



HAL
open science

Évaluation de l'état des habitats benthiques du Rhône. Campagnes de terrain sur 10 stations réparties sur le Rhône

Salomé Berthier-Laumond, Alexandre Peeters, Robinson Nedelec, Delphine Sirven, Adrien Barra, Nicolas Tissot, Hervé Parmentier, Oldrich Navratil, Anna Geffray, B. Camenen, et al.

► To cite this version:

Salomé Berthier-Laumond, Alexandre Peeters, Robinson Nedelec, Delphine Sirven, Adrien Barra, et al.. Évaluation de l'état des habitats benthiques du Rhône. Campagnes de terrain sur 10 stations réparties sur le Rhône: OSR6 | Axe C - Action C1 | Rapport scientifique intermédiaire. [Rapport de recherche] CNRS; INRAE. 2024. hal-03750527v3

HAL Id: hal-03750527

<https://hal.science/hal-03750527v3>

Submitted on 26 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Évaluation de l'état des habitats benthiques du Rhône. Campagnes de terrain sur 10 stations réparties sur le Rhône

Évaluation de l'état des habitats benthiques du Rhône. Campagnes de terrain sur 10 stations réparties sur le Rhône

Rapport scientifique final

Version du 05 juin 2024

Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action

Axe C – Développer des méthodes pour restaurer la qualité physique et chimique et évaluer les effets des actions

Action C1 – Évaluation de l'état des habitats benthiques du Rhône dans les secteurs restaurés et non restaurés

Personnes impliquées

Salomé Berthier-Laumond¹, Alexandre Peeters¹, Robinson Nedelec¹, Delphine Sirven¹, Adrien Barra², Nicolas Tissot¹, Hervé Parmentier¹, Oldrich Navratil¹, Anna Geffray¹, Benoit Camenen³, Adrien Bonnefoy³, Floriane Masquelier³, Hervé Piégay¹

¹ CNRS, UMR5600, EVS

² CNRS, Plateforme OMEAA

³ INRAE, UR RiverLy, HyR

Pour citer ce rapport

Berthier-Laumond S., Peeters A., Nedelec R., Sirven D., Barra, A., Tissot N., Parmentier, H., Navratil, O., Geffray, A., Camenen, B., Bonnefoy, A., et Masquelier, F., Piégay, H., (2024). *Évaluation de l'état des habitats benthiques du Rhône. Campagnes de terrain sur les 10 stations réparties sur le Rhône*. Rapport scientifique. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. Action C1. p. 60

L'OSR est un dispositif animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)



Résumé

Le fond du lit des cours d'eau constitue une composante importante de la qualité hydromorphologique car il sert de substrat et de support à de nombreuses espèces aquatiques (animales et végétales). Il joue dès lors un rôle majeur pour la préservation de la biodiversité du cours d'eau. Cette action de l'OSR a permis de déterminer l'état interstitiel du fond graveleux du lit des Vieux Rhône, dans les secteurs restaurés et non restaurés, concourant à mieux évaluer la qualité des habitats benthiques et hyporhéiques, ainsi que l'effet des actions de restauration sur l'état de ce fond.

Pour répondre à cet objectif, un suivi temporel à haute fréquence a été conduit sur dix stations entre septembre 2021 et janvier 2024. Le choix des stations s'est opéré afin de couvrir des contextes géographiques et des fonctionnements hydro-sédimentaires diversifiés (e.g., secteurs avec réinjection sédimentaire, secteurs de référence avec transport solide effectif et secteurs pavés), tout en se focalisant sur la même forme fluviale : le radier. La technique utilisée consiste à prélever un échantillon du fond du lit à l'aide d'un échantillonneur cylindrique similaire à celui utilisé par McNeil et Ahnell (1964). Ainsi, l'évaluation du comblement interstitiel se base sur la détermination de la composition granulométrique de la zone hyporhéique et plus particulièrement sur la part de sédiments fins (< 2 mm) de l'échantillon.

Au terme de dix campagnes de mesures, des tendances propres à chaque site apparaissent, et confirment l'hypothèse selon laquelle la variabilité intra-site est plus faible que la variabilité inter-site. Les sites de référence ont la plus faible proportion de sédiments fins (de 0,9 à 7,2 %) et une distribution granulométrique plus fine. De manière générale, la part de sédiments fins est plus importante pour les sites avec réinjection sédimentaire (de 4 à 20 %) et encore plus élevée pour les sites pavés (de 0,4 à 27 %) que celle observée sur les sites de référence. Il est apparu que les caractéristiques locales des radiers (la part de galets et la vitesse des écoulements) avaient un effet significatif sur le remplissage interstitiel. En retirant cet effet local, il apparaît que les secteurs pavés présentent un remplissage interstitiel de sédiments fins significativement plus important que les secteurs avec réinjection sédimentaire. Il est également apparu qu'il existe un gradient amont-aval en matière de comblement interstitiel, celui-ci étant plus important dans le « Rhône amont » que dans le « Rhône médian » et le « Rhône aval ». Au sein de chacun de ces secteurs, des patrons nets se dessinent, les sites avec une réinjection sédimentaire ou les sites dynamiques présentant un comblement interstitiel plus faible que les sites pavés.

Mots-clés

Observatoire ; Rhône ; Sédiments ; OSR ; Comblement interstitiel ; Habitat benthique ; Zone hyporhéique

Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Aspects méthodologiques	8
2.1 Relevés de terrain	8
2.1.1 Prélèvement avec l'échantillonneur cylindrique.....	8
2.1.2 Mesures complémentaires.....	9
2.2 Traitements des échantillons.....	10
2.2.1 Tamisage sur le terrain	10
2.2.2 Tamisage en laboratoire.....	10
2.2.3 Filtration en laboratoire.....	10
2.3 Sélection des stations d'étude.....	12
2.4 Procédure d'analyses des résultats.....	14
2.4.1 Troncature des échantillons.....	14
2.4.2 Classes granulométriques et représentations graphiques.....	14
2.4.3 Effets de site et effets temporels	15
3. Résultats.....	18
3.1 Le Vieux Rhône de Chautagne	18
3.1.1 Localisation de la station et des prélèvements.....	18
3.1.2 Résultats	19
3.1.3 Localisation des stations et des prélèvements.....	21
3.1.4 Résultats	22
3.2 Le Vieux Rhône de Neyron.....	23
3.2.1 Localisation des stations et des prélèvements.....	23
3.2.2 Résultats	25
3.3 Le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite	28
3.3.1 Localisation des stations et des prélèvements.....	28
3.3.2 Résultats	29
3.4 Le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon.....	31
3.4.1 Localisation des stations et des prélèvements.....	31
3.4.2 Résultats	33
3.5 La Drôme à Livron-sur-Drôme.....	37
3.5.1 Localisation des stations et des prélèvements.....	37
3.5.2 Résultats	38
3.6 Le Vieux-Rhône de Baix-le-Logis-Neuf	40
3.6.1 Localisation des stations et des prélèvements.....	40
3.6.2 Résultats	41
3.7 Le Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	43
3.7.1 Localisation des stations et des prélèvements.....	43

3.7.2	Résultats	44
4.	Éléments de synthèse.....	48
4.1	Echantillonnage et représentativité.....	48
4.2	Vers une compréhension des modalités du comblement interstitiel	49
4.2.1	<i>Une variabilité inter-stationnelle marquée</i>	<i>50</i>
4.2.2	<i>Classification des stations selon la dynamique de la charge de fond et influence du gradient longitudinal.....</i>	<i>53</i>
5.	Conclusions et perspectives.....	57
6.	Bibliographie	59
7.	Annexes.....	61

1. Introduction

Le présent rapport fait état des travaux menés entre avril 2021 et mars 2024 dans le cadre de l'action C1 du programme OSR6. L'objectif de cette action est de déterminer quel est l'état du compartiment interstitiel du fond du lit des Vieux-Rhône (ou Rhône court-circuités, ci-après RCC) concourant à mieux évaluer la qualité des habitats benthiques et hyporhéiques, ainsi que l'effet des actions de restauration sur l'état de ce fond. L'état du fond du lit représente une composante importante de la qualité hydromorphologique du cours d'eau car il sert de substrat et de support à de nombreuses espèces aquatiques (animales et végétales). Il joue dès lors un rôle majeur pour la préservation de la biodiversité du cours d'eau.

Dans les substrats caillouteux, l'état du fond du lit est généralement apprécié au travers du degré de comblement interstitiel de la matrice caillouteuse. Ce dernier peut être défini comme l'infiltration dans la zone hyporhéique de sédiments fins depuis la zone benthique (Descloux et al. 2010). Bien que ce phénomène soit naturel, il peut devenir excessif sous les effets de l'anthropisation et conduire à perturber le fonctionnement des processus qui se déroulent dans la zone hyporhéique. L'accumulation de sédiments fins dans la zone hyporhéique a pour effets de réduire la porosité du substrat caillouteux, ce qui diminue les échanges d'eau interstitiels entre la masse d'eau superficielle et la zone hyporhéique. Ceci a des conséquences directes sur l'apport d'oxygène nécessaire à la survie des communautés d'invertébrés et des embryons de poissons lithophiles (Lisle, 1989 ; Wood et Armitage, 1997 ; Acornley et Sear, 1999 ; Greig et al., 2005 ; 2007), le comblement interstitiel est alors colmatant. Le comblement interstitiel apparaît donc comme une question sensible en matière d'évaluation des habitats benthiques. Dans les cours d'eau caractérisés par un déficit sédimentaire de la charge de fond et un pavage du lit mineur (et de la bande active), le comblement interstitiel peut être marqué. Ce phénomène est complexe car il est dynamique et il peut varier grandement en fonction des observations, selon l'occurrence des crues et des chasses par exemple. Dès lors, évaluer le comblement interstitiel nécessite un suivi temporel régulier en lien avec les épisodes hydrologiques critiques et l'état supposé du fond du lit. Par ailleurs, le remplissage dépend aussi de la nature granulométrique du sédiment colmatant, qui s'infiltre dans les interstices de la matrice caillouteuse, voire également de la granulométrie de cette matrice.

Les techniques utilisées pour décrire le comblement interstitiel des cours d'eau sont généralement des méthodes directes ou indirectes de mesure ou d'estimation du pourcentage de sédiments fins (Descloux et al., 2010 ; Peeters et al., 2021). Certaines de ces techniques se basent sur l'évaluation de la composition granulométrique de la zone hyporhéique pour caractériser le comblement interstitiel. C'est notamment le cas de la technique par prélèvement à l'aide d'un échantillonneur tel que celui utilisé par McNeil et Ahnell (1964). Ce dernier est un cylindre qui est enfoncé à la main dans le lit du cours d'eau et qui, de ce fait, permet de prélever un échantillon de la surface et de la subsurface. Cette technique a été validée en laboratoire lors d'essais avec des mélanges de sédiments connus (Young et al., 1991) et elle a été largement utilisée en conditions naturelles (e.g. Lambert et Walling, 1988 ; Rex et Petticrew, 2011 ; Bulteau et al., sous presse).

Pour répondre aux objectifs de ce travail, 10 campagnes d'évaluation du comblement interstitiel ont été réalisées sur 10 stations durant une période de 2,5 ans. Ce suivi temporel régulier a permis de bien évaluer la réponse du compartiment interstitiel, non seulement aux modifications du fond du lit suite aux événements de crue, mais également au mode de gestion des ouvrages hydrauliques et à l'histoire des ajustements du chenal. En outre, le nombre relativement élevé de stations étudiées permet de comparer différents secteurs de Vieux-Rhône dans des contextes *a priori* contrastés. Ainsi, le choix des stations s'est opéré afin de couvrir des contextes géographiques (depuis le Haut-Rhône jusqu'au Bas-Rhône) et des types de fonctionnement hydro-sédimentaire qui sont contrastés. C'est pourquoi, la sélection des stations comprend des secteurs sur lesquels des actions de réinjection sédimentaire ont récemment eu lieu. La quantification du comblement interstitiel permet d'évaluer l'effet de ces actions de restauration sur les habitats aquatiques. Les autres stations sélectionnées sont situées sur des secteurs à fort transport solide (stations de référence en termes de bon fonctionnement) et sur des secteurs très affectés par le déficit sédimentaire (stations de référence en termes d'état dégradé).

2. Aspects méthodologiques

Comme évoqué ci-dessus, l'évaluation du degré de comblement interstitiel se base dans cette étude sur la détermination de la composition granulométrique du fond caillouteux du chenal (comprenant les sédiments de la surface et de la subsurface). Pour ce faire, les échantillons prélevés à l'aide de l'échantillonneur cylindrique doivent faire l'objet de différents traitements qui sont décrits ci-dessous.

2.1 Relevés de terrain

2.1.1 Prélèvement avec l'échantillonneur cylindrique

Dans la mesure du possible, les prélèvements ont été réalisés sur la même forme fluviale, le seuil (ou le radier), à proximité immédiate de têtes de bancs d'accumulation. Ceci devrait permettre de s'affranchir des effets liés aux variations locales (à l'échelle de la forme) et de comparer les sites entre eux sur le continuum amont aval (Rice et Church, 1998). Aussi, le choix de ce faciès devrait permettre d'éviter les sites à faible énergie dont la granulométrie rend compte d'un contexte hydraulique local difficile à comparer avec d'autres sites (Surian, 2002). C'est en effet au niveau des seuils que se trouvent les particules les plus grossières en lien avec les mécanismes de contrôle hydraulique (i.e., sites à haute énergie).

L'échantillonneur utilisé consiste en un cylindre métallique de 15,4 cm de diamètre (*Figure 1, A*). Ce cylindre est enfoncé verticalement sur 20 cm à travers le lit caillouteux du chenal, ce qui permet par la suite de prélever les sédiments de surface et de subsurface (mélange des deux) à la main. Avant le prélèvement (T0), les mesures de la hauteur d'eau (moyenne de 5 valeurs) et de la hauteur d'air sont réalisées dans le cylindre. Ces mêmes mesures sont reprises après le prélèvement (T1), ce qui permet de calculer l'épaisseur de la couche de sédiment échantillonnée et le volume d'eau dans l'échantillonneur (V , équation 1) en m^3 (*Figure 1, B*). Ces mesures fournissent aussi une première appréciation du degré de comblement interstitiel des sédiments selon que le niveau d'eau dans le cylindre se soit remis à l'équilibre avec le niveau extérieur après le prélèvement (T1). Lorsque ce niveau est situé plus bas que celui de l'extérieur à T2, cela traduit un affaiblissement, voire une absence, de courants interstitiels et donc un milieu colmaté.

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot h_{eau\ T1} \quad (\text{Équation 1})$$

avec r (m) le rayon du cylindre, $h_{eau\ T1}$ (m) le niveau d'eau.

Pour compléter l'échantillonnage avec les fractions les plus fines, un prélèvement de 0,5 l d'eau est réalisé après la remise en suspension des sédiments fins à T1. Pour ce faire, l'eau contenue dans le cylindre est d'abord agitée à la main (mouvement continu en suivant la forme d'un huit). Le prélèvement de 0,5 l d'eau est ensuite réalisé après 10 secondes de repos. La concentration en matières en suspension (MES) est ensuite déterminée en laboratoire (*cf. infra*). Sur la base de cette concentration et du volume d'eau mesuré dans le cylindre à T1, la masse de MES sera déduite et incorporée à la masse de la fraction granulométrique la plus fine de l'analyse granulométrique.

Pour chaque station, trois prélèvements sont réalisés à différents endroits du radier étudié. Les trois échantillons sont par la suite analysés séparément (*cf. infra*) mais les résultats issus de leurs analyses granulométriques sont regroupés afin d'obtenir un échantillon représentatif de la composition du lit. En effet, pour que l'échantillon soit représentatif, il est nécessaire que le rapport entre la masse du plus gros élément et la masse totale de l'échantillon soit égal ou inférieur à la valeur limite de 5 % définie par Church et *al.* (1987).

