle de droite : ETL, MTE, GDL, CPX, TBR, BRE, ARS, GEC

Dans l'ensemble, la dispersion des points se situe autour du point S avec des oscillations verticales, horizontales (vers la branche SR, RQ, cf Figure 6) voire chaotiques. Certains niveaux seraient même apparentés à de la suspension pélagique (cercle T), caractéristique de lône avec nappe d'eau stagnante. Les sites ETL, MTE, CPX, TBR, ARS, et dans une moindre mesure GEC, témoignent de processus de dépôts majoritairement indicateurs d'un milieu calme (branche SR principalement). Néanmoins, on note des incursions sableuses sur la branche RQ voire QP, particulièrement bien identifiées à TBR, CPX voir GEC. Le site BRE a en revanche une dispersion plus chaotique, avec un nombre important d'échantillons sur la branche de suspension graduée (QR) voire PO (suspension de fond & roulement) et d'autres niveaux témoignant d'un milieu calme. Il est intéressant de noter que tous les sites sauf GDL et BRE, présentent une signature spécifique aux milieux calmes si on omet les particules grossières identifiées en tant qu'apport de crues.

Des études antérieures ont déjà permis une esquisse des différents milieux fluviaux du Rhône à grâce à des échantillons de surface représentés dans le diagramme de Passega (Figure 12 in Bravard, 1983). En comparaison avec ces données, la dispersion des points obtenus semble être relativement concordante avec la typologie détaillée sur la figure 12. Les particules fines correspondent aux zones délimitées en tant que « plaine d'inondation », « lône en voie de colmatage », et « lône courante ». Ces secteurs sont situés sur la branche SR et RQ. Les particules sableuses trouvées dans le remplissage sédimentaire et excentrées sur la droite semblent se rapprocher des secteurs identifiés en tant que « banc médian, latéral » et « levée ».

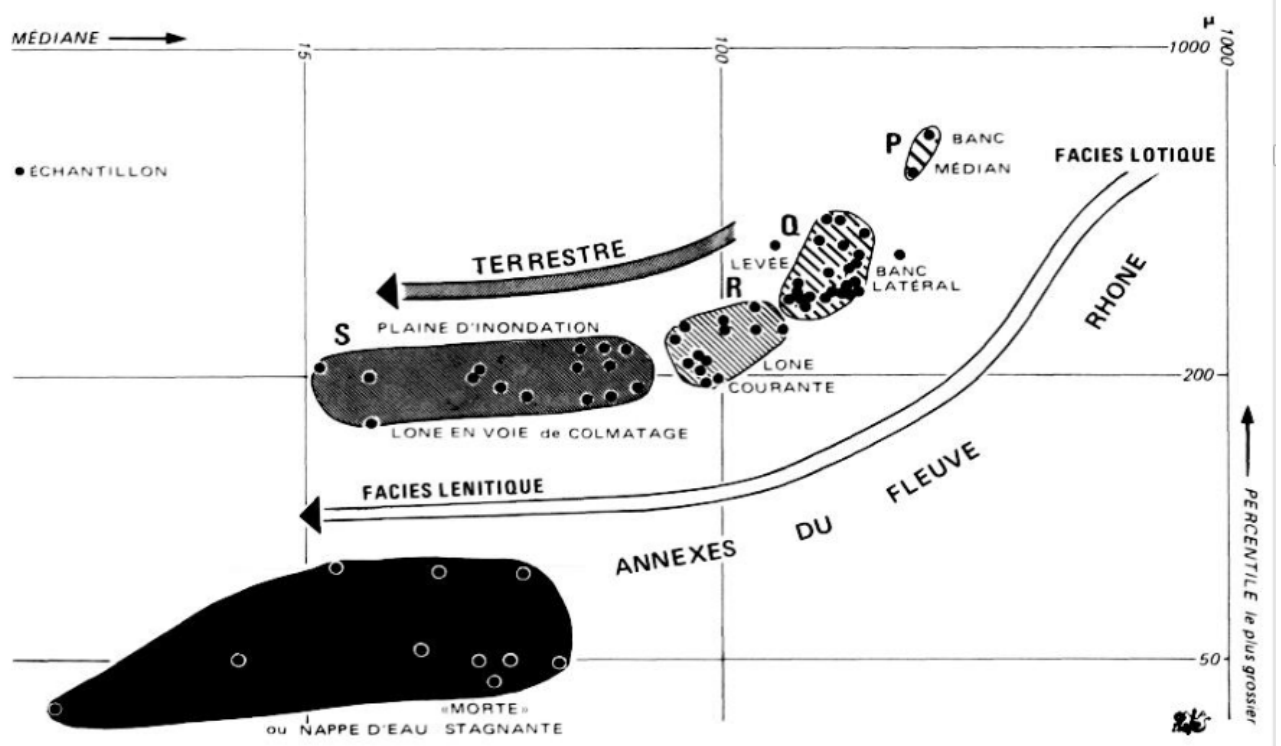


Figure 12 : Interprétation des milieux de dépôt dans le diagramme de Passega, d'après Bravard (1983)

3. Granularité des dépôts

Compte tenu de la dissociation des sédiments fins issus du fonctionnement hydro-sédimentaire en période normale (déconnexion, apports fins, décantation) et des sédiments grossiers vraisemblablement issus d'un fonctionnement plus énergétique (crue, chasse, remobilisation des sédiments), on analyse sur chaque carotte les échantillons dont le pourcentage en sable dépasse le seuil fixé (cf. supra), selon la même logique de dissociation. Les figures 13 et 14 synthétisent les données obtenues pour chaque site :

- En noir est représentée la moyenne des niveaux interprétés comme issus d'une sédimentation continue
- En rouge est représentée la moyenne des échantillons interprétés comme des incursions sableuses liées à des crues
- En pointillé (ou en blanc) est représentée la moyenne de l'ensemble de la carotte

Deux représentations différentes ont été choisies : les histogrammes de fréquence regroupent les données granulométriques par classe, tandis que les courbes de fréquence représentent les intervalles de mesure compris entre 0.01 μm et 2 mm (Figures 13 & 14).

L'analyse des données est synthétisée dans le tableau 6. On peut remarquer qu'en règle générale les niveaux à sédimentation continue présentent une amplitude étendue avec des répartitions unimodales autour de 10 μm . Certains sites comme GDL et BRE présentent une répartition bimodale avec une deuxième famille à 100 μm . Au contraire, les particules des niveaux plus grossiers ont tendance à posséder une répartition bimodale (10 et 100 μm) d'amplitude horizontale beaucoup plus faible, par exemple ETL, GDL, CPX, TBR et BRE. Quant à MTE et ARS possèdent un remplissage unimodal globalement fin et plus étendu.