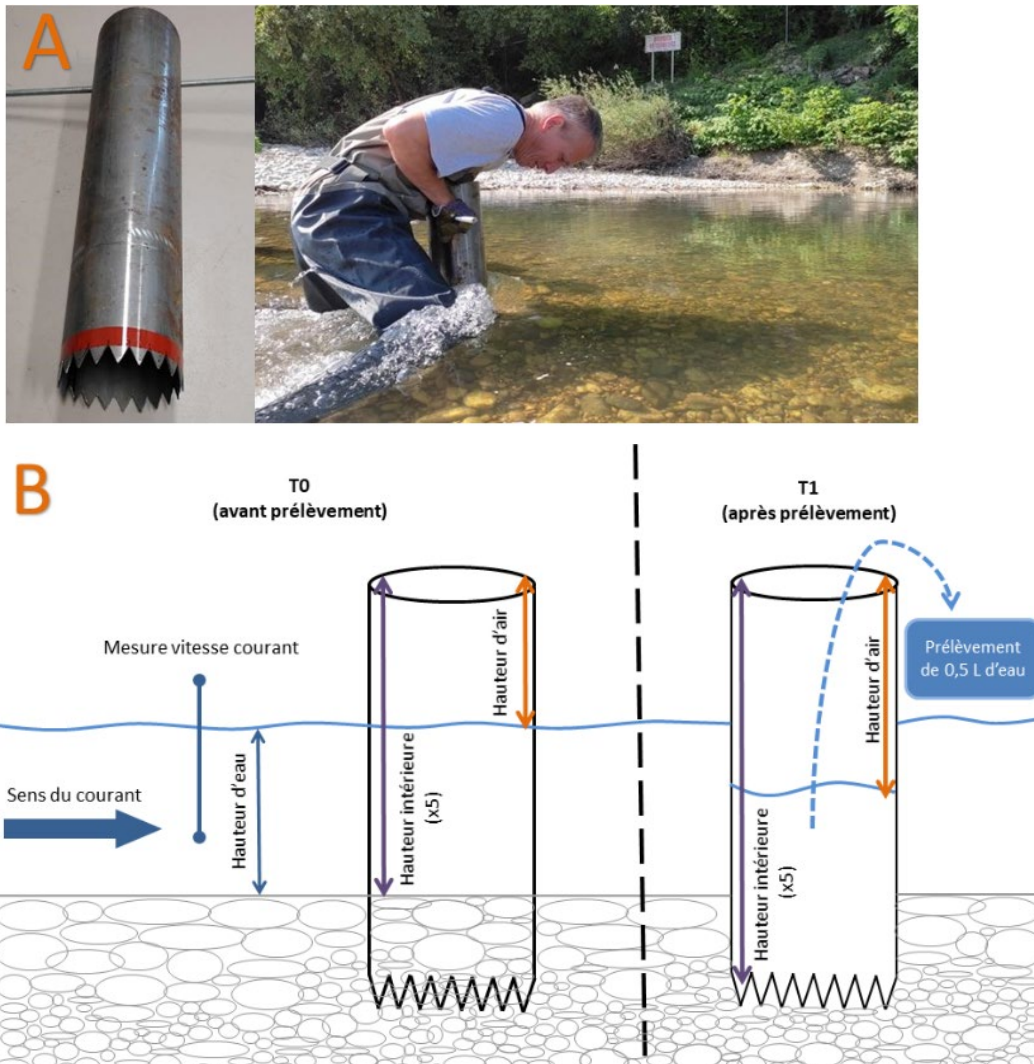


Figure 1. A : Echantillonneur cylindrique ($D = 15,4$ cm, $H = 70$ cm). Une tige métallique la traversant perpendiculairement permet son enfoncement dans le substrat par mouvements de rotation. **B :** Schéma du cylindre en T0 et T1 et des mesures effectuées

2.1.2 Mesures complémentaires

Afin de caractériser les conditions hydrologiques au droit de chaque prélèvement, la hauteur d'eau et la vitesse du courant sont mesurées. Cette dernière est réalisée avec un courantomètre portable (SonTek FlowTracker2®) à 10 cm au-dessus du fond du lit, comme recommandé par Petit (1988).

2.2 Traitements des échantillons

Les analyses qui suivent vont servir à déterminer la distribution granulométrique qui constituent les formes échantillonnées. Parmi les trois dimensions qui caractérisent la taille des éléments, c'est l'axe b (largeur) qui est généralement considéré comme représentatif de la compétence du cours d'eau (Bunte, 2004). Pour déterminer le rapport de masse des fractions granulométriques (axe b) qui constituent l'échantillon, la méthode utilisée nécessite de passer l'échantillon au travers de tamis successifs de différentes mailles et de peser la matière retenue dans chaque tamis (Bunte et Abt, 2001). Les plus gros éléments (>32 mm) sont directement triés à l'aide d'un gabarit.

2.2.1 Tamisage sur le terrain

Afin de ne pas déplacer des échantillons nombreux, lourds et encombrants, un premier tamisage a lieu sur le terrain à l'aide d'un gabarit à mailles carrées (64, 45 et 32 mm) et de grands tamis (22, 16 et 8 mm). Les fractions granulométriques triées sont ensuite pesées à l'aide d'une balance suspendue (Kern HDB 5K5, d=5 g). La fraction granulométrique inférieure à 8 mm est récupérée pour être analysée en laboratoire.

2.2.2 Tamisage en laboratoire

Avant leur tamisage, les échantillons (< 8 mm) sont séchés à l'étuve (4 à 8 h à 105 °C). Ils sont ensuite passés dans une colonne de tamis (8 ; 4 ; 2 ; 1 ; 0,500 ; 0,250 ; 0,125 ; 0,050 mm) agitée par une secoueuse électrique (Figure 2) lors d'un cycle de 3 minutes. Un tamisage manuel, de contrôle, est effectué à la sortie du cycle. Suite à l'étape de séchage, des agrégats peuvent se former entre les particules les plus fines. Elles sont alors passées manuellement au mortier et pilon afin de les séparer entre elles. Les secousses produites par la tamiseuse décollent celles agrégées sur les graviers et galets. Chaque fraction granulométrique récupérée est alors pesée avec une résolution de 0,01 g.



Figure 2. Analyse granulométrique en laboratoire nécessitant un tamisage à l'aide d'une colonne de tamis sur une secoueuse mécanique.

2.2.3 Filtration en laboratoire

Les échantillons d'eau prélevés dans le cylindre sont analysés en laboratoire afin de mesurer leur concentration en MES selon le protocole de filtration de Van Campenhout et al. (2022). Pour ce faire, le contenu de chacune des bouteilles est filtré au travers d'un filtre en microfibre

de verre (maille 1,2 μm) qui a été préalablement pesé (0,1 mg de résolution). Afin d'accélérer la filtration, celle-ci se fait sous vide à l'aide d'une pompe à air (Figure 3).

Le volume d'eau recueilli est mesuré avec une résolution de 1 ml. Le filtre chargé de sédiments est ensuite passé à l'étuve à une température de 50°C pendant 2 heures. Une fois sec puis stabilisé hygrométriquement à température ambiante, il est de nouveau pesé. La concentration (mg/l) en MES des échantillons est calculée selon l'équation 2.

$$C_{MES} = \frac{M_{MES+filtre} - M_{filtre}}{V_{eau}} \quad (\text{Équation 2})$$

Avec M (g) qui exprime la masse et V_{eau} (l) le volume d'eau de l'échantillon.

Ensuite, la masse des MES contenues dans l'échantillonneur (M_{MES} ; en g) est calculée selon l'équation 3.

$$M_{MES} = (C_{\text{échantillon}} - C_{\text{témoin}}) \cdot V \quad (\text{Équation 3})$$

avec $C_{\text{échantillon}}$ et $C_{\text{témoin}}$ correspondant à la concentration en MES de l'échantillon et du témoin, respectivement, et V le volume d'eau dans le cylindre en T1.

Cette masse est finalement additionnée à la fraction granulométrique la plus fine (issue du tamisage).



Figure 3. Matériel de filtration des MES (pompe à air, vase, support crépiné, verre gradué, filtre, éprouvette graduée).

2.3 Sélection des stations d'étude

La sélection des stations étudiées s'est faite avec le souci d'avoir une diversité de types de station, à savoir des stations sur des secteurs pavés, sur des secteurs dynamiques (identifiés comme références) et sur des secteurs sujets à des réinjections sédimentaires récentes ou programmées. Aussi, d'un point de vue opérationnel, ce choix a été dicté par les conditions d'accessibilité et de prélèvement. En effet, pour ce dernier point, un niveau d'eau supérieur à 40 cm rend le prélèvement difficile (irréalisable pour un niveau supérieur à 55 cm). Les prélèvements sont effectués sur le même type de forme fluviale, à savoir l'amont direct des radiers sur la rupture de pente, à proximité immédiate des têtes de bancs (potentiellement actifs si transport il y a).

Sur 13 stations prospectées, 10 ont été retenues et suivies temporellement pour cette étude (Tableau 1). Il faut noter que la campagne C1 comportait 2 sites redondants (Belley amont et Neyron aval) qui ont été retirés de cette sélection par la suite. En revanche, à la suite de la campagne C1, deux sites ont été ajoutés à cette sélection : Pierre-Bénite (car il s'agit un secteur pavé qui doit faire l'objet d'une réinjection sédimentaire fin 2024) et Baix-le-Logis-Neuf (où des sédiments ont été réinjectés en novembre 2021).

Les stations sont réparties sur un large gradient amont-aval (PK -125,5 à PK 185,75) (Figure 4), afin de représenter différents contextes hydrologiques, sédimentaires et relatifs à l'ancienneté de la création de ces Rhône court-circuités.

Tableau 1. Sélection des stations étudiées lors des 10 campagnes d'échantillonnage de 2021 à 2024

Secteur	CHA	BEL		LYM		PBN	PDR			DRO	BLN	DZM	
ID station	CHA	BEL PAM	BEL PAV	LYM PAM	LYM PAV	PBN	PDR pavée	PDR Marges	PDR PAV	DRO	BLN	DZM PAM	DZM PAV
Caract.	Pavée dynamique (aval réinjection)	Pavée	Pavée	Dynamique, site référence	Dynamique, site référence	Pavée	Pavée	Réinjection, Démant. Casiers	Pavée	Dynamique, site référence	Réinjection, nov. 21	Pavée	Pavée
C1	sept/oct 21												
C2	Dec. 21									**			
C3	Fev/mars 22												
C4	mai-22												
C5	août-22												
C6	nov-22												
C7	Jan/Fev 23		**										
C8	avr. 23						**						
C9	sept/oct. 23												
C10	jan. 24	**	**	**		**				**	**	**	**

(* : stations abandonnées car elles faisaient doublons sur un même secteur. ** : Stations non échantillonnées car débit trop important. *** : une station pavée a été abandonnée à Péage-de-Roussillon et remplacée par une autre (id : PDR) située sur un secteur plus représentatif d'un système pavé)



Figure 4 : Localisation des stations de prélèvements le long du Rhône

Au final, les 10 stations échantillonnées au cours des 3 années du programme OSR6 sont composées de :

- 2 stations dynamiques de référence : le Vieux-Rhône de Neyron (LYM) et la Drôme (DRO) ;
- 1 station dynamique en cours de pavage : le Vieux-Rhône de Chautagne (CHA) ;
- 5 stations pavées : le Vieux-Rhône de Belley (BEL), le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite (PBN), le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon (PDR "pavée") et le Vieux-Rhône Donzère-Mondragon (2 stations : DZM_PAM et DZM_PAV) ;
- 2 stations "réinjectées" : sur le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon (PDR "marges") et de Baix-le-Logis-Neuf (BLN).

Il faut préciser que seules deux stations "réinjectées" ont pu être sélectionnées, alors que quatre tronçons du Vieux-Rhône ont fait l'objet d'actions de réinjection sédimentaire (CHA, PDR, BLN et DZM). En effet, parmi ces quatre Vieux-Rhône, trois d'entre eux (CHA, PDR et DZM) ont été réinjectés en sédiments il y a plusieurs années (respectivement, en 2016, 2017 et 2019) et ils ne présentent plus aujourd'hui des conditions hydromorphologiques propices à l'échantillonnage. Les hauteurs d'eau y sont trop importantes car une grosse partie des sédiments réinjectés a été dispersée en aval avec le temps et l'occurrence de crues morphogènes. Néanmoins, pour le site de PDR "marges", un site propice à l'échantillonnage a été trouvé 2,3 km en aval de la réinjection. Il s'agit du site sur lequel les casiers Girardon avaient été démantelés entre décembre 2016 et mars 2017. A la suite des travaux d'élargissement du lit, un nouveau radier, composé de sédiments qu'on peut attribuer à ceux de la réinjection, s'est formé à l'entrée du bras (délimité par la berge gauche et le chapelet d'îlots issus du démantèlement). C'est ce radier qui a été échantillonné. Un tel radier, formé de sédiments issus de la réinjection sédimentaire, n'a pas pu être trouvé pour deux des autres Vieux-Rhône qui ont fait l'objet d'une réinjection sédimentaire (CHA et DZM). En revanche, ça a été le cas pour le Vieux-Rhône BLN car les sédiments y ont été réinjectés en novembre 2021, ce qui nous a permis de l'échantillonner directement après la réinjection, et ce à plusieurs reprises (les sédiments injectés n'étant pas encore dispersés vers l'aval). Il faut aussi noter pour cette station que le premier relevé (S1) correspond aux sédiments avant leur réinjection (granulométrie par pesée réalisée par la CNR).

2.4 Procédure d'analyses des résultats

2.4.1 Troncature des échantillons

La part de sédiments fins est un indicateur plus approprié que, par exemple, le D_5 ou le D_{10} , qui peuvent, eux, ne pas représenter les sédiments fins et sont sensibles à l'influence de quelques gros éléments. Dès lors, une troncature préalable des échantillons à 64 mm est effectuée ici, afin d'éviter que la mesure soit influencée par la présence de quelques grosses particules (Bunte et Abt, 2001). Cette précaution permet aussi, dans le cas des prélèvements au cylindre, de minimiser le biais induit par la déstructuration verticale du compartiment prélevé, en faisant l'hypothèse que les particules les plus grossières constituent majoritairement la couche de surface, relativement armurée, voire pavée dans les Rhône court-circuités (Parrot, 2015). En effet, l'étude ci-présente se focalise sur le compartiment interstitiel, et non sur la couche de surface.

2.4.2 Classes granulométriques et représentations graphiques

A partir des 12 classes issues des tamisages sur le terrain et en laboratoire, 4 classes sont retenues pour analyser les résultats (Wentworth 1922, Malavoi et Souchon, 1989) :

- < 0,05 mm, équivaut aux limons et aux argiles. La limite haute des limons étant à 0,063 mm, dans le cas ci-présent, le tamis utilisé le plus proche et donc retenus est 0,05 mm.
- De 0,05 à 1 mm ; équivaut aux sables fins.
- De 1 à 2 mm ; équivaut aux sables grossiers.
- De 2 à 16 mm ; équivaut aux graviers.

- De 16 à 64 mm ; équivaut aux galets.

Les sables, limons et argiles sont parfois regroupés en une classe, nommée classe des sédiments fins, car leurs parts sont minimales (au regard des autres classes), et car la proportion des sédiments fins est généralement utilisée comme proxy pour l'évaluation du comblement interstitiel du lit (F_f , Equation 4) :

$$\% \text{ de sédiments fins} = \frac{M_{< 2 \text{ mm}}}{M_{< 64 \text{ mm}}} \cdot 100 \quad (\text{Equation 4})$$

2.4.3 Effets de site et effets temporels

Après avoir mesuré les différentes classes et établi des statistiques descriptives pour chaque station et chaque campagne, l'objectif est de déterminer dans quelle mesure il est possible d'expliquer le degré de comblement interstitiel de la matrice caillouteuse (qui s'exprime par le pourcentage de sédiments fins dans cette étude) par des facteurs locaux ou des événements spécifiques observés entre deux dates. Pour ce faire, 8 variables numériques ont été considérées :

- Le pourcentage de graviers (%) de l'échantillon ;
- Le pourcentage de galets (%) de l'échantillon ;
- Le nombre de jours écoulés entre la dernière crue morphogène (Q_c) et la campagne d'échantillonnage ;
- Un indice d'intensité de la crue la plus forte se produisant entre chaque campagne :

$$Q_{int} = \frac{Q_j^{max}}{module} \quad (\text{Equation 5})$$

La valeur obtenue a ensuite été normalisée de la façon suivante :

$$Q_{int_i} = \frac{Q_{int_i}}{Moyenne(Q_{int})} \quad (\text{Equation 6})$$

- La hauteur d'eau (cm) au moment de l'échantillonnage, soit pour le débit réservé (à l'exception de la Drôme). Pour les campagnes dont la mesure n'a pu être réalisée, la moyenne par station a été calculée) ;
- La vitesse du courant (cm/s) au moment de l'échantillonnage, soit pour le débit réservé (à l'exception de la Drôme). Pour les campagnes dont la mesure n'a pu être réalisée, la moyenne par station a été calculée) ;
- La position de la station vis-à-vis du gradient longitudinal, 0 correspondant au lac Léman et 1 à l'exutoire au niveau de la mer Méditerranée ;
- Le taux de variation du pourcentage de sédiments fins entre deux campagnes successives.

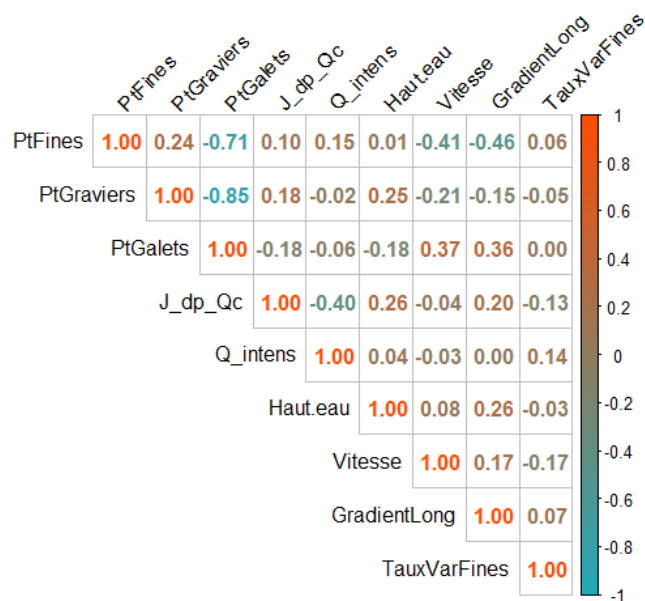


Figure 5 : Matrice de corrélation entre les 8 variables considérées pour expliquer le degré de comblement interstitiel de la matrice caillouteuse (pourcentage de sédiments fins)

La matrice de corrélation (Figure 5) met en évidence une corrélation linéaire négative entre le pourcentage de sédiments fins et la part des galets avec un bon coefficient de corrélation (-0,71), ce qui est normal étant donné que ces deux variables sont auto-corrélées. C'est également le cas, dans une moindre mesure, pour la vitesse (avec un coefficient de corrélation égal à -0,41). De fait, il y a bien un effet de site qu'il convient de prendre en compte avant d'explorer l'effet du pavage ou de la recharge. Deux radiers n'ont pas forcément les mêmes propriétés hydrauliques et la même propension à stocker des sédiments fins. On se propose ainsi d'enlever cet effet de site en calculant les résidus de la régression multiple liant la part des sédiments fins et les variables *PtGalets* et *Vitesse*.

Une régression linéaire multiple (Equation 7), a été réalisée à partir de la fonction *lm()* de R Studio.

$$RegMoy = -0,36 * PtGalets - 0,04 * Vitesse + 33,72 \text{ (Equation 7)}$$

L'analyse de régression présentée dans le *Tableau 2* indique que les p-values du pourcentage de galets et de la vitesse ont des effets significatifs sur le pourcentage de sédiments fins puisqu'elles ont des valeurs inférieures à 0,05. Les coefficients ont des valeurs négatives, indiquant que plus les valeurs pour chacune de ces variables sont élevées, plus le pourcentage de sédiments fins aura tendance à diminuer.