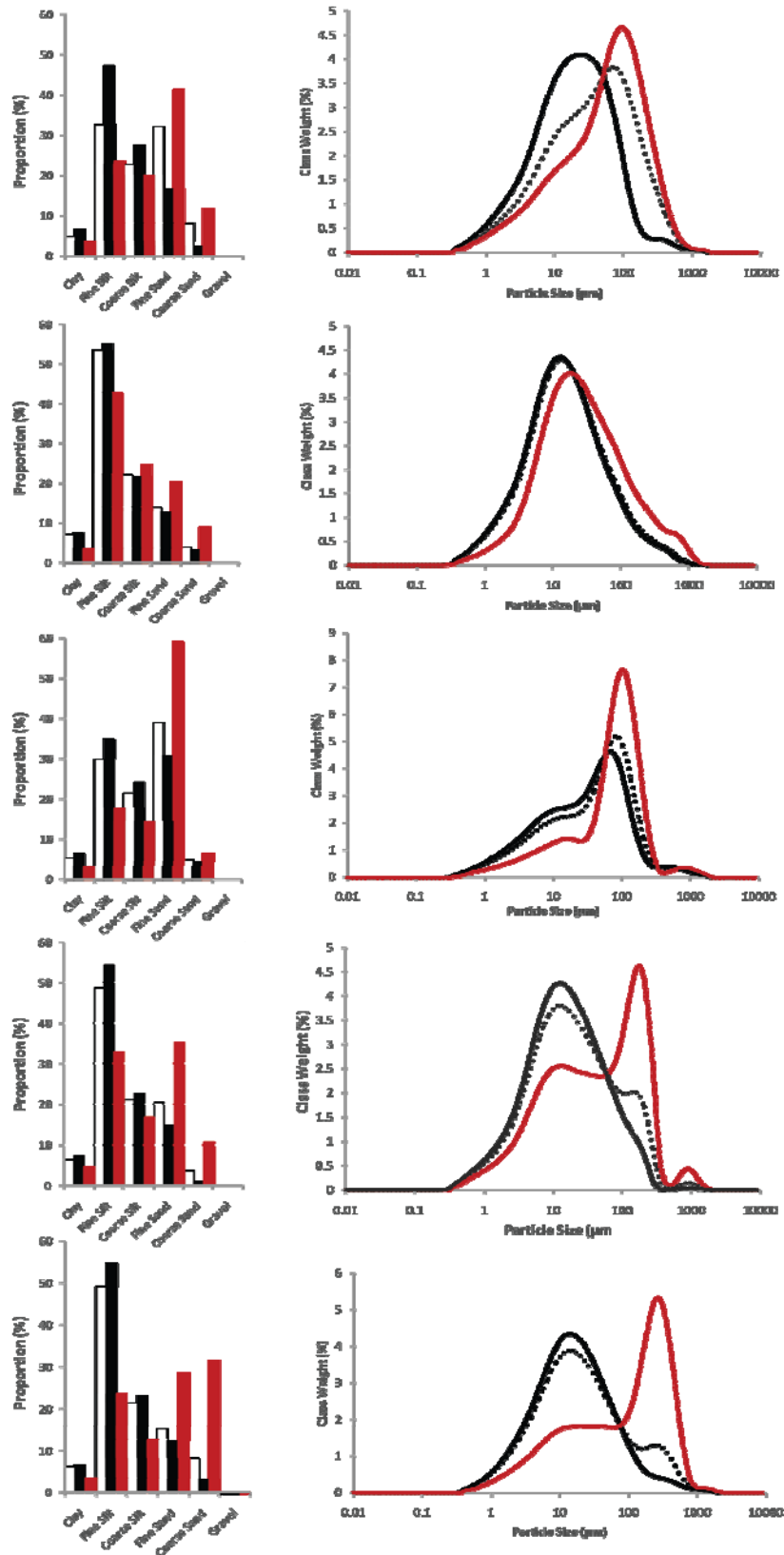


Figure 13 : Histogrammes et courbes de fréquence pour les sites ETL, MTE, GDL, CPX et TBR. En rouge sont représentées les données des incursions sableuses (cru), et en noir les niveaux à sédimentation continue.

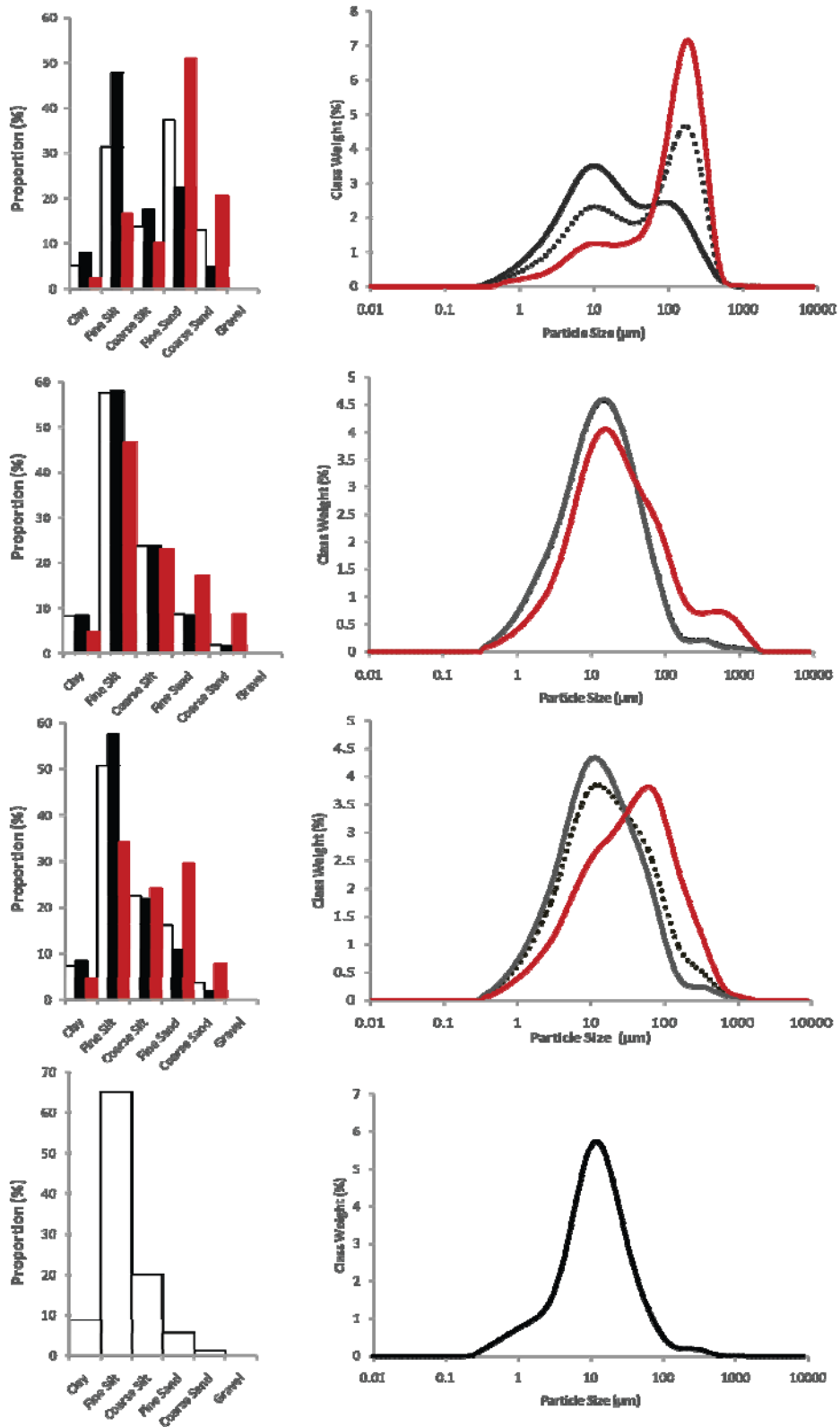


Figure 14 : Histogrammes et courbe de fréquence pour les sites BRE, ARS, GEC et PAL. En rouge sont représentées les données des incursions sableuses (crue), et en noir les niveaux à sédimentation continue.

La faible amplitude horizontale des pics de crue suggère un tri important des particules grossières avec une faible variation au sein des classes représentées. À l'inverse une amplitude plus étendue témoigne d'un plus grand spectre de taille de particules, notamment dans le cas des fines.

Tableau 6: Synthèse des histogrammes et courbes de fréquence

		ETL	MTE	GDL	CPX	TBR	BRE	ARS	GEC
Crues	Amplitude	Étendue	Étendue	Restreinte	Restreinte	Restreinte	Restreinte	Étendue	Étendue
	Répartition	Bimodale	Unimodale	Bimodale	Bimodale	Bimodale	Bimodale	Bimodale	Bimodale
	Centre	10 et 100 µm	30 µm	10 et 120 µm	10 et 120 µm	10 et 120 µm	10 et 110 µm	10 et 900 µm	9 et 100 µm
Fines	Amplitude	Étendue	Restreinte	Restreinte	Étendue	Étendue	Étendue	Étendue	Étendue
	Répartition	Unimodale	Unimodale	Bimodale	Unimodale	Unimodale	Bimodale	Unimodale	Unimodale
	Centre	20 µm	10 µm	10 100 µm	10 µm	10 µm	10 et 100 µm	10 µm	10 µm

Ces incursions sableuses d'amplitude restreinte sont potentiellement des événements brefs témoignant d'épisodes de crue. Dans cette optique, les apports sableux devraient correspondre aux pics de débit liquide à condition que l'annexe en question soit connectée au moment de la crue. Afin de vérifier cette hypothèse, il convient de connaître à minima l'échelle temporelle recouverte par l'archive sédimentaire.