Tableau 2 : Analyse de la régression linéaire multiple entre le pourcentage de sédiments fins et le pourcentage de galets et la vitesse

	Estimation	Erreur type	P-value
<i>Pourcentage de galets</i>	- 0,36	0,04	$3e^{-12}$
<i>Vitesse</i>	- 0,04	0,02	$4e^{-02}$
	33,72	2,45	$5e^{-23}$

L'analyse des nuages de point (Figure 6) montre qu'il existe des valeurs seuil au-delà desquels le pourcentage de sédiments fins atteint un maximum que ce soit en fonction du pourcentage de galets ou des vitesses locales.

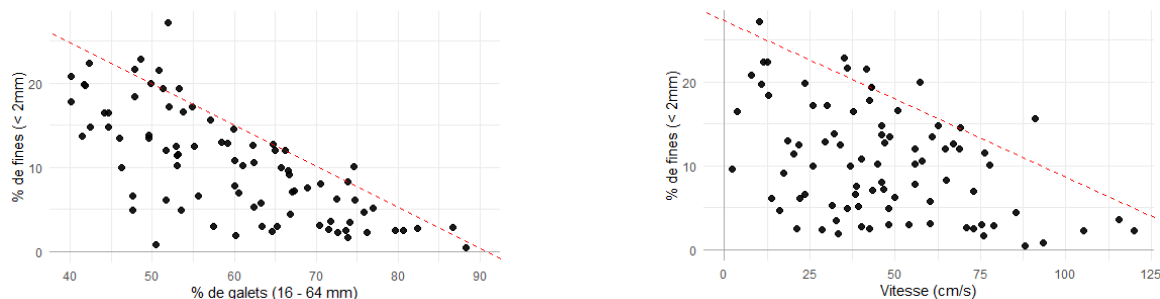


Figure 6. Distribution du pourcentage de sédiments fins en fonction du pourcentage de galets (à gauche) ; de la vitesse (à droite). Les droites rouges correspondent à la régression du D90.

Dès lors, plutôt qu'une régression linéaire classique, nous avons préféré une régression quantile multiple pour le 90ème percentile. La formule de cette régression quantile est alors la suivante (Equation 8) :

$$RegD90 = -0,49 * PtGalets - 0,003 * Vitesse + 44,41$$

(Equation 8)

Le *Tableau 3* donne des informations concernant les intervalles de confiance relatifs aux 3 coefficients considérés dans cette équation.

Tableau 3 : Coefficients de la régression quantile dD90 du pourcentage de sédiments fins par rapport au pourcentage de galets et à la vitesse

	Estimation	Borne inférieure	Borne supérieure
Pourcentage de galets	-0,49	0,58	-0,31
Vitesse	-0,003	-0,12	0,06
	44,41	39,49	48,76

Pour pouvoir établir des comparaisons entre les différentes stations, il faut s'affranchir de l'effet de ces 2 variables sur le pourcentage de fines en calculant les résidus de la régression quantile multiple via cette formule :

$$Residus_i = PtFines_{Obs-i} - PtFines_{Predits_i} \text{ (Equation 9)}$$

La variabilité des caractéristiques hydrologiques entre les dates ne semble pas influencer les valeurs de sédiments fins que l'on observe dans les interstices des fonds de lit. En revanche, il semble qu'il y ait également une relation avec la distance aval. Celle-ci fera l'objet d'une analyse plus qualitative dans la partie résultat.

3. Résultats

Les données environnementales (dates, vitesse, hauteur d'eau) et de prélèvement (masse, critère de représentativité) sont consignées, toutes stations et toutes campagnes assemblées, en *Annexe 1*.

3.1 Le Vieux Rhône de Chautagne

3.1.1 Localisation de la station et des prélèvements

Le Vieux-Rhône de Chautagne est caractérisé par un chenal faiblement pavé (indice de pavage compris entre 1,87 et 2,21) et par une charge de fond résiduelle et de petite taille (D_{50} entre 20 et 27 mm ; Parrot, 2015). L'aménagement de Chautagne et son usine hydroélectrique datent de 1979, et le Haut-Rhône (amont de Lyon) n'a pas connu d'aménagements de type Girardon. De ce fait, il demeure actuellement des ajustements géomorphologiques et un transport sédimentaire résiduel.

La station échantillonnée sur ce Vieux-Rhône se trouve à 4 km en aval du barrage de Motz et à 3,3 km en aval de la zone rechargée en sédiments en décembre 2016 (Figure 7). Aucun site propice au prélèvement n'a été trouvé plus proche du site de recharge. La station se situe en bordure d'un banc végétalisé et sur la partie amont d'un grand radier. Elle est de ce fait caractérisée par des vitesses relativement élevées (Figure 8). A cet endroit, le Vieux-Rhône est aussi divisé en deux écoulements.



Figure 7. Le Vieux-Rhône de Chautagne : localisation de la station.



Figure 8. Le Vieux-Rhône de Chautagne le 28/11/2023

3.1.2 Résultats

Les échantillons prélevés lors des 9 campagnes peuvent être considérés comme représentatifs de la forme étudiée, dans le sens où ils possèdent un rapport entre la masse du plus gros élément et la masse totale de l'échantillon proche de la valeur limite de 5 % définie par Church *et al.* (1987). Il faut cependant noter que pour les campagnes C6 et C9, ce pourcentage atteint respectivement 17 % et 10 %. Les vitesses de courant s'échelonnent de 37 à 91 cm/s, tandis que les hauteurs d'eau vont de 12,0 cm à 41,2 cm.

Sur l'ensemble des campagnes, la part de sédiments fins (< 2 mm) est comprise entre 7 et 16 %. La part relative des trois classes (*Figure 9, Haut*) connaît de légères variations au cours du temps, avec une prédominance pour les particules grossières (min. 54 % à max. 67 %). De longues périodes de débit réservé sont observables entre C1 et C2, ainsi qu'entre C8 et C9, des périodes marquées par une diminution du pourcentage des sédiments fins. De C2 à C6, en revanche, le régime hydrologique est caractérisé par une succession de pics de crues, même de faible intensité, et une augmentation sensible de la part de sédiments fins associée à une diminution de la part des particules grossières. Sur l'ensemble de la période observée, le débit morphogène Q_c (510,3 m³/s) est atteint entre chacune des campagnes, excepté entre C1 et C2. Les sables fins (1 - 0,05 mm) représentent la plus grande partie des sédiments fins, notamment pour C3, C4 et C5, avec plus de 10% des échantillons totaux pour chacune des campagnes. La part des limons et argiles a augmenté entre C1 et C6, passant de 0,6 % à 2 %, et a atteint leur maximum en C7 avec 4% avant de diminuer de nouveau. Il est important de

noter que les mesures ont débuté après une opération d'APAVÉR¹, du 17 au 29 mai 2021, ainsi qu'après une crue morphogène en juillet 2021, à savoir deux évènements susceptibles d'avoir modifié localement les conditions d'habitat du lit mineur.

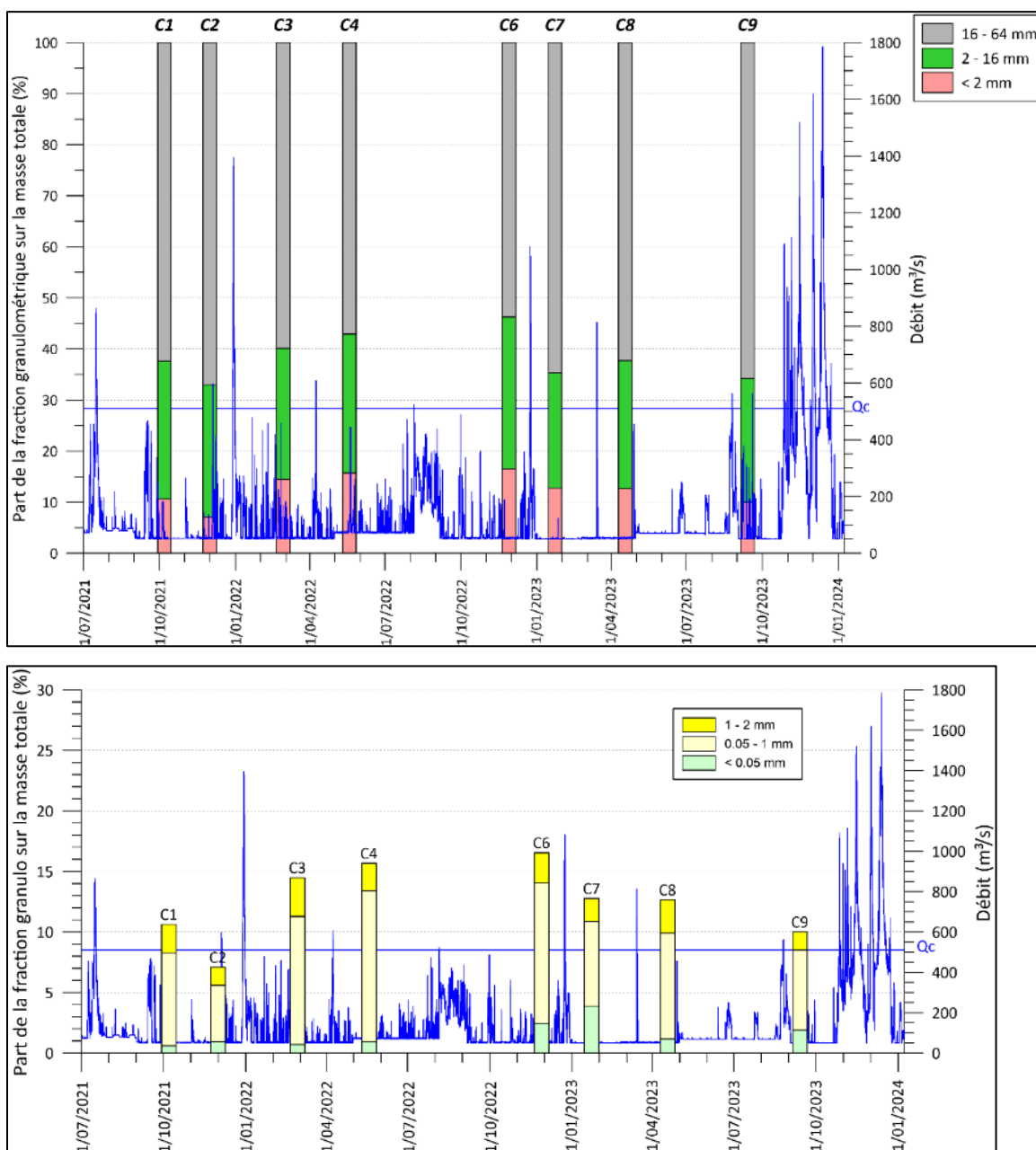


Figure 9. Le Vieux-Rhône de Chautagne : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C1 à C9. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits horaires bruts et non-validés, fournis par la CNR (station limnigraphique du barrage de Motz)

¹ Abaissement Partiel du barrage de VERbois. Cette opération consiste en une vidange partielle du barrage de Verbois (haut Rhône Suisse), tous les 3 ans.

3.1.3 Localisation des stations et des prélèvements

Le Vieux-Rhône de Belley est caractérisé par un chenal faiblement pavé (indice de pavage compris entre 2,12 et 2,72) et par un lit composé d'éléments de petite taille (D_{50} : 24 mm ; Parrot, 2015). Deux stations avaient initialement été sélectionnées (BEL_PAM et BEL_PAV pour la campagne C1), seule la station BEL PAV a été suivie *in fine* car les deux sites se sont révélés être redondants.

La station, localisée à 6,5 km en aval du barrage de Lavours, se trouve à l'entrée d'un bras secondaire, plus précisément sur la partie amont du radier d'entrée dans ce bras secondaire (Figure 10 et 11).

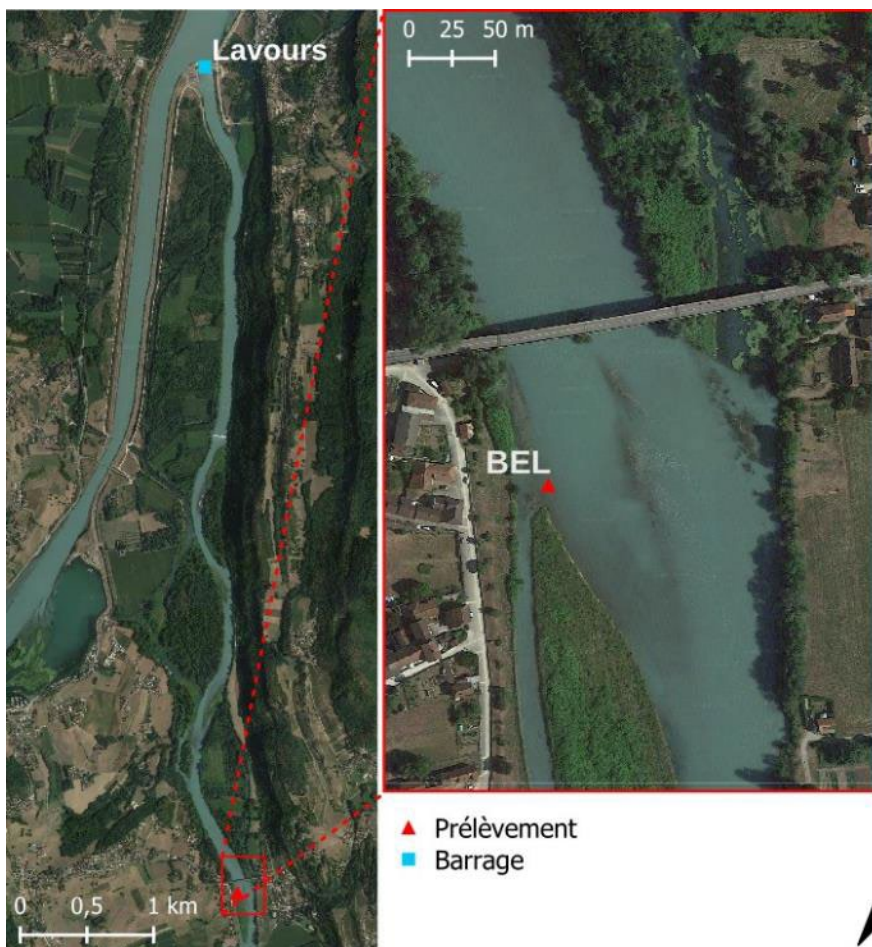


Figure 10. Le Vieux-Rhône de Belley : localisation des stations et des prélèvements



Figure 11. Le Vieux-Rhône de Belley : station BEL PAV lors de la campagne C1 (24/09/2021).

3.1.4 Résultats

Pour chaque échantillon prélevé dans le Vieux Rhône de Belley, le rapport entre la masse du plus gros élément et la masse totale de l'échantillon est comprise entre 2 et 4 %, des valeurs signifiant que ces prélèvements sont représentatifs de la forme échantillonnée (Church et *al.*, 1987). Les vitesses sont comprises entre 26 cm/s et 62 cm/s dans des conditions de débit réservé et les hauteurs d'eau varient de 12,3 cm à 31,3 cm.

La période hydrologique couverte par les 9 campagnes est caractérisée par une dominance du débit réservé (à l'inverse de Chautagne) et l'occurrence de crues de forte intensité. Le débit morphogène Q_c (406 m³/s) est dépassé à 6 reprises, mais ne se produit pas entre C3 et C5. La composition granulométrique reste stable dans le temps, les sédiments les plus grossiers représentant approximativement 50% des échantillons. La part de fins, tout de même importante, varie peu entre les campagnes (de 15 à 23 %). Elle connaît une baisse à partir de C8 à la faveur de la classe des 2-16 mm.

Les sédiments les plus fins montrent une forte dominance des sables fins, entre 12 et 17 % de l'échantillon total (*Figure 12*). La part des sables grossiers varient entre 2 et 4 % ; tandis que limons et argiles représentent des parts stables dans le temps (de 1 % à 1,6 %). Le pourcentage de sédiments fins de C1 et C6 préfigure un compartiment interstitiel qui apparaît comme rempli. Un déstockage des sédiments fins, notamment de sables fins, semble s'être produit en C8 et C9 où leur part descend en-dessous de 20% de l'échantillon total.