4. Teneurs en Radionucléides

La figure 15 présente les profils d'activité du ^{137}Cs mesurés sur les 8 séquences sédimentaires.

Les profils de ^{137}Cs pour les sites de MTE, CPX et BRE ont déjà fait l'objet d'une interprétation (Desmet et al., 2012). Nous rappelons ici brièvement les principales conclusions. Pour MTE, le pic de ^{137}Cs , observé à 25-26 cm, est interprété comme lié à l'accident de Tchernobyl de 1986 alors que l'augmentation à la base de la carotte est associée aux essais nucléaires atmosphériques qui ont débuté en 1954. Pour CPX, le seul pic prononcé de ^{137}Cs apparaît à 85-86cm et a été interprété comme résultant de l'accident de Tchernobyl. Un pic de ^{137}Cs correspondant à des essais nucléaires n'a pas été attendu car le site (darse) n'a été mis en place que dans les années 1980. Le pic observé à 53 cm sur le site de BRE correspond à l'accident de Tchernobyl.

Sur les sites d'ETL et de ARS, on observe des profils similaires à ceux rencontrés dans les environnements peu-perturbés (e.g. lacs), avec dans les deux cas un pic de ^{137}Cs parfaitement identifié à respectivement 44-45 cm et 95-97 cm. Ces pics atteignent 51,9 Bq.kg à ETL et 166,8 Bq.kg à ARS, soit plus de 15 fois les teneurs mesurés en surface. Dans les deux cas, ce pic est attribué à l'accident de Tchernobyl de 1986.

A GEC, l'activité du ^{137}Cs est peu variable au sein de la séquence jusqu'à un pic d'activité observé à la base de la carotte. Ce pic atteint 37 Bq/kg ce qui est relativement faible comparé aux pics observés dans les carottes amonts. Néanmoins, il est probable que l'on observe l'amorçage d'un pic de plus grande activité du ^{137}Cs . Compte tenu de l'absence d'activité de ^{241}Am et de l'historique de gestion du site (recalibrage et reprofilage du lit en 1986), ce pic est donc interprété comme le signal de Tchernobyl de 1986.

Pour GDL, un premier massif d'activité important est observé entre 24 et 29 cm avec des valeurs de 28.5 Bq/kg ainsi qu'un pic à 44,5 cm (28.2 Bq/kg). Il est difficile d'attribuer ces pics activité aux événements de 1986 et de 1954 en raison des nombreuses activités de dragage ayant eu lieu sur ce site. Néanmoins, la forme du pic à 44,5 cm est plus concordante avec le signal de Tchernobyl que les activités mesurées en surface. D'autres carottages effectués sur le même site montrent que le massif d'activité à 24-29 cm est présent dès la surface. Dès lors, ce massif correspondrait soit à des activités de dragage qui remobilisent des

sédiments anciens en surface, soit à des rejets issus de la centrale nucléaire du Bugey situé à quelques kilomètres en amont.

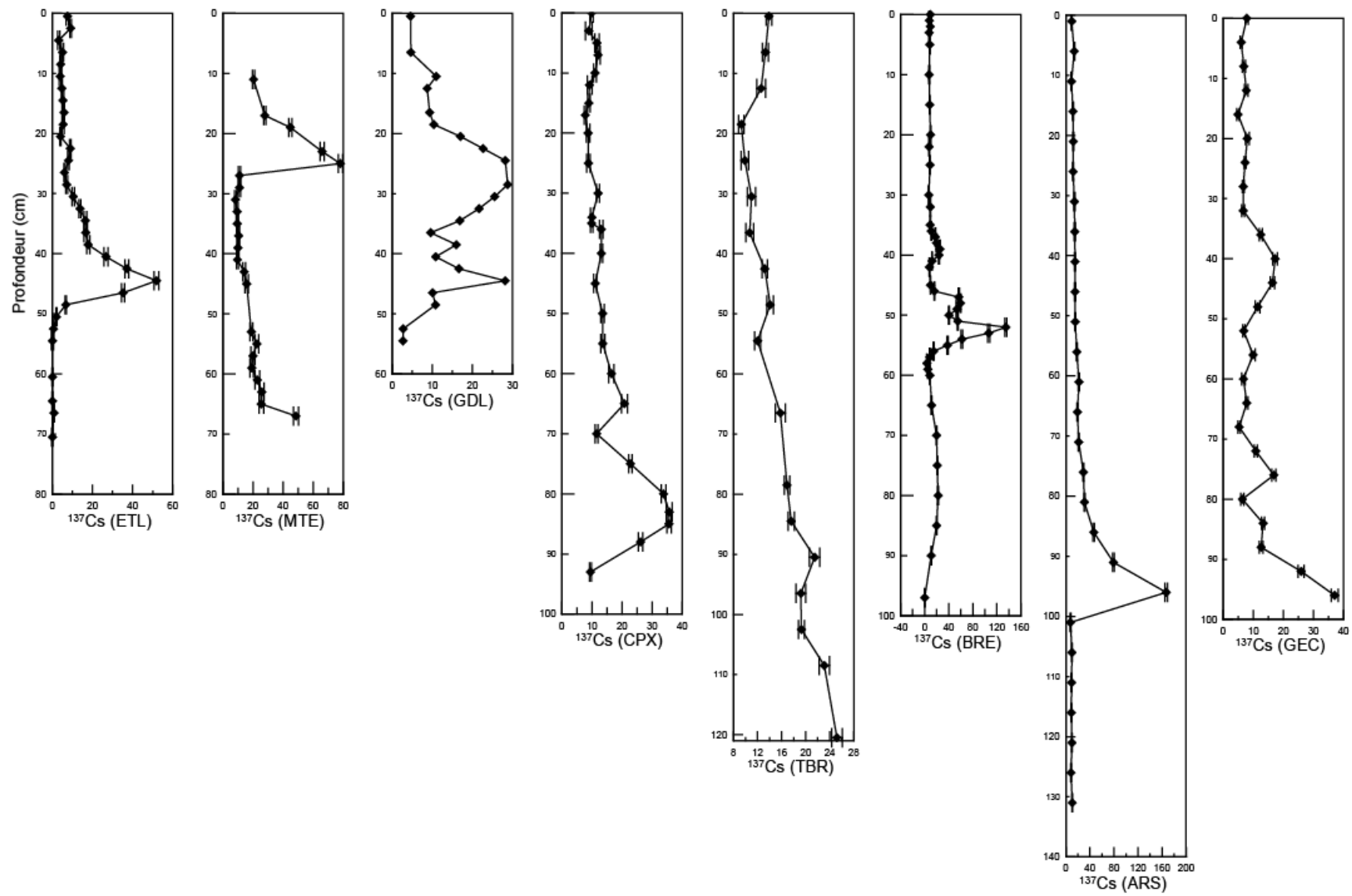


Figure 15 : Profils d'activités massiques en ^{137}Cs (Bq/kg de MS) des 8 enregistrements sédimentaires.

Aucun pic d'activité n'a pu être mis en évidence sur le site de TBR. L'activité maximale de ^{137}Cs est observée à la base de la séquence (25.5 Bq/kg). Compte tenu des forts taux d'accumulation observés sur ce site (nombreux intrusions sableuses de plusieurs centimètres) et de l'absence de pic caractéristique, l'enregistrement est donc postérieur à 1986.