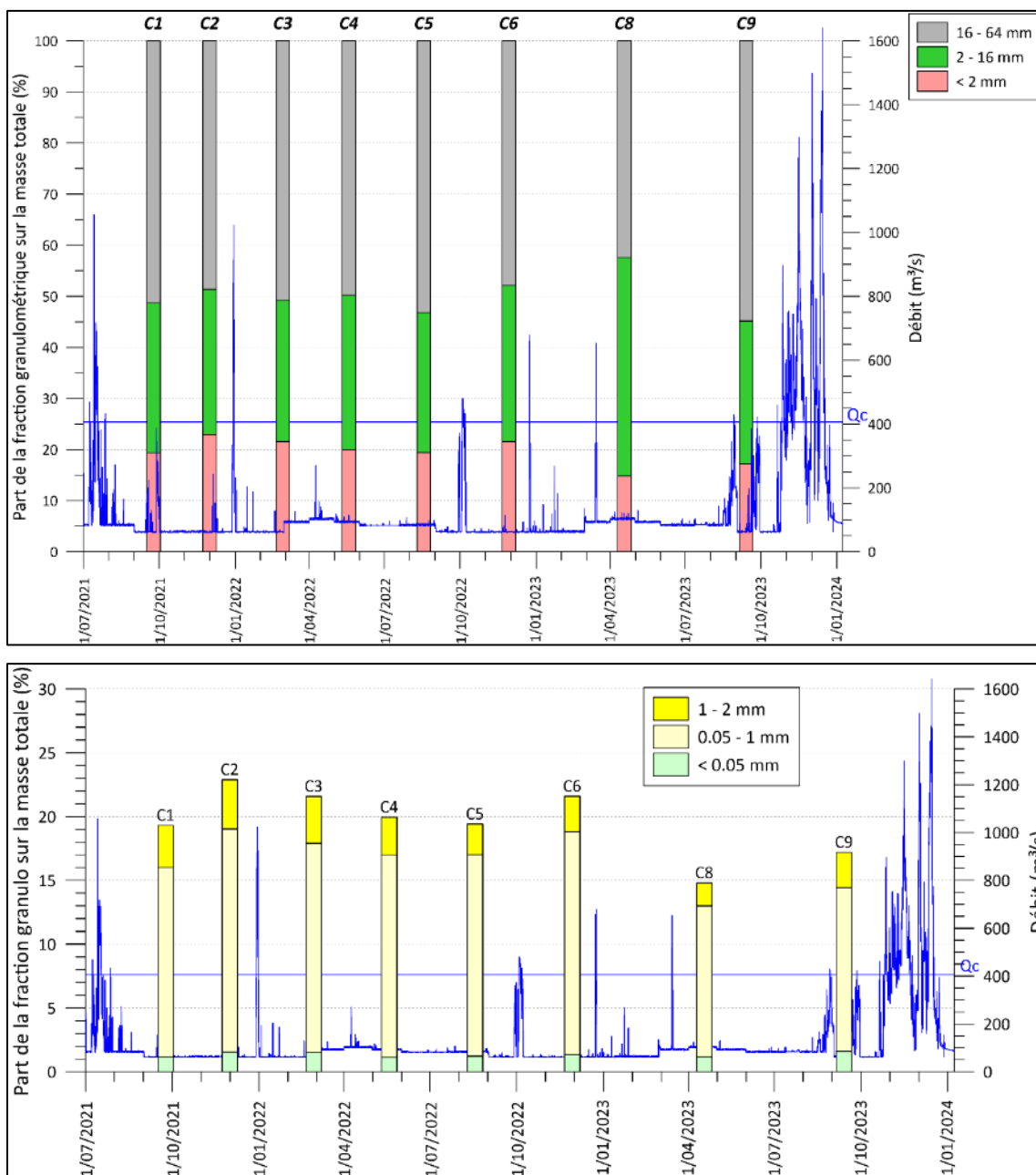


Figure 12. Le Vieux-Rhône de Belley : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C1 à C9. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station virtuelle dont les débits sont calculés à partir de ceux mesurés aux stations limnigraphiques des barrages de Savières et de Lavours)

3.2 Le Vieux Rhône de Neyron

3.2.1 Localisation des stations et des prélèvements

Deux stations ont été initialement identifiées sur ce Vieux-Rhône. Une seule d'entre elles a été retenue (LYM_PAM) car les deux stations étaient redondantes. La station conservée se trouve à une distance de 14,1 km en aval du barrage de Jons (Figure 13). Il s'agit un secteur à

fort enjeu car il contrôle la répartition des débits entre le canal de Miribel, le Vieux-Rhône de Neyron et le canal de Jonage. Il participe de ce fait au bon fonctionnement du champ captant de Crépieux-Charmy. Les sédiments du chenal y sont relativement peu grossiers, comme l'indiquent les mesures réalisées en amont dans le canal de Miribel (D_{50} : 17-25 mm ; indice de pavage compris entre 1,4 et 2,6 ; Parrot, 2015).

Ce site est identifié comme site de référence, en raison de l'absence de pavage et d'un transport sédimentaire actif avéré. En effet, le barrage de Jons est transparent à la charge de fond, et l'Ain semble apporter un volume important de matériaux sur ce tronçon (Malavoi 2000 ; Cassel et al. 2019).

Le secteur dans lequel se trouve la station LYM PAM présente une morphologie qui varie dans le temps en fonction des événements hydrologiques et des travaux du gestionnaire du champ captant (Figure 13). Ce dernier a notamment créé un bras secondaire en rive gauche du chenal principal durant l'automne 2021 en curant 8000 m³ de sédiments (A. Perrissin, communication personnelle, le 25/04/2022). Bien que ce bras se soit comblé suite aux crues de décembre 2021/janvier 2022, un prélèvement y a été réalisé durant la campagne C2 (2/12/2021). Du fait de ces changements morphologiques, les prélèvements sont effectués à des endroits sensiblement différents.



Figure 13. Le vieux-Rhône de Neyron : localisation des stations de prélèvement



Figure 14. Le Vieux-Rhône de Neyron, station LYM_PAM. A : campagne C2, le 2/12/2021. B : campagne C7 le 24/01/2023. Des changements morphologiques (divagation latérale, longueur du radier) sont observées depuis fin 2021.

3.2.2 Résultats

Pour la plupart des échantillons prélevés dans le Vieux-Rhône de Neyron, le rapport entre la masse du plus gros élément et la masse totale de l'échantillon est inférieur ou égal à 5 %, ce qui signifie que ces échantillons sont représentatifs de la forme échantillonnée (Church et al., 1987). Ces valeurs sont cependant de 9 % et 8 % pour C2 et C5. Les hauteurs d'eau au moment des prélèvements varient entre 14 et 34 cm, pour des vitesses allant de 14 à 93 cm/s.

De manière générale, la part des sédiments fins (<2 mm) des échantillons est relativement faible et ce, indépendamment de la campagne et du lieu de prélèvement (Figure 15). C'est l'échantillon de la campagne C2, prélevé dans le bras secondaire recréé, qui présente la valeur la plus faible (0,9 %). Le maximum de 7 % est atteint à la campagne suivante (C3) puis redescend, jusqu'à se stabiliser entre 2 et 3 % depuis C6. Les deux autres classes de sédiments plus grossiers connaissent de légères fluctuations : la part des graviers (2-16 mm) se situent entre 32 % et 49 % ; tandis que celle des galets (16-64 mm) évoluent entre 48 % et 65 %.

La Figure 15(*Bas*) permet de mieux se rendre compte de la répartition des différentes classes constituant les sédiments fins et de leur évolution temporelle. De manière générale, les sables grossiers et fins sont représentés à part égale. Les limons et argiles apparaissent comme davantage présents dans les échantillons depuis C4 puisqu'ils passent de 0,1% à 1,3% en C9. Ainsi, lors de cette dernière campagne les argiles et limons sont la classe des sédiments fins majoritaires.

Bien que la part de sédiments fins reste la moins représentée par rapport aux autres classes de sédiments plus grossiers, la répartition des deux autres classes granulométriques varie davantage, quelle que soit l'hydrologie (occurrence de crues). Même en considérant la différence de position du site de prélèvement entre C1 et C2 qui explique en partie la variation dans la répartition granulométrique, les fluctuations de valeurs des autres campagnes peuvent être liées à la dynamique du secteur. L'hydrologie ne semble pas être un facteur explicatif de ces évolutions, des crues morphogènes se sont produites à plusieurs reprises sur la période considérée, notamment de C1 à C3 et C6 à C8. De même, les fenêtres temporelles entre C4 et C6 et celle antérieure à C9 connaissent de longues périodes en débit réservé. Or, la part totale des sédiments fins ne suit pas de tendance marquée suite à ces événements.

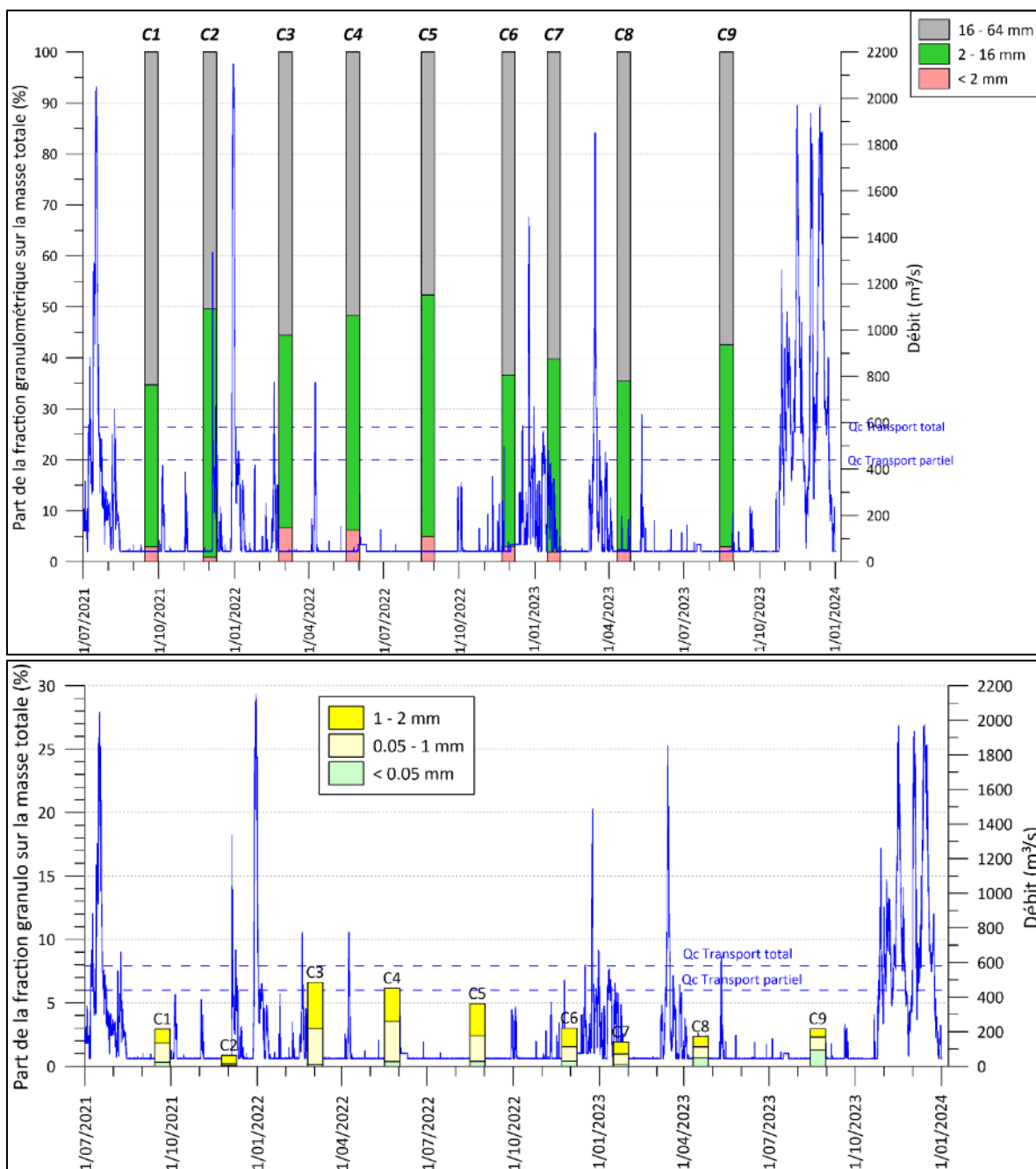


Figure 15. Le Vieux-Rhône de Neyron : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C1 à C9. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits horaires bruts et non validés fournis par EDF pour le canal de Miribel (les débits critiques Q_c transport total - 440 m^3/s - et Q_c transport partiel - 580 m^3/s - sont les valeurs estimées par Petit et al., 1996)

3.3 Le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite

3.3.1 Localisation des stations et des prélèvements

Le Vieux Rhône de Pierre-Bénite est caractérisé par un lit composé majoritairement de grosses particules (D_{50} : 43-55 mm) et un indice de pavage compris entre 4 et 8 (Parrot, 2015). La station échantillonnée, située 5,2 km en aval du barrage de Pierre-Bénite, se trouve sur un dépôt latéral immergé (Figure 16 et Figure 17).

Les prélèvements ont débuté à la campagne C2 pour des raisons administratives (retard dans l'obtention d'autorisation d'accès au site).



Figure 16. Le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite : localisation de la station de prélèvement



Figure 16 : Le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite (23/01/2023)

3.3.2 Résultats

Les prélèvements de ce site présentent à 4 reprises un rapport entre la masse de la particule la plus grosse et celle de l'échantillon totale largement supérieur à 5 %, ce qui pose un problème de représentativité (Church et *al.*, 1987). En C2, C4, C5 et C7, ce rapport vaut entre 9 et 19 %. Pour les autres campagnes, il vaut entre 4 et 8 %. Les hauteurs d'eau sont comprises entre 17 cm et 38 cm, pour des vitesses variant entre 4 cm/s et 30 cm/s.

Les deux classes de granulométrie grossière sont relativement équilibrées (Figure 18, *Haut*). La campagne C3 montre néanmoins une part de graviers de 20 %, ce qui est bien inférieure aux autres campagnes. Cette campagne présente le plus fort pourcentage de sédiments fins : 27%. Il s'agit de la part de sédiments fins la plus importante, tout site et toute campagne confondue. D'une manière générale, ce site est caractérisé par les pourcentages de sédiments fins les plus hauts (de 16,5 à 27,0 %). Hormis ces deux extrêmes en C3 (max.) et C4 (min.), les sédiments fins sont relativement stables dans le temps et oscillent autour des 20 %.

La classe des sédiments fins est représentée à part relativement égales par les sables grossiers et fins ; bien que ces derniers soient légèrement supérieurs et en particulier en C3 avec 21 % de l'échantillon total (Figure 17). Excepté en C6, le pourcentage des limons et argiles est en constante augmentation passant de 0,9% à 7,0%, soit autant que les sables grossiers en C9.

Comme à Belley, cet équilibre dans la répartition des trois classes granulométriques et la forte quantité de particules fines indiquent un compartiment interstitiel comblé qui ne suggère aucun stockage ou déstockage. Une majeure partie des sédiments fins sont < 1 mm et disposent donc d'un fort potentiel colmatant. De même, la Figure 17 met bien en évidence la faible occurrence de crues morphogènes : un débit supérieur à 1880 m³/s n'est atteint qu'en deux dates, la dernière étant entre C2 et C3.

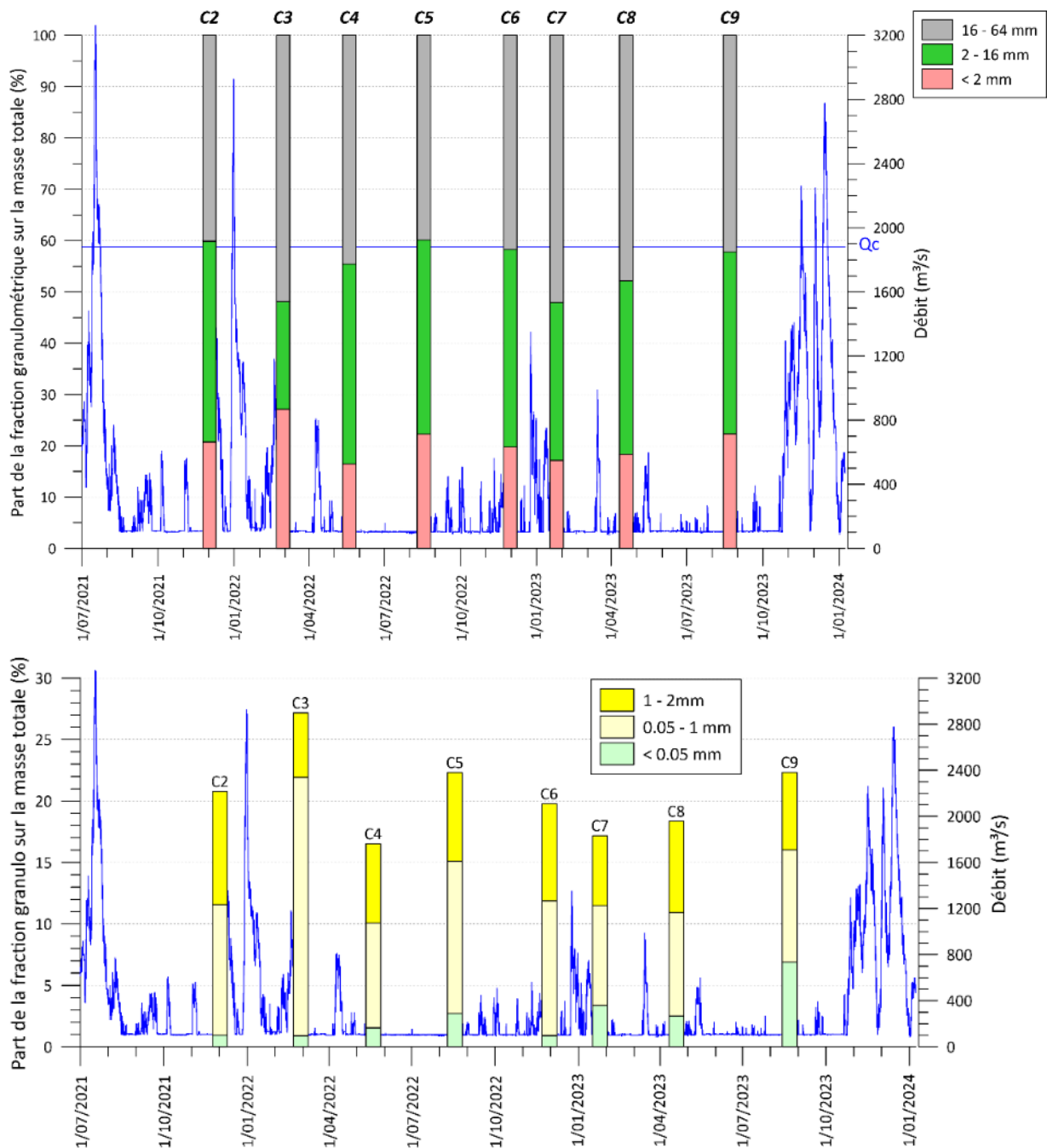


Figure 17. Le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C2 à C9. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique du barrage de Pierre-Bénite).