5. Archivage des crues

Afin de vérifier si l'on peut faire concorder les archives sédimentaires avec des épisodes de crue, un couplage des données sédimentologiques et des débits liquides journaliers mesurés en station a été tenté. Dans un premier temps, un important travail de synthèse des débits du Rhône est réalisé à partir des données de la Banque Hydro (www.hydro.eaufrance.fr). Les stations choisies sont positionnées sur chaque tronçon étudié, idéalement en amont des sites d'étude. Les hydrogrammes reconstitués fournissent l'évolution des débits entre 1985 et 2005. Sur chaque profil granulométrique daté, les années qui ont enregistré une crue majeure sont mises en évidence (Tableau 7, Figure 16). Évidemment, chaque tronçon possède un hydrogramme propre puisque la contribution des affluents est différente. Aussi, chaque crue dite majeure diffère d'un tronçon à l'autre, puisque le débit augmente vers l'aval, les seuils sont de cette manière plus importants en descendant le corridor rhodanien

Tableau 7 : Récapitulatif des crues majeures au sein des tronçons hydrologiques

	Tronçon 1	Tronçon 2	Tronçon 3	Tronçon 4	Tronçon 5	Tronçon 6
Station	Pougny 1	Brens 1	Lyon Perrache	Ternay 1		Viviers 1
Limite (m ³ /s)	900	1400	2400	4200		6000
	15/10/1981	07/10/1993	21/11/1992	18/05/1983		18/05/1983
	24/10/1985	21/12/1993	09/10/1993	17/02/1990		09/10/1993
Pic de Crue	15/02/1990	22/03/2001	22/02/1999	23/11/1992		07/01/1994
	22/03/2001	17/11/2002	14/03/2001	09/10/1993		23/03/2001
	15/11/2002	14/01/2004	17/11/2002	23/03/2001		17/11/2002
	14/01/2004			17/11/2002		02/12/2003

La figure 16 regroupe les profils granulométriques (% de sable) en fonction de la date estimée des dépôts calculés uniquement à partir des teneurs en radionucléides (^{137}Cs) et de la position dans l'axe du Rhône ; en bleu sont représentées les années où le débit mesuré est exceptionnel sur le Rhône dans le tronçon associé à l'annexe. Les valeurs utilisées sont explicitées dans le tableau 7.

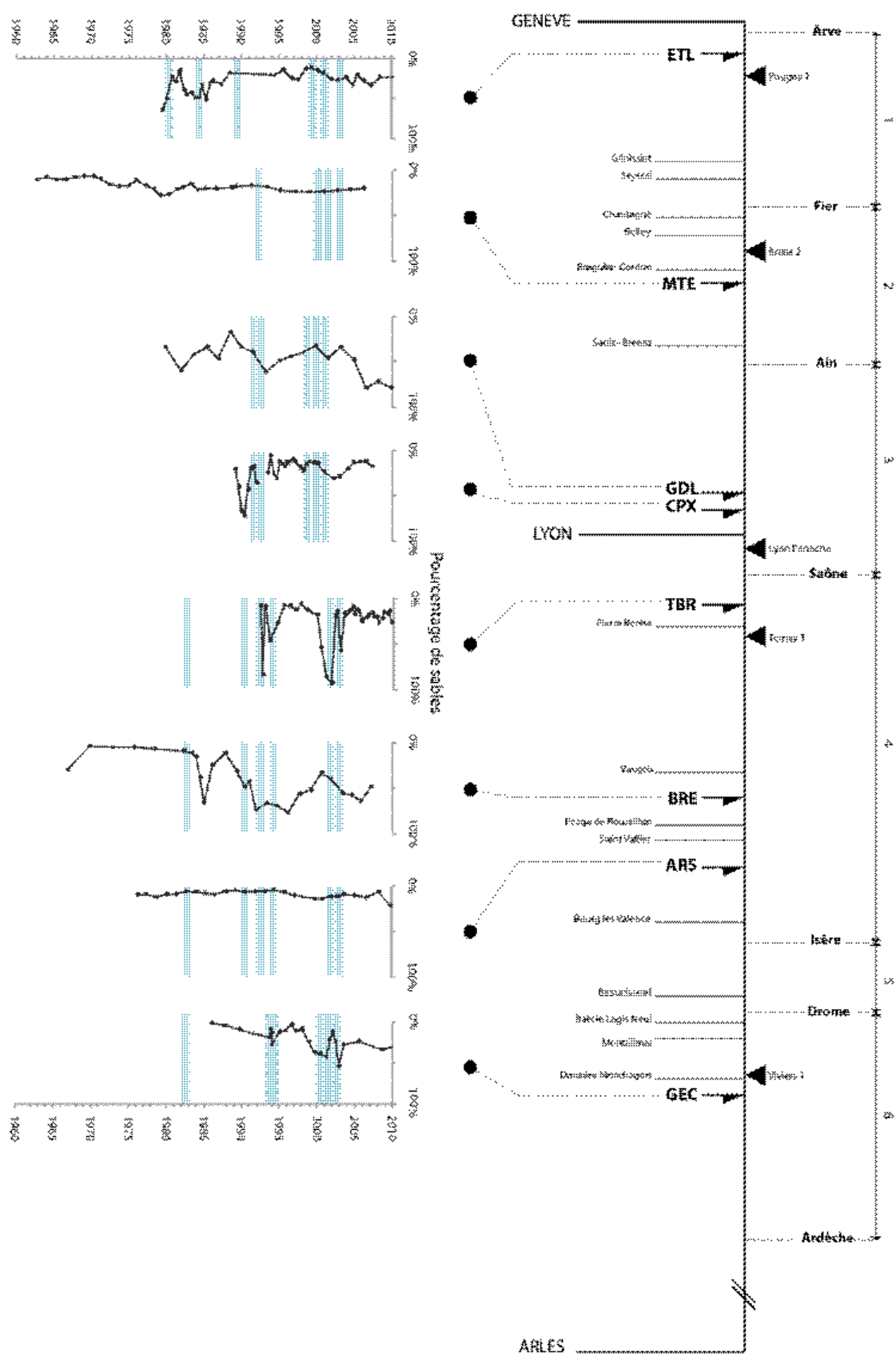


Figure 16 : Taux de sable en fonction de l'âge estimé par les analyses de radioéléments (^{137}Cs). Les crues majeures des 30 dernières années, par tronçons hydrologiques (Tableau 7), sont représentées en bleu.

Certains sites enregistrent de manière plus efficace les variations du débit liquide. Ainsi, les variations granulométriques à TBR et GEC sont bien corrélées aux pics de crue enregistrés. Des décalages entre les dates estimées à l'aide du ^{137}Cs et les pics de crue sont observables, notamment sur le site GEC. Ces décalages sont dus au fait que lors des crues, les dépôts sont instantanés et représentent plusieurs centimètres. Il convient alors d'implémenter un même âge sur la totalité du niveau de sable (cf ci-après). Pour CPX, nous avons montré que des diminutions épisodiques du pourcentage de fraction fine à 57 et 77 cm correspondaient aux crues du début des années 90 (Desmet et al. 2012). Les diminutions du pourcentage de fine plus modestes intervenant au sommet de la carotte de 14 à 19 cm ont été mise en relation avec les crues de 2001 et 2002.

Néanmoins, aucune logique amont-aval n'est interprétable au regard de la figure 16. MTE et ARS semblent en revanche partiellement déconnectés compte tenu du signal granulométrique et des faibles variations en rapport avec les crues. GDL, BRE, et ETL semblent n'enregistrer que partiellement les crues du Rhône, les variations de granulométrie au sein des séquences peuvent néanmoins être mises en relation avec d'autres événements liés à la gestion du cours d'eau ou la mise en place d'aménagements. Par exemple, à BRE, un changement dans la granulométrie à 70 cm a été interprété comme correspondant à une mise en connexion avec le Rhône à l'extrémité supérieure du canal latéral où la carotte a été échantillonnée.