3.4 Le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon

3.4.1 Localisation des stations et des prélèvements

Les deux stations échantillonnées le long du Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon se trouvent à 2,5 km (PDR "pavée") et 3,8 km (PDR "marges") en aval du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf (*Figure 19*). Ce secteur a fait l'objet de travaux de restauration écologique entre décembre 2016 et mars 2017, à savoir un démantèlement des casiers Girardon de l'île des Gravieres et une opération de réinjection sédimentaire réalisée à 1,2 km en aval du barrage. Les deux stations sont susceptibles de contenir des particules issues de la réinjection. Ces particules devraient toutefois représenter une quantité limitée compte tenu des vitesses de transport sédimentaire et de la distance considérée (Vázquez Tarrío *et al.*, 2021). Néanmoins, la station PDR "marges" se trouve sur un site d'accumulation préférentielle de galets, dont une partie provient de la recharge sédimentaire (comme l'ont montré les relevés RFID du suivi de la réinjection sédimentaire ; Peeters *et al.*, 2024).

Le secteur sur lequel se trouve la station PDR "pavée" possède un chenal composé de particules relativement grossières (D_{50} : 51 mm) et présente un pavage prononcé (indice de pavage de 5,43 ; Parrot, 2015). Sur la station PDR "marges", les prélèvements sont systématiquement effectués sur le radier du bras secondaire, formé par le démantèlement du casier. Les sédiments qui s'y trouvent sont moins grossiers que sur la station pavée. Comme évoqué ci-dessus, ils sont probablement issus de la remobilisation de matériaux de la réinjection sédimentaire réalisée 2,3 km en amont en 2017.

Concernant la station pavée (PDR "pavée"), les prélèvements C1 et C2 ont été effectués en rive gauche, et par la suite en rive droite (C3 à C10). Elle est ainsi considérée comme une seule station car les sites sont proches et caractérisés par un fond caillouteux pavé.

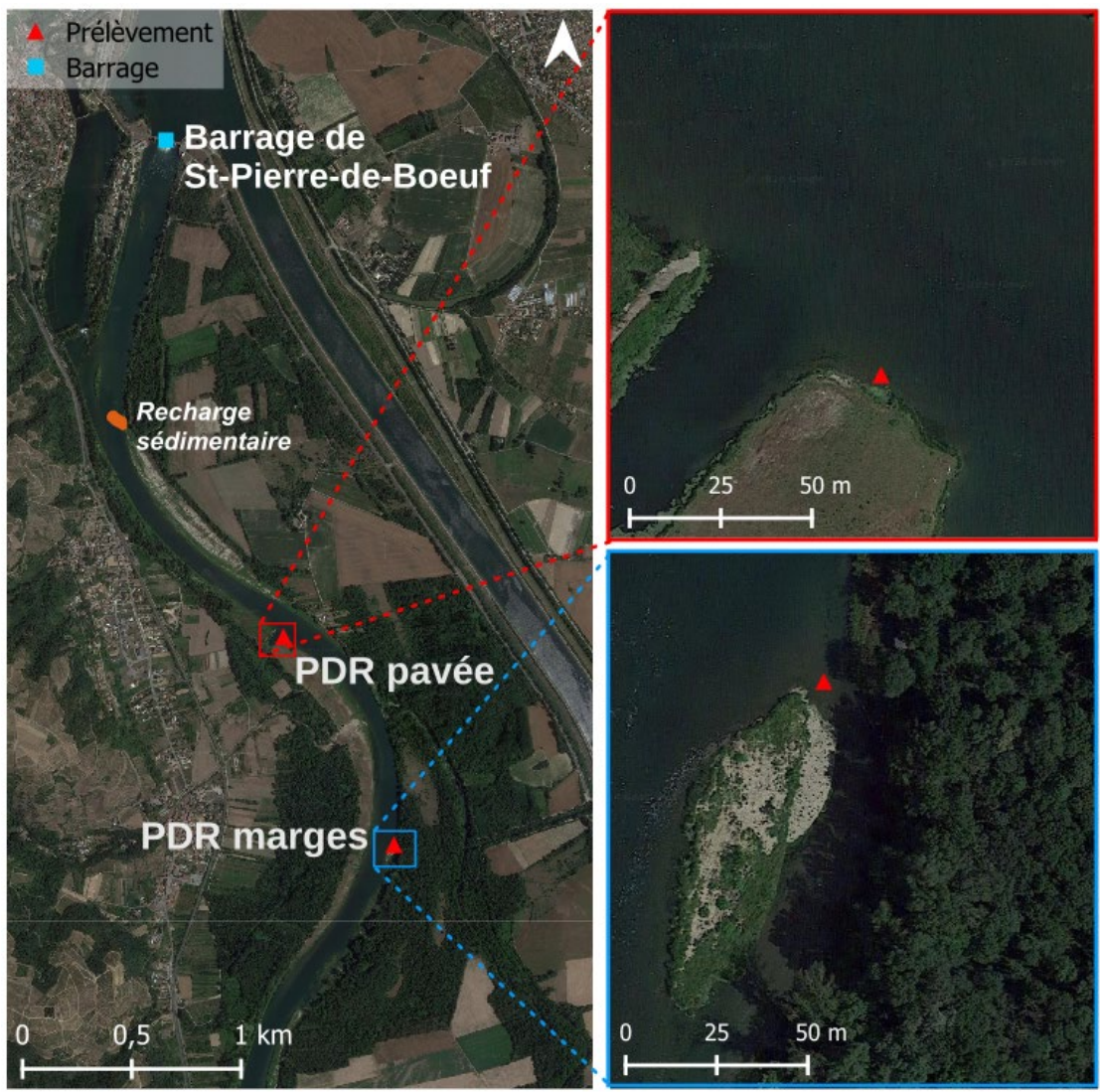


Figure 18 : Le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon : localisation des stations et des prélèvements



A



Figure 19. Le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon. A : station PDR "marges" lors de la campagne C1 (15/10/2021). Les prélèvements se font sur le radier de rive gauche, à l'intérieur du périmètre de l'ancien casier Girardon. B : station PDR "pavée" lors de la campagne C6 (17/11/2022). On note la taille importante des particules sur le banc

3.4.2 Résultats

Pour la station pavée, les calculs du rapport entre la masse de la particule la plus large par rapport à l'échantillon total pour chacune des campagnes est systématiquement supérieur à 5 %, excepté en C1. Pour la station PDR "marges", ce rapport est inférieur ou avoisine le seuil de 5 %, indiquant la bonne représentativité de l'échantillon (Church et *al.*, 1987), excepté pour les campagnes C5 et C10 (8 et 9 %).

Pour la station pavée, les hauteurs d'eau s'échelonnent entre 26 cm et 42 cm pour des vitesses allant de 20 cm/s à 36 cm/s. Quant à la station "marges", les hauteurs d'eau vont de 6 cm à 42 cm pour des vitesses entre 2 cm/s et 79 cm/s.

La répartition des 3 classes granulométrique de la station pavée montrent une variabilité temporelle. La part des sédiments les plus grossiers (16-64 mm) est plus importante que celles des graviers (2-16 mm), avec des valeurs variant respectivement entre 40 et 59 % contre 28 et 46 %. La proportion des sédiments fins bien qu'inférieure, n'est pour autant pas négligeable et connaît de fortes fluctuations puisqu'elle représente entre 5 et 20 %. (Figure 21).

Pour la station "marges", la classe des galets (16-64 mm) est largement dominante, avec des pourcentages allant de 58 à 87 %. La classe des 2-16 mm connaît une variation assez conséquente, avec des pourcentages variant de 10 à 29 % de l'échantillon. Le même constat peut être établi pour les sédiments fins qui fluctuent de 3 à 13 % (Figure 22). Le site de prélèvement se trouvant un banc qui s'engraisse, le fond du lit est peu cohésif et non stabilisé.

Les 3 grandes classes granulométriques présentent donc quelques différences dans leur distribution entre les deux sites, la station pavée ayant une part de fine plus importante que la station "marges". L'hydrologie sur la période étudiée indique une forte occurrence de crues pour la période antérieure à C3, dont certaines morphogènes ($Q_{max} > Q_C$) et de haute intensité, suivie une longue période sans événement majeur jusqu'à C6. La part des sédiments fins des deux stations présentent des valeurs similaires entre C1 et C5. Une alternance de crues

relativement importantes et des périodes de faible débit caractérise la période comprise entre C6 et C9 ; la part des sédiments fins ne suit pas de tendance particulière. La période comprise entre C9 et C10 est caractérisée par une longue crue de forte intensité ($Q_{\max} > Q_C$). Les effets sur la part de sédiments fins de cette période hydrologique sont divergents entre les deux stations : le pourcentage de sédiments fins connaît une baisse sur la station pavée ; tandis que celui sur la station "marges" augmente. Les deux stations se retrouvent avec un pourcentage de sédiments fins similaires en C10.

La *Figure 20 (Bas)* montre une dominance de sables fins dans la fraction granulométrique des sédiments fins de "PDR pavée" (excepté pour C6 et C8), avec de légères variations (leurs proportions évoluant entre 2 % et 9 %). Les sables grossiers gardent des proportions relativement stables qui oscillent entre 2 et 4 %. Pour les limons et argiles, entre C1 et C8, leur part est moindre comparé aux deux autres fractions, elles varient entre 1 % et 3 %. En C9, cependant, ils représentent 7 % de l'échantillon, soit plus que les sables grossiers.

Pour la station PDR "marges", la classe dominante parmi les sédiments fins est aussi celle des sables fins, avec des parts plus prononcées que pour "PDR pavée", et qui varient sensiblement jusqu'à 8 % (*Figure 21*). La part des sables grossiers ne représente qu'une part peu significative (entre 0,1 et 2 %). Le taux des limons et argiles présentent des proportions très faibles avec quelques variations entre 1 % et 3 % durant les campagnes.

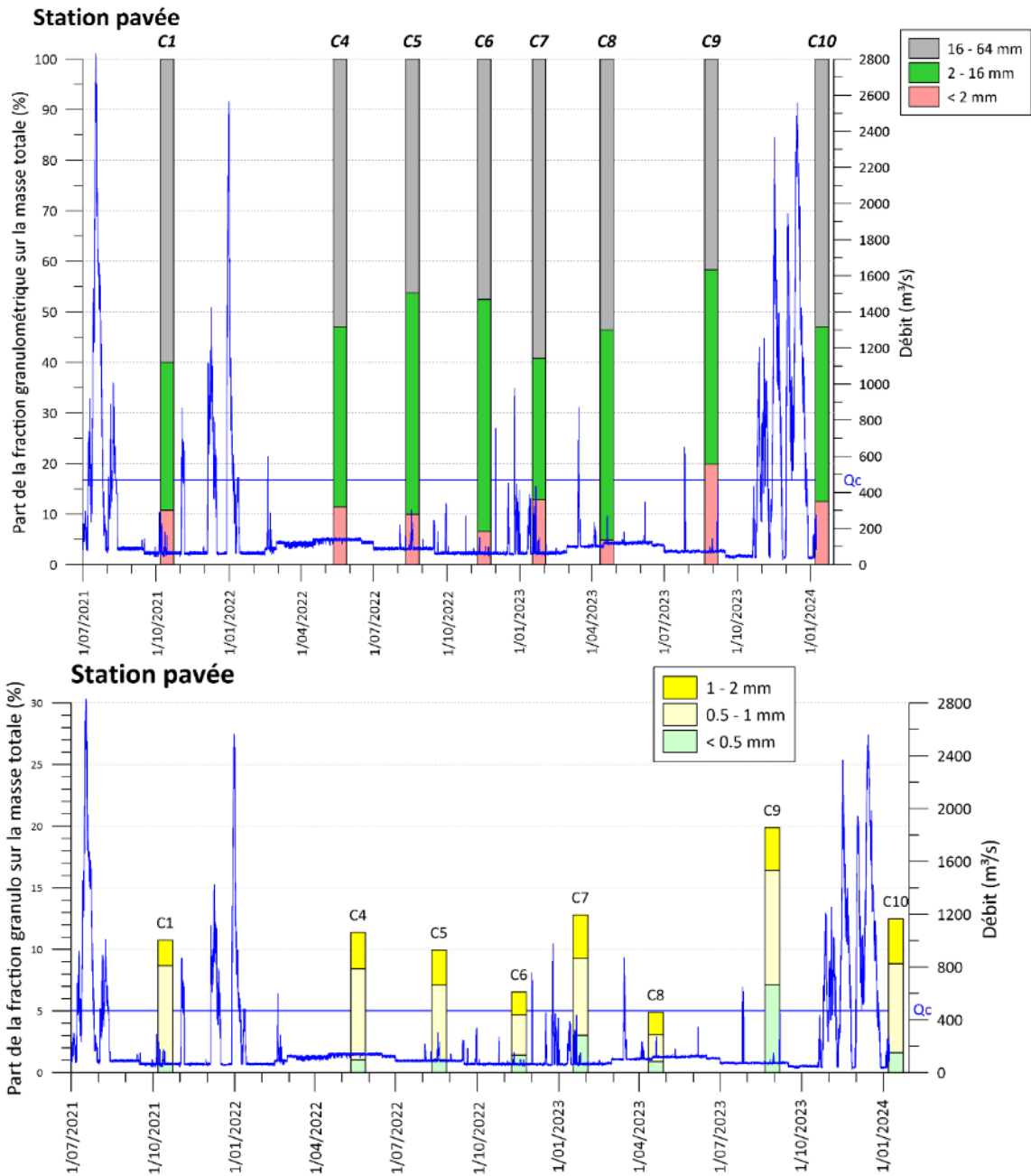


Figure 20. Le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, station PDR : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C1 à C10. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf).

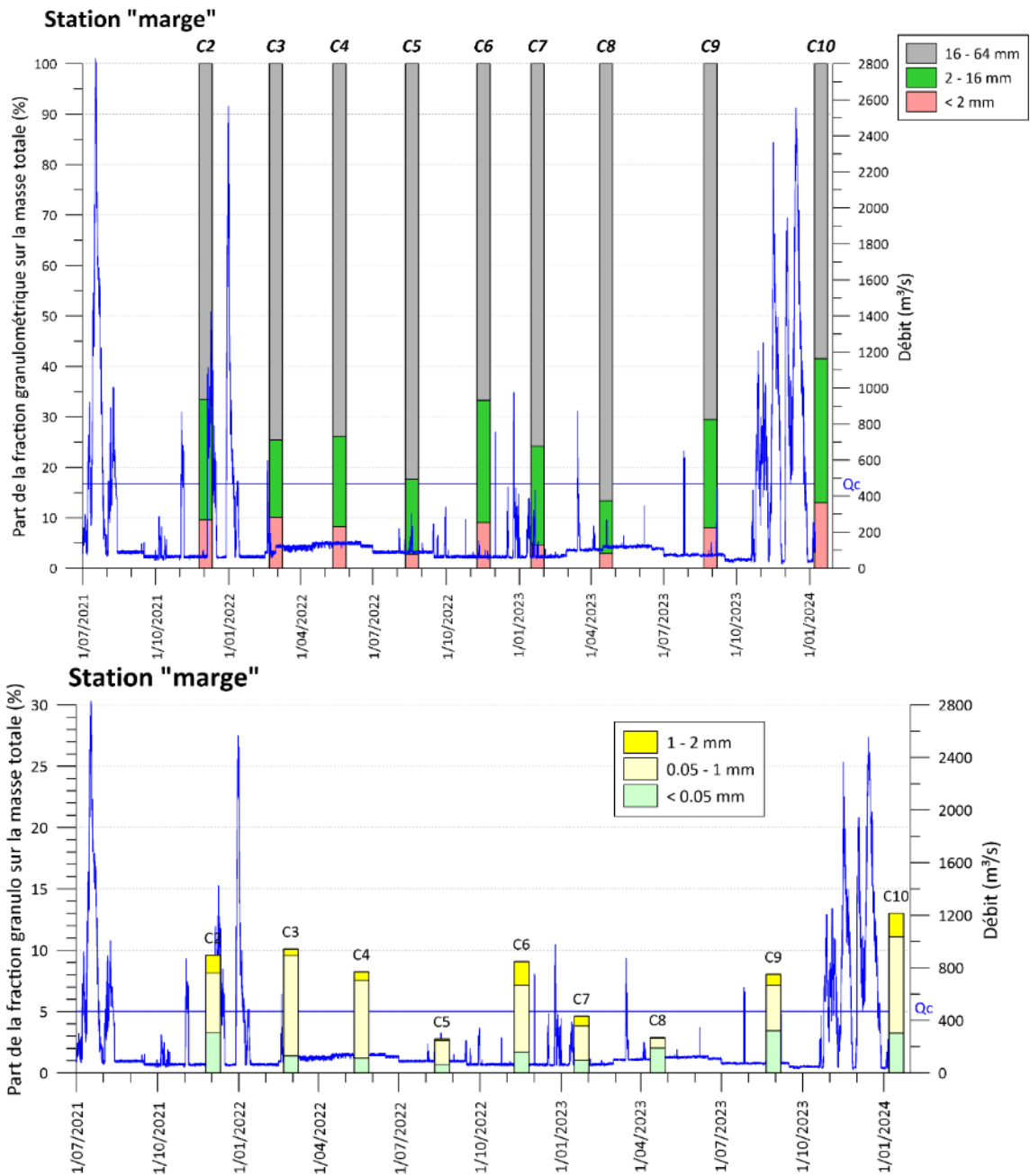


Figure 21. Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon, station PDR PAM : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C1 à C10. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits *horaires bruts et non validés* fournis par la CNR (station limnigraphique du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf).