L'archivage des crues au sein des annexes fluviales est donc très dépendant de la position et de la connectivité de l'annexe par rapport au corridor principal, mais aussi des aménagements et autres activités de gestion susceptibles de perturber le signal sédimentaire. Dans le cas de cette étude, TBR et GEC sont particulièrement intéressants d'un point de vue archivage de crue, contrairement à une annexe telle qu'ARS où la sédimentation fine continue permet potentiellement un meilleur archivage des contaminants par exemple.

Afin d'affiner la notion d'archivage des crues sur les sites qui s'y prête (*e.g.* TBR et GEC) les relations entre les débits liquides et les paramètres sédimentologiques sont présentés en détail. La figure 17 présente la relation entre le pourcentage de fraction fine mesuré à TBR et les débits liquides mesurés en station de Ternay (localisé à quelques kilomètres en aval de TBR). Dans ce secteur, un seuil de $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ est évalué pour une crue à période de retour décennal (Tableau 7). Les résultats des mesures de radioéléments indiquent une absence de pic de ^{137}Cs

lié à Tchernobyl, et sont interprétés comme des dépôts post-1986 (Figure 17). Les quatre faciès de crue observés peuvent être mis en relation avec les crues majeurs ayant été mesurés dans cette période (11/2002, 03/2001, 10/1993, 11/1992). Après Septembre 2002, aucune autre crue à débit supérieur à 4200 m³/s n'a été enregistrée, la sédimentation est continue.

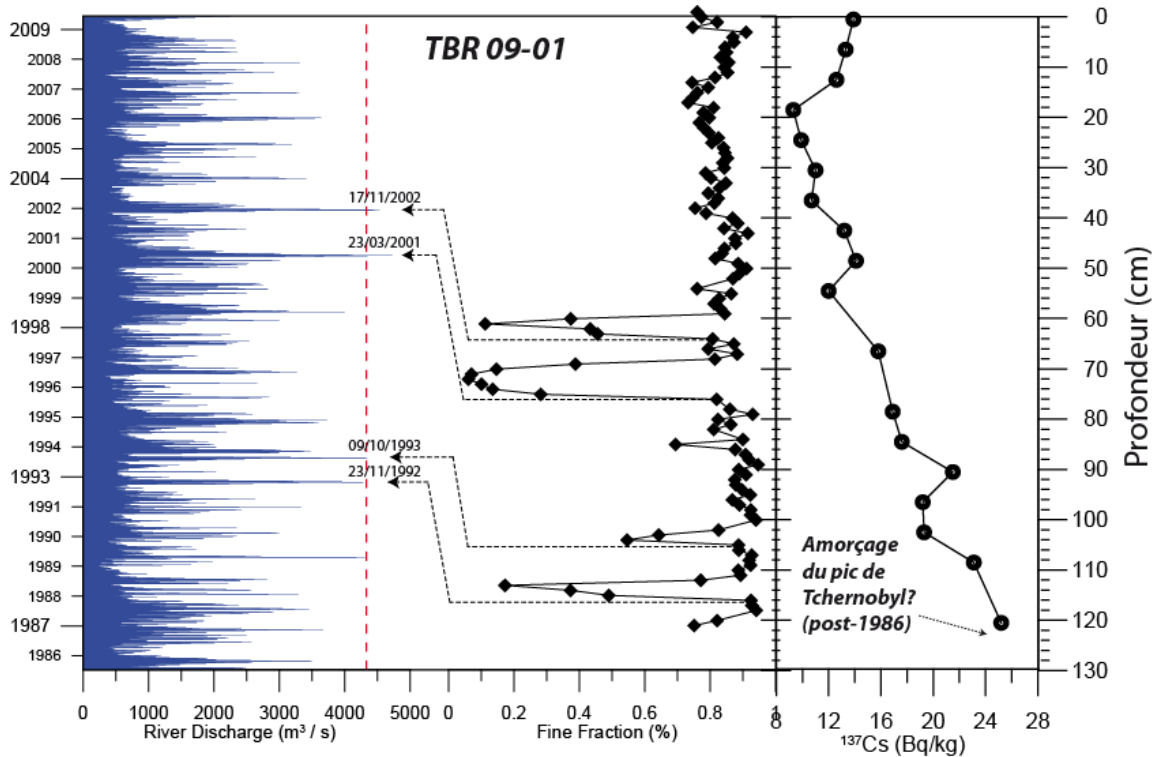


Figure 17 : Relation entre débits liquides post-1986 mesurés en station de Ternay 2, paramètres granulométrique (% fraction fine) et activités en ¹³⁷Cs du site de TBR.

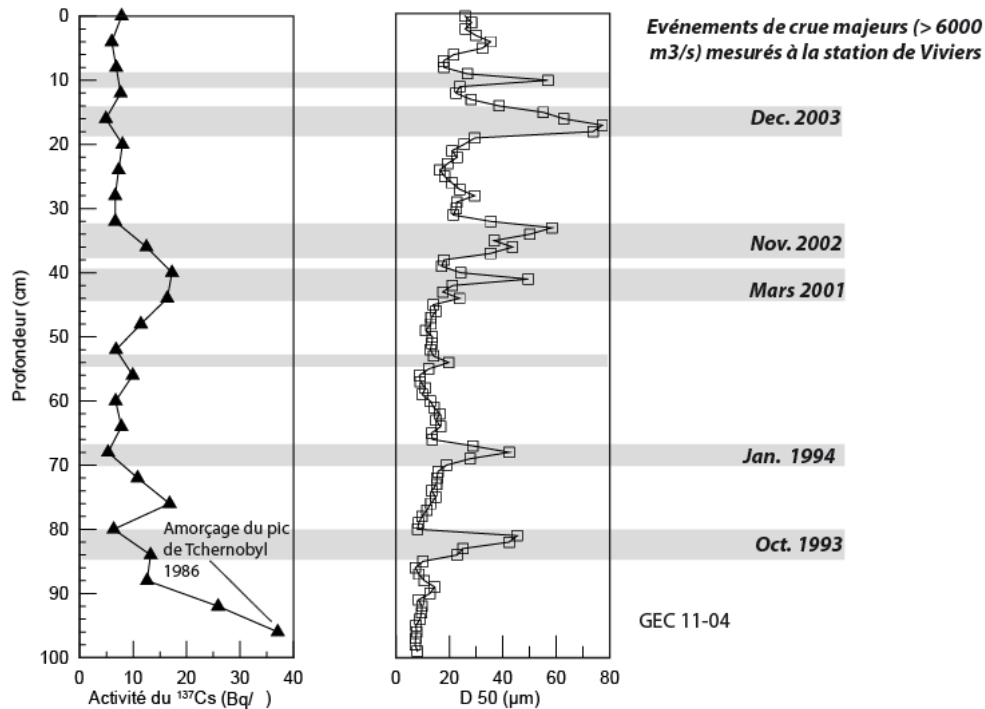


Figure 18 : Relation entre les événements de crue post 1986 mesurés en station de Viviers, paramètres granulométrique (D 50, μm) et activités en ^{137}Cs du site de GEC.

L'exemple de GEC montre qu'il est aussi possible de mettre en relation les débits liquides exceptionnels (crues) et les faciès sédimentaires. L'activité du ^{137}Cs est peu variable au sein de la séquence jusqu'à un pic d'activité observé à la base de la carotte qui correspondrait à l'amorçage du signal de Tchernobyl. L'enregistrement est postérieur à 1986, soit 25 ans au cours desquels cinq crues de débits supérieurs à $6000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (période de retour de 10 ans) sont identifiées et susceptibles d'avoir modifiées les dynamiques hydro-sédimentaires (Tableau 8). Ces crues sont observées les mois et années suivantes : 10/1993 ; 01/1994 ; 03/2001 ; 11/2002 ; 12/2003. Elles sont mises en relation avec les faciès préalablement définis et permettent d'affiner le modèle âge-profondeur en évitant d'assigner un taux d'accumulation constant entre la date de prélèvement et le pic ^{137}Cs de 1986. Les niveaux de crue bien identifiés dans les carottes (mis en relation avec des débits liquides de date connus) sont considérés comme instantanés. Par conséquent, une seule date est assignée pour le niveau entier.