3.5 La Drôme à Livron-sur-Drôme

3.5.1 Localisation des stations et des prélèvements

La station échantillonnée sur la Drôme à Livron-sur-Drôme est localisée environ 2 km en amont de la confluence avec le Rhône et 300 m en aval du seuil CNR de Livron (Figure 23). Elle se trouve sur un secteur caractérisé par des chenaux multiples mobiles, et une charge sédimentaire abondante qui semble *a priori* comporter peu de sédiments fins. C'est pourquoi elle a été sélectionnée comme station de référence pour le Bas-Rhône du point-de-vue de son faible degré de comblement interstitiel. Les mesures ont été réalisées sur le bras principal, le plus large, où les vitesses sont relativement élevées.



Figure 22. La Drôme à Livron-sur-Drôme : localisation de la station



Figure 23. La Drôme à Livron-sur-Drôme le 07/02/2023.

3.5.2 Résultats

Pour l'ensemble des 9 campagnes de prélèvements de ce site, le rapport entre la masse de la particule la plus grosse et celle de l'échantillon total est systématiquement inférieur au seuil de représentativité établi de 5 % (Church et *al.*, 1987). Les hauteurs d'eau mesurées varient entre 7 cm et 39 cm ; avec des vitesses qui s'échelonnent de 32 cm/s à 85 cm/s.

Cette station est caractérisée par une dominance de galets (16-64 mm) dont la proportion reste relativement stable, avec quasiment 66 % du cortège granulométrique pour chaque campagne (Figure 25). La classe des graviers représente quant à elle entre 20 et 33 % du total échantillonné. Comme pour les stations de référence de Neyron, ce site présente une part de sédiments fins (< 2 mm) faible, qui varie modérément dans le temps (entre 2 et 7 % ; Figure 22). La singularité de ce site, est la présence d'une forte dominance des limons et argiles dans les sédiments fins. Cette fraction représente près de 5 % de l'échantillon entre les campagnes C4 et C7. Les sables fins réduisent fortement entre C3 et C6 puis en C9. Ces pourcentages plus faibles semblent concorder avec des périodes marquées par un calme hydrologique car aucune crue majeure ne s'est produite entre C3 et C6. Les sables grossiers sont pratiquement absents durant l'ensemble des campagnes, ils ne dépassent jamais les 1 % des échantillons.

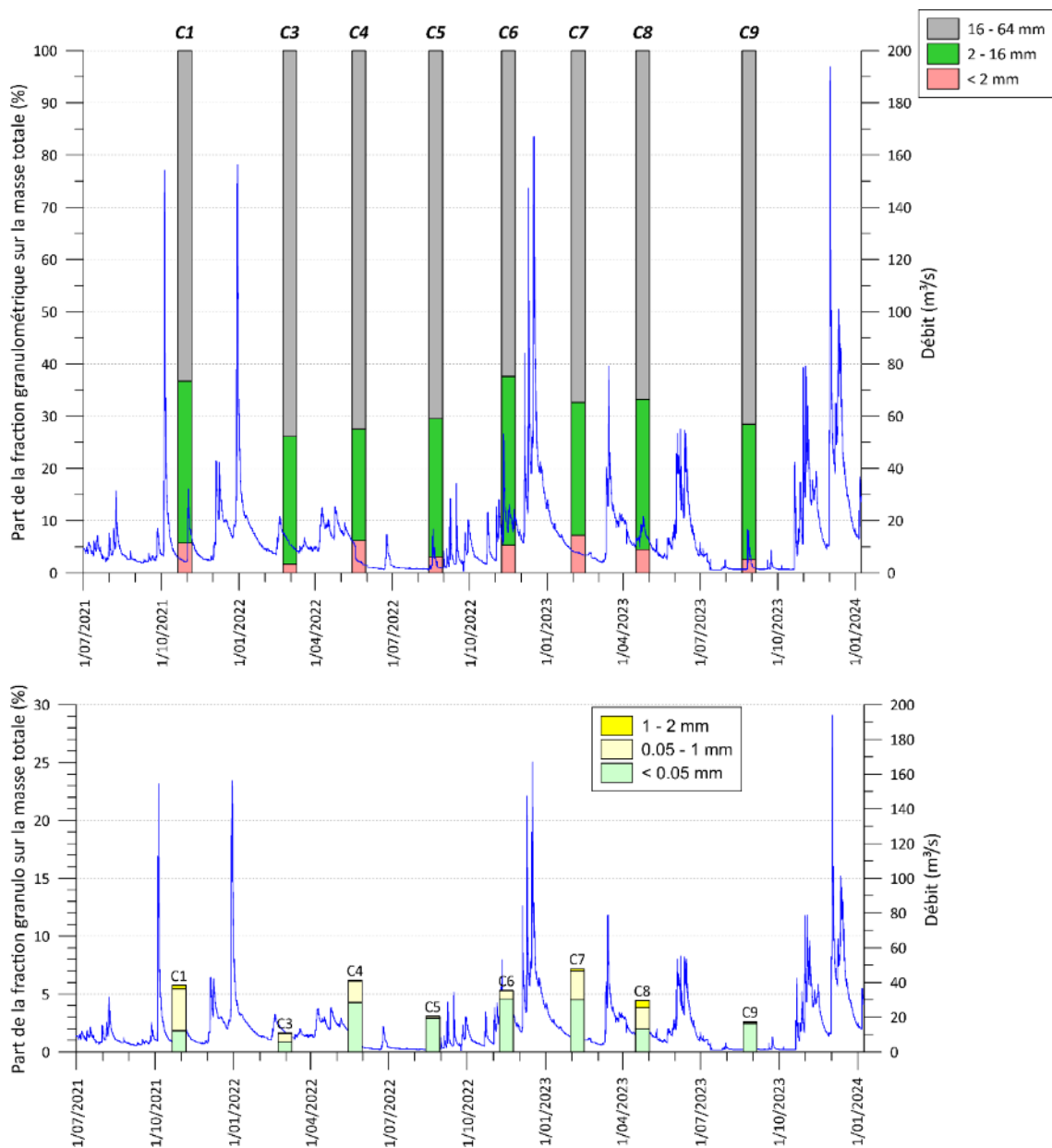


Figure 24. La Drôme à Livron-sur-Drôme : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C1 à C9. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique de Livron-sur-Drôme)

3.6 Le Vieux-Rhône de Baix-le-Logis-Neuf

3.6.1 Localisation des stations et des prélèvements

La station échantillonnée sur le Vieux-Rhône de Baix-le-Logis-Neuf se trouve à 1 km en aval du barrage du Pouzin, ce dernier étant situé 4 km en aval de la confluence avec la Drôme (Figure 25). La station se trouve en bordure du site de recharge sédimentaire (12 000 m³) réalisée en novembre 2021. Elle est localisée sur la partie amont d'un radier, en bordure d'un grand banc latéral (Figure 26). Compte tenu des profondeurs trop importantes au droit de la zone de recharge, les mesures ont été réalisées en bordure, dans des profondeurs plus faibles. Cette localisation suppose que les sédiments issus de la réinjection ont été par la suite remobilisés sur le site d'échantillonnage.

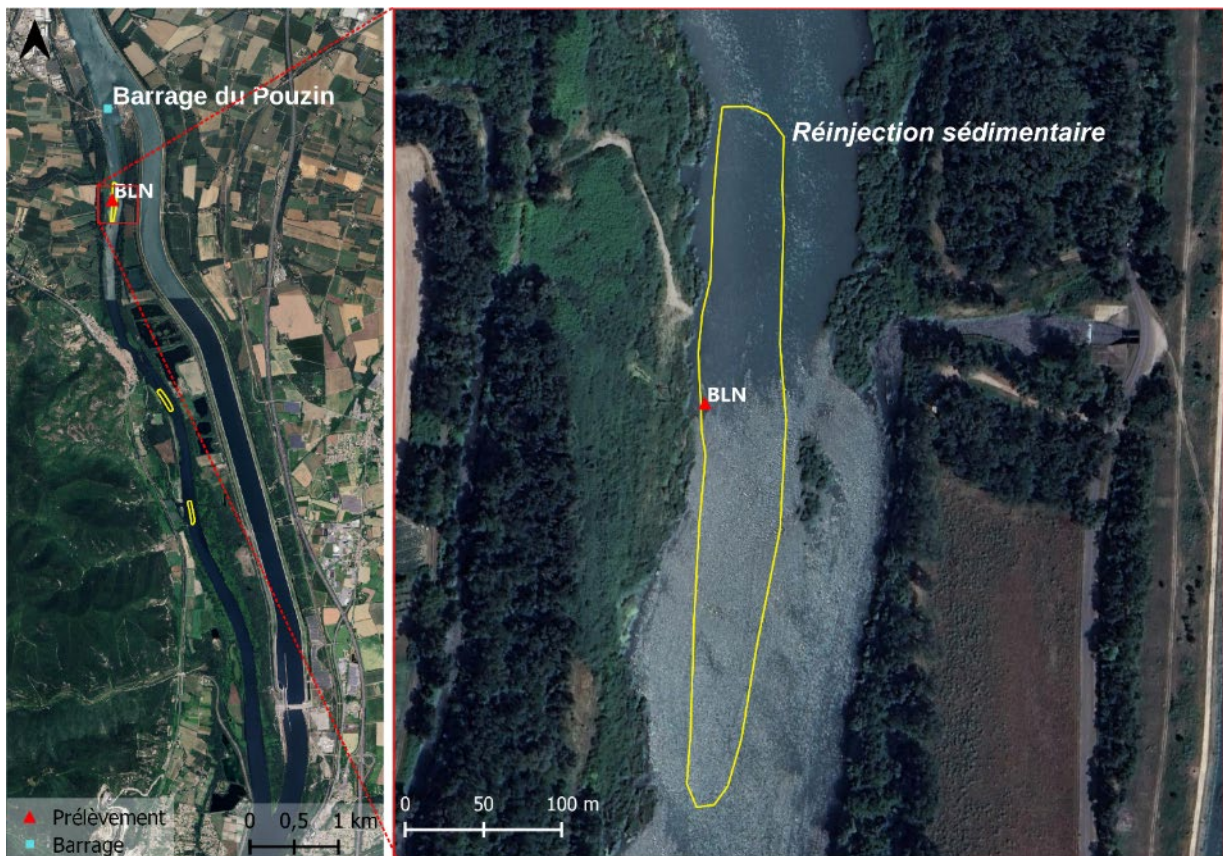


Figure 25. Le Vieux-Rhône de Baix Le-Logis-Neuf : localisation des stations



Figure 26. Le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf : station étudiée lors de la campagne C6 (17/11/2022), avec une certaine diversité granulométrique en surface (graviers et galets).

3.6.2 Résultats

Bien qu'aucun prélèvement n'ait été réalisé pour la campagne C1, nous disposons néanmoins des données issues d'une granulométrie réalisée par la CNR, sur un échantillon prélevé dans les sédiments à injecter (avant la recharge). Cet échantillon, nommé C1, possède 10,6 % de sédiments fins. Les 8 autres campagnes ont été effectuées postérieurement à la recharge sédimentaire.

Ces 8 prélèvements sont considérés comme représentatif de la forme échantillonnée (masse de la plus grosse particule < 5 % ; Church et *al.*, 1987). Les hauteurs d'eau mesurées varient entre 26 cm et 40 cm, avec des vitesses comprises entre 378 cm/s et 76 cm/s.

La part des sédiments grossiers (16 - 64 mm) connaît quelques variations entre 44 et 66 % : elle diminue sensiblement entre C1 et C6, exception faite de C5, avant d'augmenter de nouveau jusqu'en C9 (Figure 28). Le constat inverse peut être établi pour la fraction de graviers qui augmente de 22 % à 41 % jusqu'en C6 (exception faite de C5 où le taux est de 37 %) avant de diminuer jusqu'en C9.

Ce site est marqué par une part de sédiments fins oscillant entre 8 % et 17 %, avec une répartition plutôt égale entre sables grossiers et fins. Une seule crue morphogène ($Q_c = 1830 \text{ m}^3/\text{s}$) s'est produite durant l'ensemble de la période concernée, en décembre 2021 juste après C2. Il est donc difficile d'établir un lien possible entre ces variations du taux de sédiments fins et les changements hydrologiques. La distribution entre les classes de sédiments fins est variable au cours du temps : la part des limons et argiles augmente néanmoins de façon constante entre C1 et C8, passant de 0,6% à 4,0% avant de retomber à 2,0% en C9. La part des sables fins semble suivre une évolution opposée avec une tendance à la baisse, de 10 % en C1

jusqu'à 4 % en C9 avec deux hausses en C3 et C6. Il est plus difficile d'établir une tendance pour les sables grossiers qui gagnent 4 % entre C1 et C2, pour osciller entre 3% et 7%.

La *Figure 27* illustre la présence d'une diversité granulométrique en surface. C'est probablement le signe que, parmi les particules grossières qui pavent le fond du lit, des particules plus petites, venues de la recharge, se sont logées dans les interstices. En effet, les résultats des campagnes C2 à C8 montrent un relatif équilibre entre les graviers (2-16 mm) et les galets (16-64 mm). En C9 cependant, la classe des sédiments les plus grossiers est deux fois plus importante que celle des graviers, et les sédiments fins sont sous représentés.

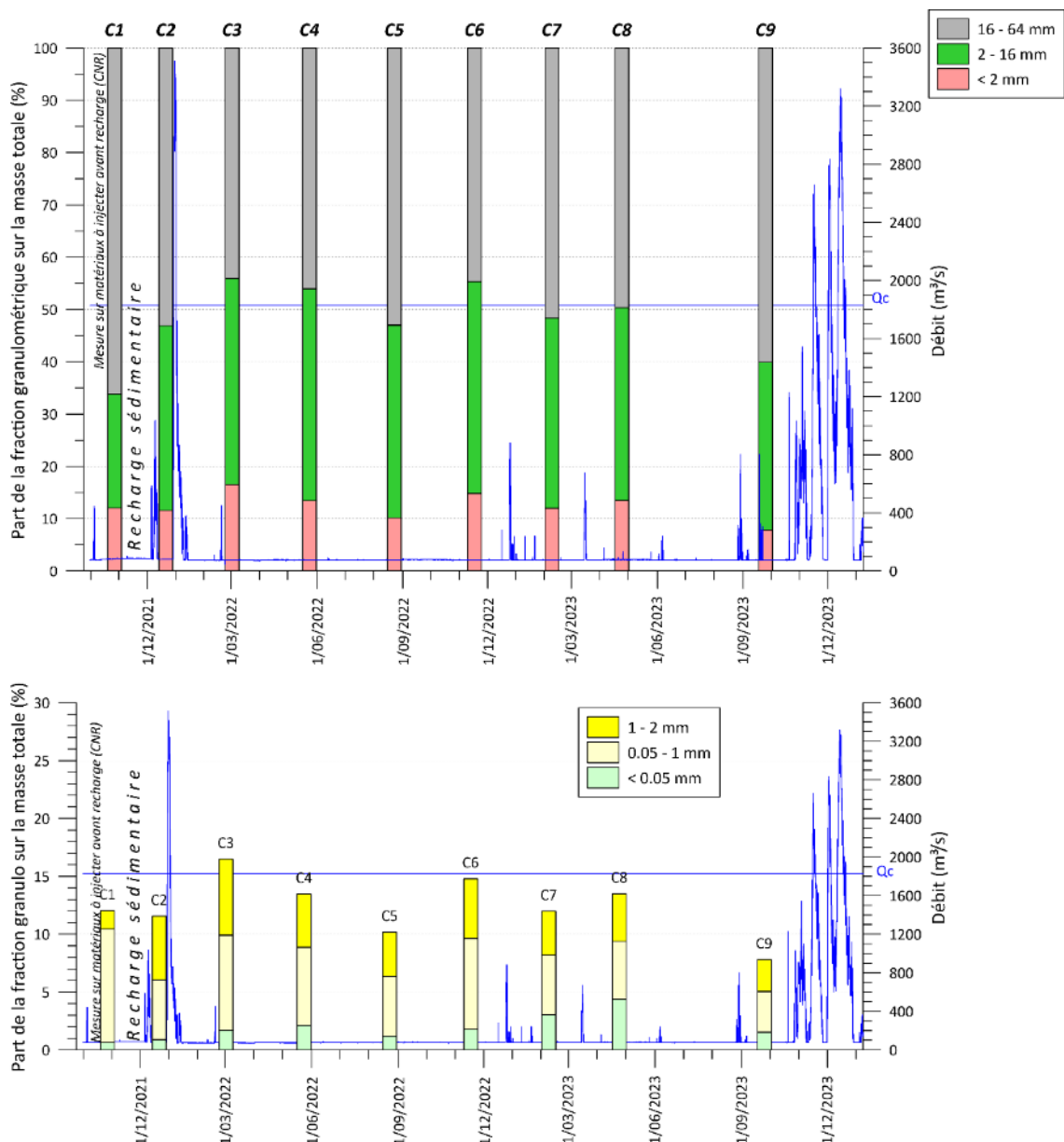


Figure 27. Le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C1 à C9. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique du barrage du Pouzin).

3.7 Le Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon

3.7.1 Localisation des stations et des prélèvements

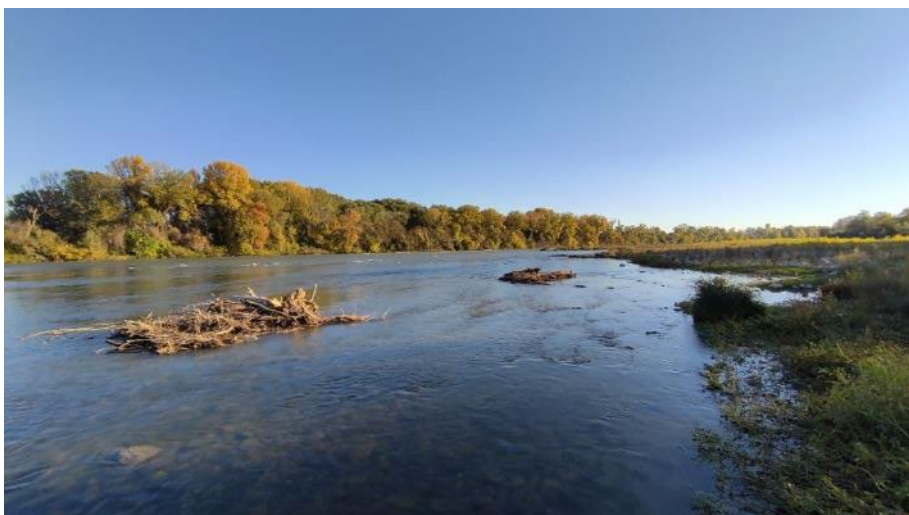
Tout comme le secteur de Pierre-Bénite, le secteur de Donzère-Mondragon est caractérisé par la présence de sédiments grossiers (D_{50} : 47-52 mm) et un lit pavé (indice de pavage compris entre 4 et 5 ; Parrot, 2015). Les deux stations échantillonnées le long de ce Vieux-Rhône se trouvent à 5 km (PAM) et 14,6 km (PAV) en aval du barrage de Donzère (Figure 29). Elles sont distantes de respectivement 1 km et 10,6 km de la zone de recharge sédimentaire qui avait été réalisée en janvier 2019. Les deux stations sont considérées pavées, mais sur DZM PAM, il est possible que des éléments issus de la recharge y soient parvenus (Peeters et al., 2024).

La station amont (PAM) se situe dans la partie amont d'un radier, en bordure d'un grand banc (légèrement en aval de l'entrée de la lône des Dames).

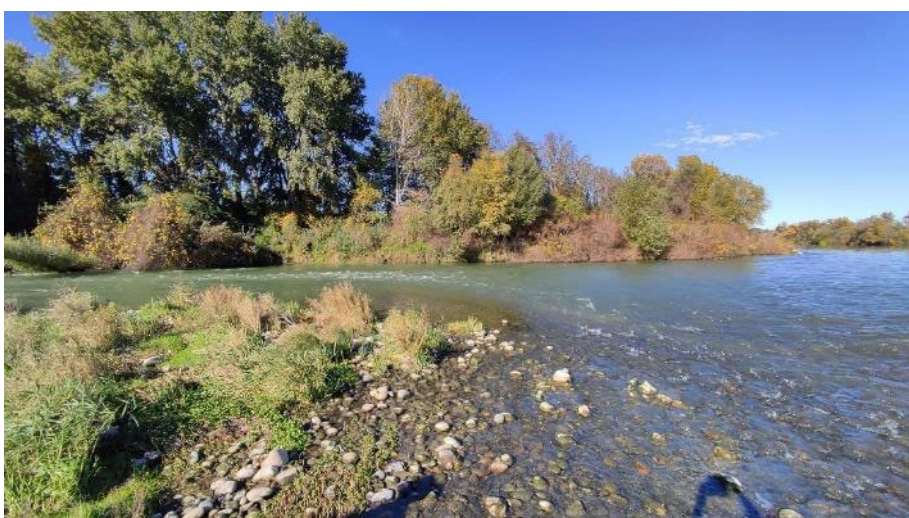
La station aval (PAV) présente une configuration similaire, bien que le rétrécissement du lit mouillé (pour le Q_r) au droit du banc soit plus prononcé.



Figure 28. Le Vieux Rhône de Donzère-Mondragon : localisation des stations et des prélèvements



A



B

Figure 30. Le Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon. A : station amont DZM PAM. B : station aval DZM PAV lors de la campagne C6 (16/11/2022).

3.7.2 Résultats

Le rapport entre la masse de la particule la plus grosse et la masse totale de l'échantillon dépasse plusieurs fois le seuil établi de 5 % (Church et *al.*, 1987). Les campagnes C3, C4, C6 et C8 de DZM PAM ont des pourcentages de 9,5 à 12,7 % ; pour DZM PAV ce sont les campagnes C2, C6, C7 et C9 avec des pourcentages entre 9,7 et 17 %. Les autres campagnes pour les deux sites ont des valeurs proches de 5 %, il est donc considéré qu'elles sont représentatives de la forme étudiée.

Les hauteurs d'eau pour DZM PAM changent peu entre les stations, elles valent entre 30 et 40 cm pour des vitesses allant de 32 à 69 cm/s. Pour DZM PAV, les hauteurs d'eau sont moins élevées allant de 11 à 32 cm pour des vitesses variant davantage, entre 21 à 120 cm/s.

Les deux stations, bien que localisées dans le même Vieux-Rhône, diffèrent dans les proportions de chacune des classes. Les deux sites ont une part de galets dominante par rapport aux autres classes (*Figure 31 et 32*). DZM PAM possède une part de galets moindre,

bien que non-négligeable, comparé à DZM PAV : ces parts varient respectivement de 40 à 74 % (C1 et C7) pour la station amont ; de 61 à 88 % (C1 et C6) pour la station aval.

A l'inverse, le pourcentage des graviers (2-16 mm) est plus important pour la station amont, qui diminue progressivement de 42 % jusqu'au tour des 23 %, sauf pour deux hausses en C4 et C5. Pour la station aval, ce pourcentage varie fortement entre 11 et 32 %.

La station DZM PAV présente des parts de sédiments fins relativement faibles, entre 0,4 et 7 %. Cette part diminue progressivement de C1 à C6, avant d'augmenter par la suite. La station DZM PAM quant à elle dispose d'une part de sédiments fins bien plus importante qui diminuent de 18 à 8 % sur les 9 campagnes, avec deux valeurs particulièrement faibles en C5 et C7, respectivement 2,5 et 3,5 %. La différence de part de sédiments fins entre les deux sites laisse à penser que le site amont est davantage colmaté que ne l'est la station aval, sur ce point cette dernière est comparable à une station de référence.

Bien que les sites aient connu plusieurs crues morphogènes ($Q_c = 1181 \text{ m}^3/\text{s}$) depuis le début des campagnes, avec une longue période en débit réservé entre C3 et C6, il est difficile d'établir un lien entre ces événements et l'évolution de la répartition granulométrique, notamment des classes les plus fines. La station amont montre une fraction de sédiments fins largement dominée par les sables fins (jusqu'à 14 % de l'échantillon total). Les limons et argiles ont une part plus importante à partir de C6, variant entre 0,5 % et 3 %, qui semblent s'être faite au détriment des sables grossiers (ils passent de 17 % en C1 à 6 % en C9). Ce dernier constat peut également être établi pour la station aval, avec une proportion de limons et d'argiles supérieure aux deux autres classes en C7 et C8, respectivement 1 et 4 % alors qu'ils stagnent en dessous de la barre des 1 % pour les autres campagnes. Pour autant cette station montre une répartition plus égalitaire entre les sables grossiers et les fins, qui évoluent respectivement entre 0,1 et 3 %, ainsi qu'entre 0,1 et 5 %.

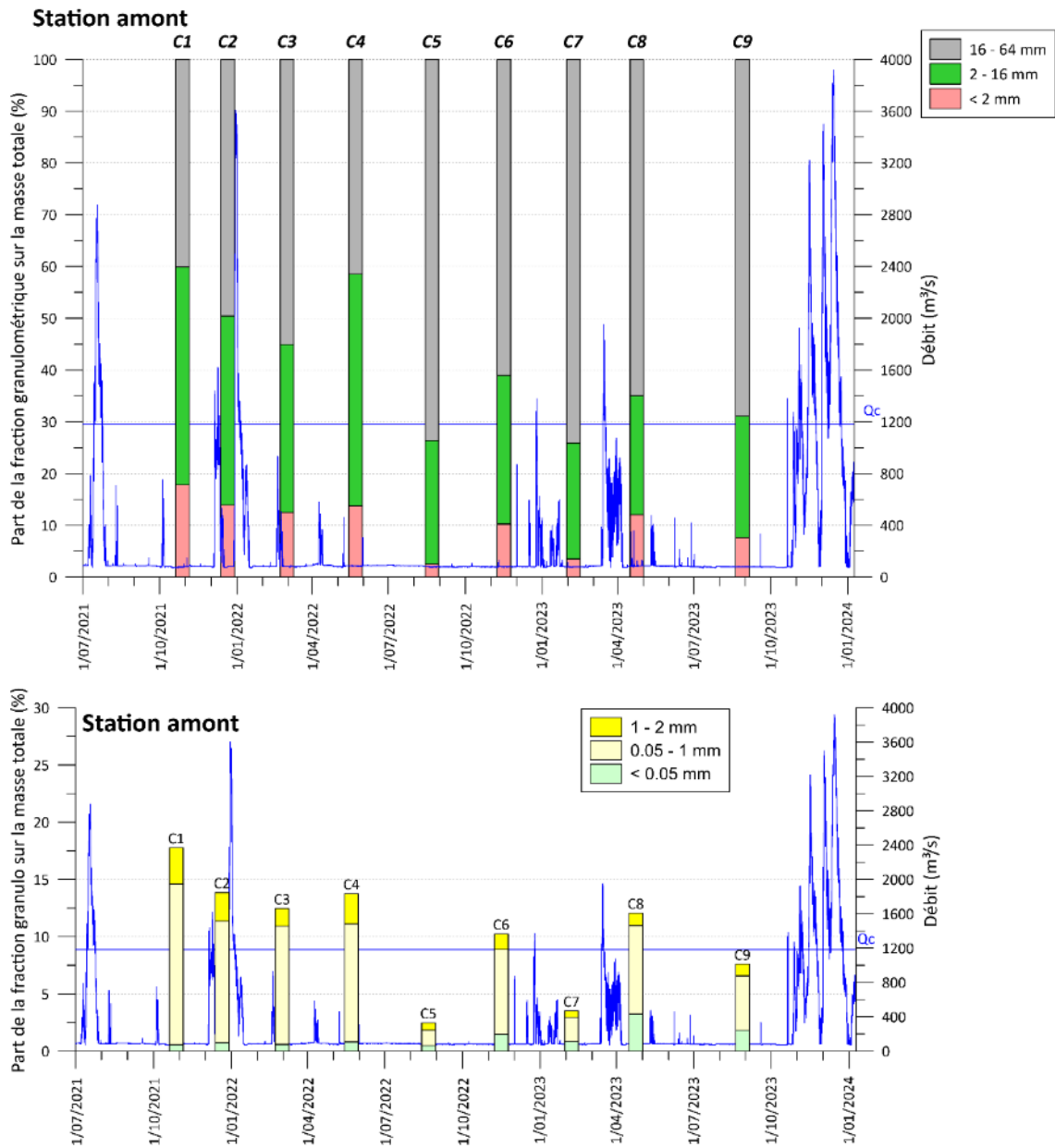


Figure 29. Le Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon, station DZM PAM : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C1 à C9. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique de Bourg-Saint-Andéol).

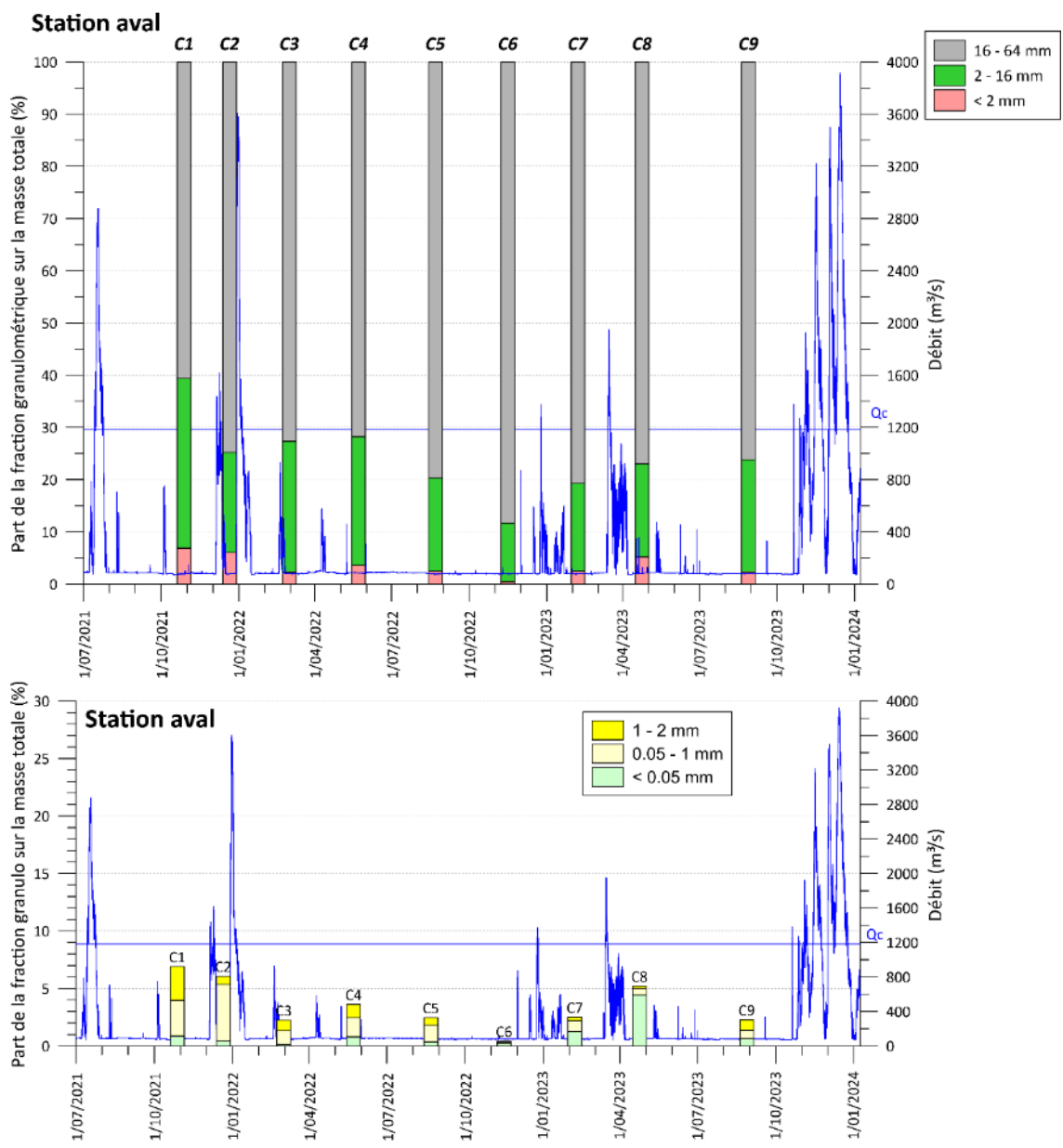


Figure 30. Le Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon, station DZM PAV : hydrogramme et composition granulométrique des échantillons prélevés lors des campagnes C1 à C9. Haut : ensemble du cortège granulométrique. Bas : composition détaillée des sédiments fins. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique de Bourg-Saint-Andéol).

4. Éléments de synthèse

4.1 Echantillonnage et représentativité

Le critère de représentativité, selon lequel la masse du plus gros élément ne doit pas excéder 5% (Church et al., 1987), se révèle être difficile à respecter systématiquement, bien que les trois prélèvements d'une station soient regroupés. Ainsi, 41 échantillons sur 62 dépassent ce seuil de 5%. Cependant, le rapport moyen est de 7,1 %. Pour des considérations de moyens humains et de disponibilité, il est difficilement envisageable de réaliser plus de trois prélèvements par station.

L'échantillonneur cylindrique (McNeil et Ahnell, 1964) est intéressant car il est simple à mettre en œuvre et permet de couvrir plusieurs stations régulièrement, sans protocole complexe. En revanche, il demeure un biais opérateur, au moment du prélèvement, qui est à prendre en compte. Notamment le fait qu'il soit difficile de retenir l'entièreté des sédiments fins à l'intérieur lors de l'enfoncement du cylindre. Même lorsque les pertes de sédiments fins sont limitées, plusieurs auteurs estiment que le pourcentage de sédiments fins est tout de même sous-représenté (Young et al., 1991, Bunt et al., 2001). De plus, ce prélèvement induit une destruction verticale de la composition granulométrique.

Pour essayer de quantifier ces biais potentiels, des mesures granulométriques utilisant différentes méthodes (cylindre de type McNeil et granulométrie de surface/subsurface sur banc émergé) ont été réalisées sur le site test de Neyron (station amont) et plus généralement sur le site de Miribel (Masquelier, 2022). La comparaison des résultats issus de ces mesures a confirmé le biais potentiel du sous-échantillonnage des sédiments fins (en particulier des sables) avec le cylindre McNeil mais seulement par un échantillonnage subaquatique. Les mesures sur bancs émergés se sont avérées par contre similaires. Une difficulté demeure sur la variabilité verticale du taux de sédiments fins et l'impact d'une prise en compte ou non de la couche de surface (armurée voire pavée) dans l'échantillonnage ; et si on l'exclut, un biais peut être créé sur le choix de l'épaisseur de cette couche de surface et la difficulté pour extraire l'ensemble des classes de la couche (potentiel biais sur les sédiments fins). Quoiqu'il en soit, la comparaison des concentrations de sédiments fins déterminées par cette technique reste pertinente du moment que le protocole d'échantillonnage reste identique pour chaque prélèvement et que l'opérateur soit le même.

En ce sens, effectuer une troncature à une taille de particule donnée permet de réduire l'effet des grosses particules sur le pourcentage de sédiments fins et de rendre comparable les échantillons entre eux. Cela permet aussi de s'affranchir de la couche de surface dans les secteurs pavés, en considérant que les plus grosses particules sont essentiellement présentes en surface (Bunt et al., 2001). Ici, la variabilité du D_{50} est nettement réduite avec la troncature des échantillons à 64 mm, et sa valeur médiane baisse d'environ 8 mm. C'est principalement la part de sédiments fins qui est réévaluée avec la troncature.

La Figure 33 montre une réponse contrastée des stations à la troncature, ce qui confirme la présence sur certains sites de particules très grossières qui influencent nettement la distribution granulométrique. Il apparaît que ce sont les stations pavées qui sont les plus sensibles à la troncature.