6. Modèle âge-profondeur et taux d'accumulation sédimentaire des annexes fluviales étudiées

A partir des mesures de radioéléments, des niveaux de crues et des dates connues de certains aménagements, ou événements ayant modifiés la dynamique hydro-sédimentaire, un modèle

âge-profondeur a pu être déterminé pour chaque archive. La liste des marqueurs chronologiques utilisés pour construire les modèles est fournie dans le tableau 8.

Tableau 8 : Liste des marqueurs temporels utilisés pour construire un modèle âge-profondeur pour chaque site.

Site	Cote centimétrique	Profondeur Moyenne	Date	Info point
ETL	0 - 1 cm	0	2010,3	Prélèvement
ETL	44 - 45 cm	44,5	1986,5	Cesium 1 (1986)
ETL	55 - 56 cm	55,5	1982,0	dépôts instantanés haut
ETL	63 - 64 cm	63,5	1982,0	dépôts instantanés bas
ETL	72 - 73 cm	72,5	1980,0	Cessation gravière
MTE	0 - 1 cm	0	2008,4	Date prélèvement
MTE	25 - 26 cm	25	1986,5	Césium 1 (1986)
MTE	67 - 68 cm	67	1964,0	Césium 2 (1954)
CPX	0 - 1 cm	0	2008,4	Date prélèvement
CPX	18 - 19 cm	18	2001,3	Crue du 23/03/2001
CPX	57 - 58 cm	57	1993,8	Crue du 09/10/1993
CPX	76 - 77 cm	76	1990,2	Inondation de Miribel-Jonage
CPX	85 - 86 cm	85	1986,5	Césium 1 (1986)
GDL	0 - 1 cm	0,0	2009,9	Prélèvement
GDL	9 - 10 cm	9,5	2005,1	Curage EDF Fev. 2005 (granulo)
GDL	45 - 46 cm	45,5	1986,5	Cesium 1
TBR	0 - 1 cm	0	2009,9	Date prélèvement
TBR	61 - 61 cm	61,5	2003,0	Crue du 17/11/2002 haut
TBR	64 - 65 cm	64,5	2003,0	Crue du 17/11/2002 bas
TBR	70 - 71 cm	70,5	2001,3	Crue du 23/03/2001 haut
TBR	76 - 77 cm	76,5	2001,3	Crue du 23/03/2001 bas
TBR	86 - 87 cm	86,5	1999,2	Crue du 23/02/1999
TBR	103 - 104 cm	103,5	1993,8	Crue du 09/10/1993 haut
TBR	105 - 106 cm	105,5	1993,8	Crue du 09/10/1993 bas
TBR	113 - 114 cm	113,5	1993,0	Crue du 23/11/1992 haut
TBR	116 - 117 cm	116,5	1993,0	Crue du 23/11/1992 bas
BRE	0 - 1 cm	0	2008,5	Date prélèvement
BRE	55 - 56 cm	55	1986,5	Césium 1 (1986)
BRE	70 - 71 cm	70	1984,0	Debris removal
ARS	0 - 1 cm	0	2010,2	Date prélèvement
ARS	20 - 22 cm	20	2004,1	Crue du 15/01/2004
ARS	28 - 29 cm	28,5	2003,0	Crue du 17/11/2002
ARS	35 - 37 cm	36	2001,3	Crue du 23/03/2001
ARS	95 - 97 cm	96	1986,5	Cesium 1 (1986)
GEC	0 - 1 cm	0	2011,2	Date prélèvement

GEC	13-14	13,5	2003,9	Crue du 2/12/2003 haut
GEC	17-18	17,5	2003,9	Crue du 2/12/2003 bas
GEC	31-32	31,5	2003,0	Crue du 17/11/2002 haut
GEC	36-37	36,5	2003,0	Crue du 17/11/2002 bas
GEC	40-41	40,5	2001,3	Crue du 23/03/2001 haut
GEC	44-45 cm	44,5	2001,3	Crue du 23/03/2001 bas
GEC	66 - 68	66,5	1994,1	Crue du 7/01/1994 haut
GEC	68 - 69 cm	68,5	1994,1	Crue du 7/01/1994 bas
GEC	80 - 81 cm	80,5	1993,8	Crue du 9/10/1993 haut
GEC	80 - 86	86,5	1993,8	Crue du 9/10/1993 bas
GEC	98 - 99 cm	98,5	1986,5	Césium 1 (1986)

C'est à partir de ces marqueurs temporels que les modèles âge-profondeur sont reconstruits. Tous les modèles d'âge sont synthétisés dans la figure 19 (Mourier et al., in prep). Les valeurs obtenues sont représentées vis-à-vis de la chronologie de l'enregistrement lacustre PAL qui possède un taux d'accumulation sédimentaire (TAS) typique des lacs d'origine glaciaire (*e.g.* 0,2 cm/an). Les taux d'accumulation sédimentaire des zones adjacentes au corridor rhodanien, toujours en eau, varient de 1,5 à 6,9 cm/an, avec une moyenne sur l'ensemble des sites de 5,4 cm/an. Les accumulations les plus rapides sont enregistrées à TBR, ARS, GEC et CPX avec respectivement des TAS de 6,9 ; 4,1 ; 4,0 ; et 3,9 cm/an. Les mesures sur MTE et GDL ont les TAS les plus bas (*e.g.* 1,5 et 1,9 cm/an), la valeur de GDL étant sans doute surévaluée. Ce sont des valeurs qui sont concordantes avec d'autres taux d'accumulation calculés sur des lînes du Rhône en amont de Lyon (Rostan et al., 1997). Les vitesses de sédimentation calculées varient de 0,07 à 2,86 cm/an. Albrecht et al. (1998) ont étudié les dépôts sédimentaires au niveau du réservoir de Chancy situé sur le Rhône près de la frontière suisse. Malgré l'absence de pics significatifs pour le profil de ^{137}Cs , ces auteurs ont estimé une vitesse de sédimentation moyenne de 13 cm/an à partir d'informations temporelles sur les vidanges de ce réservoir. Dans une étude récente de notre laboratoire sur un casier Girardon de l'île de la Platière (considéré comme une marge fluviale entre la bande active et la pleine d'inondation), les taux d'accumulation sont plus importants, de l'ordre de 10 à 14 cm/an. Au niveau des marges alluviales du Rhône aval, Provansal et al. (2012) ont calculé des valeurs allant de 13 à 33 cm/an. Ces valeurs sont typiques d'une archive discontinue puisque la déconnexion avec le lit principal est faible sauf en cas de crue exceptionnelle.

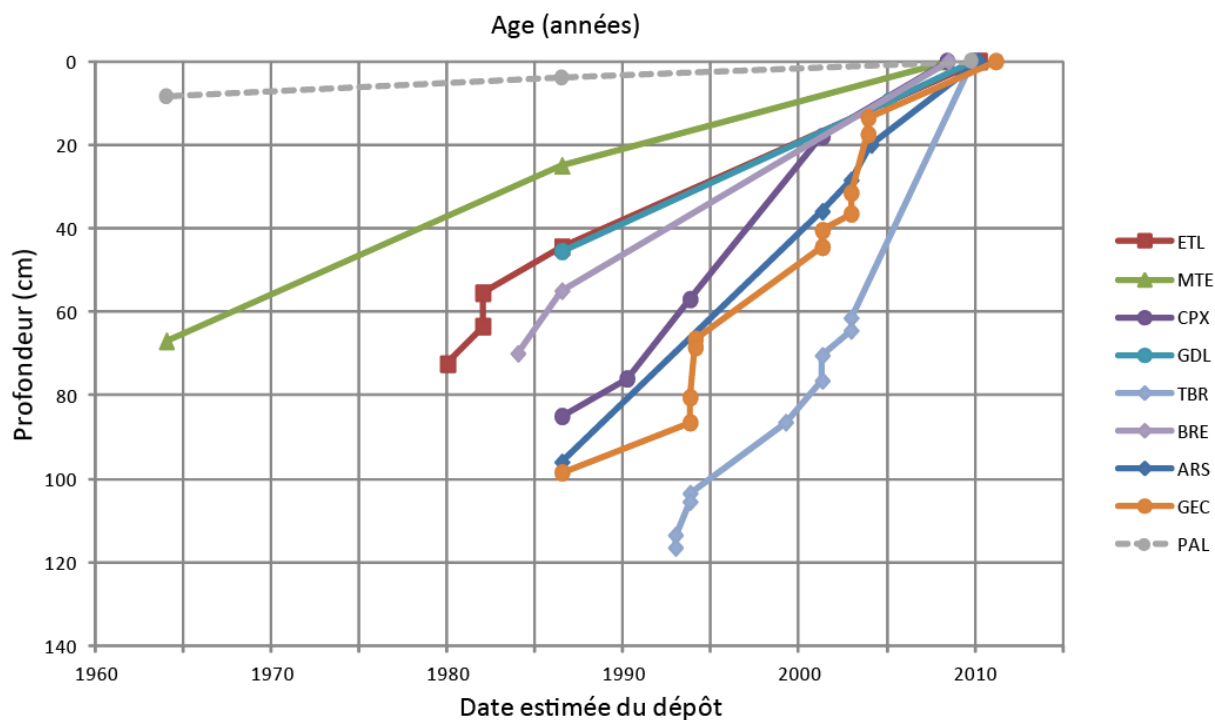


Figure 19 : Modèles d'âge-profondeur des 8 sites étudiés dans cette étude. A titre de comparaison, le modèle du lac de Paladru (PAL)

D'autres études à l'échelle internationale (USA et Europe), plus récentes et plus robustes méthodologiquement, offrent des valeurs intéressantes à comparer. Celles-ci concernent le plus souvent des systèmes de type « oxbow-lakes », voire des méandres abandonnés (Tableau 9). Ces données sont synthétisées à partir de différents travaux [Cooper & Mchenry (1989); Davidson et al. (2004); Gasiorowski & Hercman (2005); Kaplan & Wolfe (2006); Walker, et al. (2007); Wren et al. (2008) ; Babek et al. (2008 ; 2011)].

Tableau 9 : Valeurs des taux d'accumulation sédimentaire (cm/an) dans le Rhône & autres hydrosystèmes

Rhône										
Ancienne gravière	Lône	Darse	Plan d'eau	Lône	Lône	Retenue barrage	Lône		Lac (référence)	Casier Girardon
ETL	MTE	CPX	GDL	TBR	BRE	ARS	GEC	Moyenne	PAL	Ile de la Platière
2,4	1,5	3.9	1,9	6.9	2,9	4,1	4.0	3,4	0,2	10 et 14
Morava (ou Moravie)			Vistule			Mississippi				
Meander Lake			OxbowLakes							
CR1	CR2	CR3	KAD	LIS	KAG	Sky Lake	Wasp Lake	Moon Lake		
6,1	3,7	1,2	2,7	1,8	1,3	0,3	2.5 à 7.7	1.2 à 2.6		

Les valeurs déterminées dans les lacs de méandre sont du même ordre de grandeur que les données obtenues sur le Rhône. On pourrait s'attendre à des taux d'accumulation plus importants dans les annexes du Rhône, cependant la forte anthropisation du fleuve permet une gestion des crues très stricte. Concernant les « oxbow-lake », les taux sont en moyenne inférieurs aux valeurs des annexes étudiées. Cette différence peut être due à la nature et au fonctionnement hydro-sédimentaire de ces systèmes dont la connectivité avec le chenal principal est moins importante.

Ces données restent donc à être confirmées par des études analogues, mais donnent une première image synoptique et unique, à l'échelle du corridor Rhodanien, de l'archivage sédimentaire au sein des annexes fluviales du Rhône. Par rapport aux carottes prélevées dans des lacs naturels non perturbés, la précision de la datation des carottes en contexte fluvial n'est pas similaire. Nous soutenons, toutefois, que parce que la datation est contrainte par des marqueurs chronologiques connus, elle est suffisante pour la reconstruction des dernières décennies (*e.g.* 20-50 ans).

IV. Conclusion

Une grande variété d'annexes fluviales a pu être carottée au sein de différents programmes conduits récemment sur l'axe rhodanien. Cette campagne de carottages reste unique en termes de diversité des sites et de méthodologie, puisque pour la première fois des annexes en eau ont pu être échantillonnées et datées. L'exploitation approfondie des résultats de ces carottages et des différentes analyses afférentes, a permis de distinguer deux grands types de remplissages d'annexes fluviales :

- Les archives peu perturbées à sédimentation continue (exemples types : MTE, ARS et potentiellement ETL de 0 à 55 cm). Dans ces annexes, la sédimentation est en relative déconnexion avec le Rhône puisqu'elle ne répond pas aux débits importants en crue. Cette accumulation de sédiments fins peu perturbés permet un archivage optimal dans le cas des grands hydrosystèmes, notamment pour l'étude des tendances temporelles des émissions anthropiques. En revanche, la déconnexion avec le chenal actif ne permet pas d'affiner la datation via les dépôts de crue.

- Les archives dont le signal granulométrique est fortement contrasté (exemples types : CPX, TBR et GEC). Ces archives vont présenter une séquence plus délicate à étudier. En effet, l'augmentation soudaine du débit liquide et la connexion avec le chenal actif se traduisent par un apport de particules grossières qui gonfle les taux d'accumulation (dépôts instantanés importants), en plus de vanner la surface de contact eau-sédiment. Dans le cas d'une archive contaminée, la remise en suspension des sédiments et l'adjonction de sédiment grossier potentiellement peu contaminé, peut fausser ou rendre délicat l'interprétation des profils de concentration. Par ailleurs, il est difficile de différencier la limite supérieure d'un faciès de crue. Néanmoins, ces séquences sont complémentaires des précédentes car l'archivage des crues permet d'améliorer la compréhension de la dynamique hydro-sédimentaire globale en plus de raffiner le modèle d'âge.

Il convient de rappeler qu'on distingue généralement deux milieux pour l'archivage sédimentaire : les marges fluviales (burrelet situé entre la bande active et la pleine d'inondation) et les annexes fluviales. Plusieurs avantages et inconvénients peuvent être évoqués pour ces deux milieux. Premièrement, les plaines d'inondation présentent l'avantage d'être faciles à étudier (échantillonnage à terre, facilité d'accès), mais possèdent en contrepartie une archive hautement discontinue puisque la déconnexion avec le lit principal est totale sauf en cas de crue exceptionnelle, notamment dans un contexte fortement anthropisé. Les annexes fluviales ont en revanche une archive quasi continue puisque la mise en eau est fréquente, voire permanente. La forte variabilité des types d'annexes engendre des contrastes quant à la qualité de l'archive, tantôt qu'il s'agisse d'un chenal secondaire fortement déconnecté ou d'une gravière toujours en eau ; mais aussi en fonction de l'activité anthropique associée.

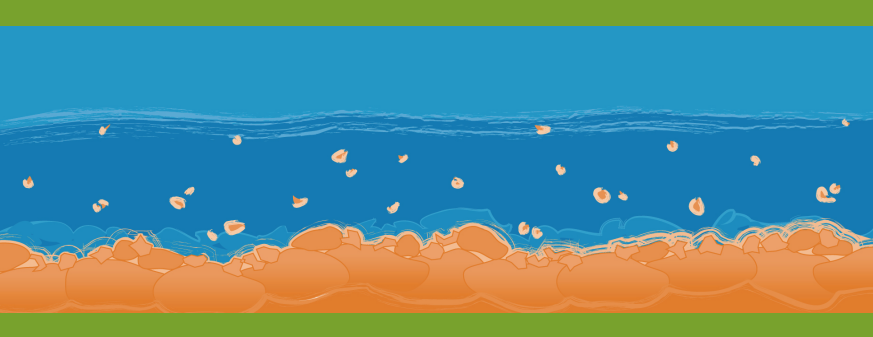
L'archivage en milieu fluvial offre une perspective de recherche intéressante là où les données historiques n'existent pas, notamment pour les études de l'histoire des contaminations.

Bibliographie

- Appleby, PG, Oldfield, F. Application of lead-210 to sedimentation studies. In: Ivanovich, M, Harmon, S, editors. Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine, and environmental sciences, 2nd edition. Oxford: Clarendon Press; 1992. p. 731-78.
- Blott, S. J. and Pye, K. (2001) GRADISTAT: A GRAIN SIZE DISTRIBUTION AND STATISTICS PACKAGE FOR THE ANALYSIS OF UNCONSOLIDATED SEDIMENTS. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 1237–1248 (2001)
- Bravard, J. P. (1983). Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône. *Revue de géographie alpine*, 71(4), 363-379. doi:10.3406/rga.1983.2543
- Bábek, O., Hilscherová, K., Nehyba, S., Zeman, J., Famera, M., Francu, J., Holoubek, I., et al. (2008). Contamination history of suspended river sediments accumulated in oxbow lakes over the last 25 years. *Journal of Soils and Sediments*, 8, 165-176. doi:10.1007/s11368-008-0002-8
- Bábek, O., Faměra, M., Hilscherová, K., Kalvoda, J., Dobrovolný, P., Sedláček, J., Machát, J., et al. (2011). Catena Geochemical traces of flood layers in the fluvial sedimentary archive; implications for contamination history analyses. *Catena*, 87, 281-290. doi:10.1016/j.catena.2011.06.014
- Callender, E, Robbins, JA. Transport and accumulation of radionuclides and stable elements in a Missouri River reservoir. *Water Resources Res* 1993; 29: 1787-1804.
- Cooper, C. M., & Mchenry, J. R. (1989). Sediment Accumulation and its Effects on a Mississippi River Oxbow Lake. *Moon*.
- Davis, RB. The scope of Quaternary paleolimnology. Boston: Kluwer Academic; 1980.
- Davidson, G R; Carnley, Meredith; Lange, Todd; Galicki, J. Stanley; Douglas, A. (2004). Changes in sediment accumulation rate in an oxbow lake following late 19th century clearing of land for agricultural use: a 210Pb and 14C study in Mississippi, USA. *Radiocarbon*, 46(2).
- Desmet, M., Mourier, B., Mahler, B. J., Van Metre, P. C., Roux, G., Persat, H., Lefèvre, I., et al. (2012). Spatial and temporal trends in PCBs in sediment along the lower Rhône River, France. *The Science of the total environment*, 433, 189-97. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.044
- Gasiorowski, M., & Hercman, H. (2005). Recent Changes of sedimentation rate in three Vistula oxbow lakes determined by 210Pb dating. *Geochronometria*, 24, 33-39.
- Kaplan, M. R., & Wolfe, A. P. (2006). Spatial and temporal variability of Holocene temperature in the North Atlantic region. *Quaternary Research*, 65(2), 223-231. doi:10.1016/j.yqres.2005.08.020
- Mahler, B. J., Van Metre, P. C., & Callendert, E. (2006). Trends in metals in urban and reference lake sediments across the United States, 1970 to 2001. *Environmental toxicology and chemistry / SETAC*, 25(7), 1698-709.

- Meybeck M. and Vörösmarty C., 2005, Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: from natural Holocene variations to Anthropocene. *C.R. Geoscience* 337, 107-123.
- Miralles J., Radakovitch O., Cochran J.K., Veron A. and Masque P., 2004, Multitracer study of anthropogenic contamination records in the Camargue, Southern France, *Science of The Total Environment*, 320(1), 63-72.
- Mourier, B., Desmet, M., Van Metre, P.C., Mahler, B.J., Perrodin, Y., Roux, G., Lefèvre, I., Babut, M. (in prep) Core-derived historical records, sources and spatial trends of PCBs along the Rhône river (France).
- Mourier Brice, Desmet Marc, Babut Marc, Roux Gwenaëlle, Bedell Jean-Philippe et Perrodin Yves. (2012) Contaminations historiques en PCB des annexes fluviales du Rhône. Poster séminaire scientifique OSR du 22/10/2012: <http://www.graie.org/osr/spip.php?article141>
- Passega, R. (1957). Texture as Characteristic of Clastic deposition. *AAPG Bulletin*, 41(9), 1952-1984.
- Passega, R. (1964). Grain Size Representation by Cm Patterns as a Geological Tool. *Journal of Sedimentary Research*, 34(4), 830-847.
- Pinglot, J.F. and Pourchet, M., 1995. Radioactivity measurements applied to glaciers and lake sediments. *The Science of the Total Environment* 173/174, 211-223.
- Provansal M, Villiet J, Eyrolle F, Raccasi G, Gurriaran R, Antonelli C (2010) High-resolution evaluation of recent bank accretion rate of the managed Rhone: a case study by multi-proxy approach. *Geomorphology* 117:287–297.
- Provansal M, Ferrand, E., Eyrolle, F., Raccasi, G., Monaco, M., Gurriaran, R. (2012) Spatial variability in sedimentation rates and artificial radionuclide storage in alluvial banks of the lower Rhône River *Aquatic Science*. DOI 10.1007/s00027-012-0257-4
- Raccasi, G. (2008). *Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, Recherches en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues, thèse, Université de Provence, 334 p.*
- Robbins, J., Edgington, D., 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochim. Cosmochim. Acta* 39, 285–304.
- Rolland B., 2006, Transfert des radionucléides artificiels par voie fluviale : conséquences sur les stocks sédimentaires rhodaniens et les exports vers la méditerranée, Thèse, Université Paul Cézanne, Aix-Marseille, 280 pp.
- Rostan J.C., Juget J., Brun A.M., 1997, Sedimentation rates measurements in former channels of the upper Rhône river using Chernobyl 137Cs and 134Cs as tracers, *The Science of the Total Environment*, 193, 251-262.
- Santiago S., Thomas R.L., Larbaigt G., Corvi C., Rossel D., Tarradellas J., Gregor D.J., Vernet J.P., 1994, Nutrient, heavy metal and organic pollutant composition of suspended and bed sediments in the Rhone River, *Aquatic Sciences - Research Across Boundaries*, 56(3), 220-242.
- Van Metre, PC, Callender, E, Fuller, CC. Historical trends in organochlorine compounds in river basins identified using sediment cores from reservoirs. *Environ Sci Technol* 1997; 31: 2339-44.

- Viers J., Dupré B., Gaillardet J., 2009, Chemical composition of suspended sediments in world rivers: New insights for a new database, *The Science of the Total Environment*, 407, 853-868.
- Walker, W G;Davidson, R. Gregg; Lange, Todd; Wren, D. (2007). Accurate Lacustrine and wetland sediment accumulation rates determined from ¹⁴C of bulk sediment fractions. *Radiocarbon*, 49(2), 983-992.
- Wren, D. G., Davidson, G. R., Walker, W. G., Galicki, S. J., & Lake, S. (2008). The evolution of an oxbow lake in the Mississippi alluvial floodplain, 63(3).



Observatoire des Sédiments du Rhône

École normale supérieure de Lyon
Sites Descartes – 15, parvis René Descartes
BP 7000 – 69342 Lyon Cedex 07
www.osr-rhone.org

Contact : guillaume.fantino@ens-lyon.fr