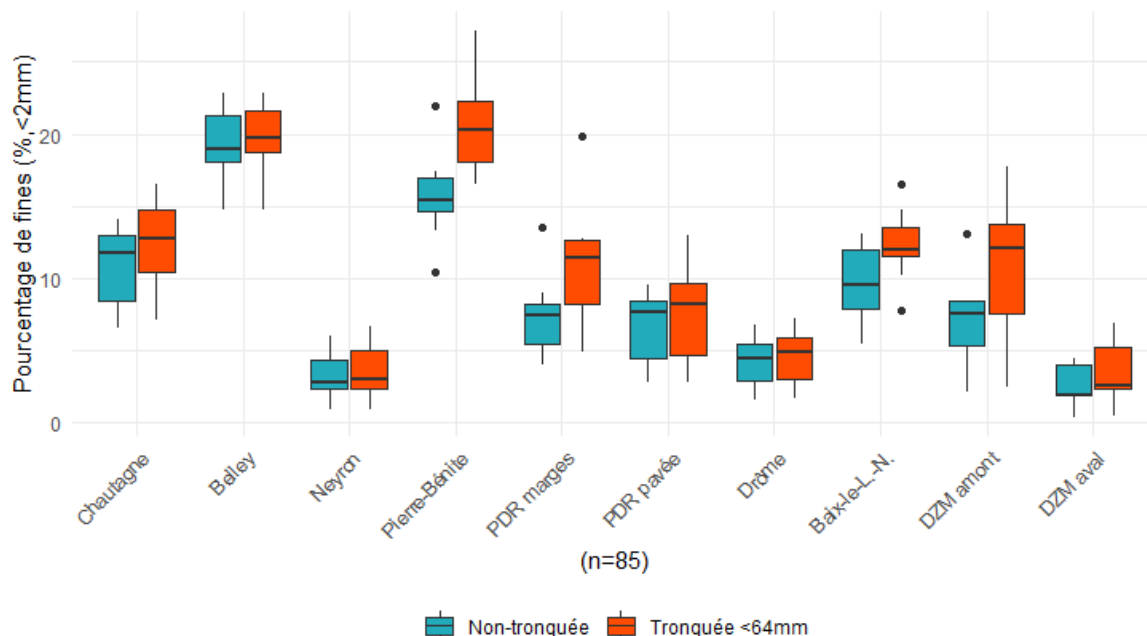


Figure 31. Part de fines avec ou sans troncature des échantillons, par station.

4.2 Vers une compréhension des modalités du comblement interstitiel

Pour rappel, les deux hypothèses de départ considérées sont :

- La variabilité intra-stationnelle (au sein d'une même station) dans le temps est inférieure à la variabilité inter-stationnelle ;
- Les stations pavées ont une part de sédiments fins plus importante que les stations avec réinjection sédimentaire et les stations dynamiques, qui elles-mêmes ont une part supérieure aux stations de référence.

Pour vérifier ces hypothèses, 10 stations ont été échantillonnées. Elles se regroupent en 4 types : (i) des stations dynamiques de référence (LYM, Drôme), (ii) une station dynamique en cours de pavage (CHA), (iii) des stations ayant fait l'objet d'une réinjection sédimentaire (PDR "marges" et BLN), et (iv) des stations pavées (BEL, PBN, PDR "pavée", et DZM amont et aval).

Il est important de rappeler que seuls deux Vieux-Rhône ayant fait l'objet d'une réinjection sédimentaire ont pu être échantillonnés dans le cadre de cette étude, en raison de la difficulté de trouver des stations répondant aux conditions hydromorphologiques propices à l'échantillonnage (cf. §3). En effet, dans le cas où les sédiments ont été réinjectés il y a plus de cinq ans, les sites de réinjection ne présentent généralement plus aujourd'hui des conditions hydromorphologiques propices à l'échantillonnage car ils ont été dispersés vers l'aval depuis lors. Les hauteurs d'eau y sont trop importantes. C'est pourquoi, seuls les sites de BLN (réinjection sédimentaire récente, en novembre 2021) et de PDR "marges" (radier reconstitué 2,3 km en aval de la réinjection) ont pu être sélectionnés.

4.2.1 Une variabilité inter-stationnelle marquée

D'une manière générale, la composition granulométrique de chaque station se comporte de façon relativement homogène au cours du temps, bien que quelques variations puissent être observées. Les stations de BEL, PBN, CHA sont celles qui présentent le plus d'homogénéité, toutes classes granulométriques confondues. Les autres stations présentent une variabilité pouvant être assez marquée, notamment concernant les pourcentages de galets ou de graviers. Sur l'ensemble des échantillons, la part des galets (16 - 64 mm) est la classe granulométrique qui connaît une gamme de valeur la plus étendue (proportions entre 40 % et 88 % environ). La part de sédiments fins oscille de moins de 1 % à plus de 27 % (Figure 34). Cette classe granulométrique (< 2mm) reste la plus homogène de façon temporelle au sein d'une même station, les schémas se confirmant de campagne en campagne. En prenant en compte les 3 fractions granulométriques, la première hypothèse peut être validée : chacune des stations suit un modèle se distinguant des autres avec une variabilité temporelle peu marquée.

Cette faible variabilité temporelle du pourcentage de sédiments fins ne semble donc pas influencée par les événements hydrologiques survenus durant la période d'étude. Il faut toutefois préciser que la période hydrologique couvrant les campagnes est caractérisée par des crues de faible et moyenne intensité, la crue décennale n'étant jamais atteinte sur la période (d'après les données de E. Parrot, 2015). L'effet de crues de plus forte intensité (> Q_{10}) sur la mise en mouvement de la matrice grossière et l'évolution de la part de sédiments fins n'est pas encore connu.

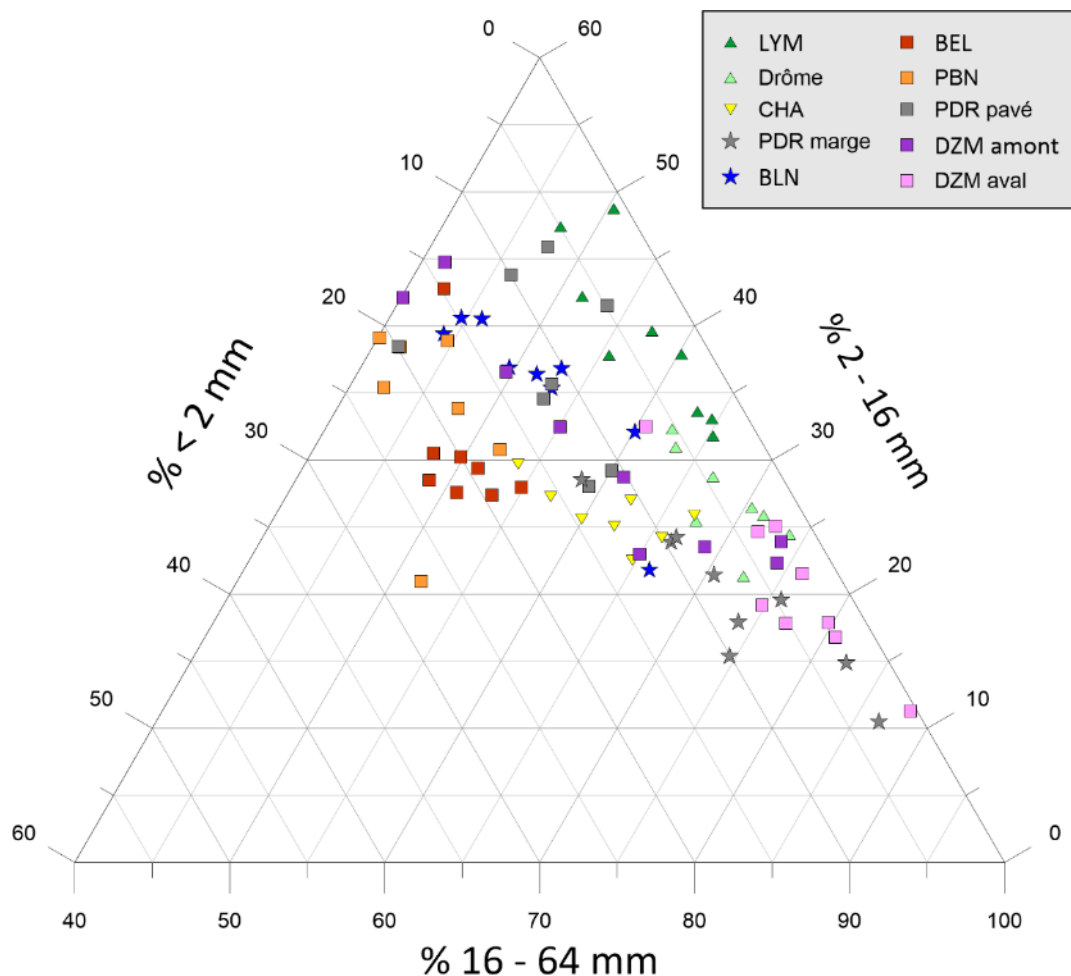


Figure 32. Représentation ternaire des 10 campagnes d'échantillonnage. (triangle droit : site de référence ; triangle retourné : site dynamique ; étoile : site rechargé ; carré : site pavé)

Concernant la part de sédiments fins, trois stations présentent une variabilité intra-stationnelle très faible (LYM, DRO, BLN) en comparaison aux autres. Ce pourcentage de sédiments fins peut être mis en relation avec la porosité du substrat, cette dernière exerçant un contrôle sur l'importance des courants interstitiels. Maridet et al. (1992, 1995) ont ainsi montré que plus de 30 % de sédiments fins par rapport au volume total de sédiment induit une porosité quasiment nulle. Elle est limitée à quelques pourcents lorsque les sédiments fins représentent 20 à 30 %. Parmi le panel étudié, seules les stations pavées de Belley et de Pierre-Bénite dépassent régulièrement le seuil de 20 % de sédiments fins (Figure 35). Les autres stations possèdent un pourcentage de sédiments fins inférieur à cette valeur seuil.

Les stations dites de référence (Neyron et Drôme) présentent des parts de sédiments fins nettement inférieures à celles des autres stations. C'est également le cas pour la station de DZM PAV. Pour autant, la part de graviers de DZM PAV est largement sous représentée contrairement aux deux sites de référence, et ce au profit d'une part de galets bien plus importante. Un constat relativement similaire peut être établi pour la station PDR "marges", bien que cette station présente une plus grande variabilité.

Les modèles suivis par les deux sites avec une réinjection sédimentaire diffèrent : BLN présente des parts de sédiments fins de l'ordre de 12 % avec une faible variabilité, tandis que la part de sédiments fins de PDR "marges" varie plus fortement mais avec des valeurs moins élevées (< 10 %). Les 2 stations de référence (DRO et LYM) présentent des modèles nets en ce qui concerne la part de sédiments fins : des valeurs faibles (< 7%) avec une variabilité faible. Néanmoins, DRO possède une proportion de galets plus conséquent que LYM.

Les caractéristiques inhérentes à chaque station permettent d'expliquer en partie l'évolution et la variabilité dans la proportion de sédiments fins. La forme échantillonnée (radier) n'est pas similaire d'un site à l'autre. L'emplacement choisi pour le prélèvement, selon qu'il soit en bordure de chenal ou en tête de radier, peut en effet induire des différences en termes de vitesse de courant et / ou de zone préférentielle de dépôts des sédiments plus grossiers. De même, la composition granulométrique de chaque RCC, donc de chacun des sites échantillonnés est singulière. Par exemple, le D_{50} dans le Vieux-Rhône de Neyron est compris entre 17 et 25 mm, tandis que dans le RCC de Donzère-Mondragon il se situe entre 47 et 52 mm (Parrot, 2015). Or, comme il a été souligné, ces facteurs (vitesse et pourcentage de galets) expliquent fortement la variation de la part des sédiments fins (le pourcentage de galets étant de surcroît auto-corrélé à la part de sédiments fins).

4.2.2 Classification des stations selon la dynamique de la charge de fond et influence du gradient longitudinal

L'analyse des fractions granulométriques brutes (*cf. supra*) a déjà amené quelques clefs de compréhension de la part de sédiments fins dans le milieu interstitiel. Il reste cependant difficile de comparer les stations entre elles puisqu'il existe des facteurs de contrôle locaux spécifiques à chaque site. La régression multiple a ainsi permis de s'affranchir des variables qui s'exercent à l'échelle stationnelle (i.e., la part des galets et la vitesse du courant). Procéder de la sorte permet une meilleure appréhension de l'étude de la part des sédiments fins entre les stations. C'est *in fine* une régression quantile appliquée au 90ème percentile qui a été retenue permettant ainsi d'apprécier facilement les écarts en termes de pourcentage de sédiments fins entre les types de station (*Figure 36*). En procédant de la sorte, les stations de référence et les stations de recharge se distinguent alors très nettement des stations pavées, avec une part de sédiments fins interstitiels significativement plus faible.

Le regroupement des stations en fonction de leur proximité géographique (i.e., leur position le long de l'axe longitudinal rhodanien) a permis une analyse plus fine. Trois tronçons sont ainsi définis : le "Rhône amont" (jusqu'à la confluence avec l'Ain), le "Rhône médian" (jusqu'à la confluence avec l'Isère) et le "Rhône aval". Ce découpage diffère du découpage usuel du fleuve (Bravard, 1986 ; Parrot, 2015). Les tronçons définis comprennent :

- pour le "Rhône amont": Chautagne (CHA ; station dynamique en cours de pavage), qui sert de référence ; et Belley (BEL) station pavée dont le comblement interstitiel est plus prononcé ;
- pour le "Rhône médian": Neyron (LYM ; station de référence) ; PDR "marges", dont la part de sédiments fins est plus marquée que celle de LYM ; PDR "pavée et Pierre-Bénite (PBN), qui se distinguent davantage par leur forte part de sédiments fins ;
- pour le "Rhône aval": la Drôme (DRO ; station de référence) ; BLN, dont la part de sédiments fins est plus importante ; et les deux stations pavées de DZM (DZM amont et DZM aval), qui présentent des valeurs encore plus importantes.

Pour le "Rhône amont", la station de CHA (référence dynamique en cours de pavage) présente des valeurs de sédiments fins interstitielles supérieures à certaines stations pavées plus en aval mais inférieures à la station BEL (qui est la station pavée la plus proche). En ce qui concerne les stations du "Rhône médian", l'analyse montre une différence marquée entre chacun des types, les sites pavés ayant le plus fort comblement interstitiel. La station réinjectée PDR "marges" montre une grande variabilité de la part de sédiments fins, ce qui n'est pas le cas pour le reste des stations. Pour le "Rhône aval", la station DZM aval, pavée et située la plus à l'aval, présente une matrice plus comblée que DZM amont et BLN.

En somme, il apparaît que les stations du "Rhône amont" présentent des matrices plus chargées en sédiments fins que celles des stations du "Rhône médian" et du "Rhône aval", indépendamment de la nature du transport de la charge de fond. Ce constat est d'autant plus marqué pour les stations pavées où un gradient longitudinal amont / aval est net.

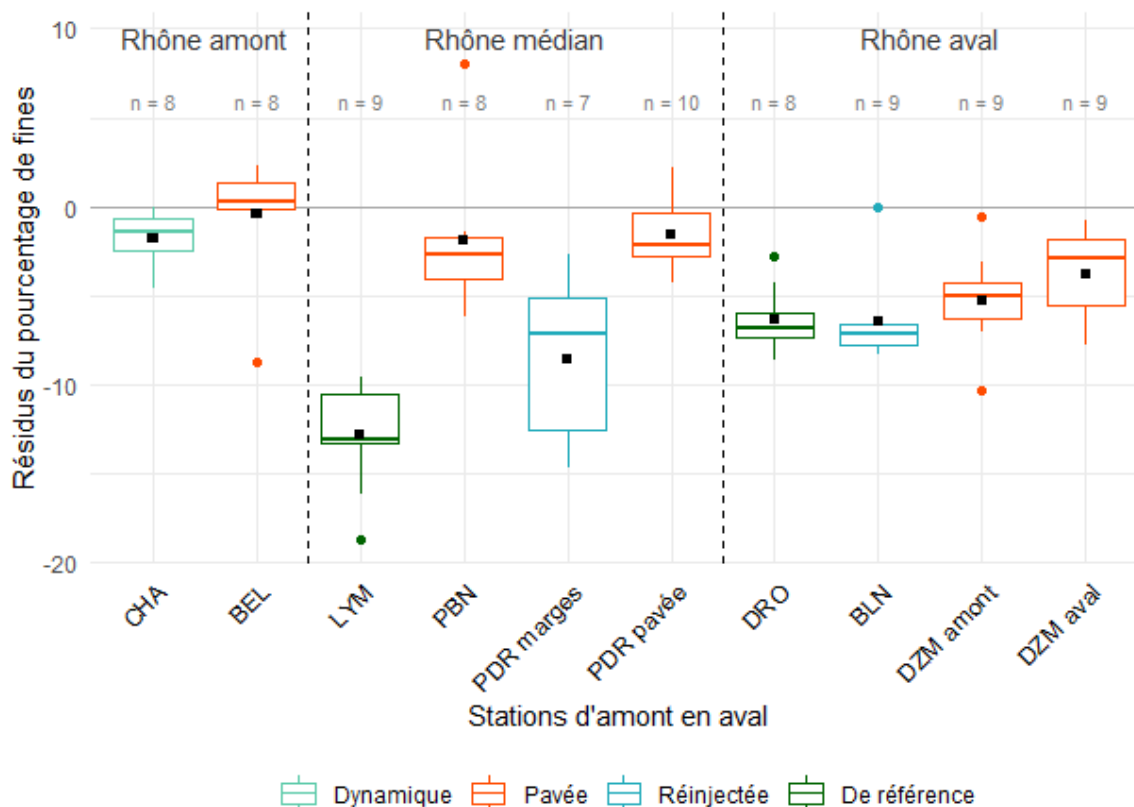


Figure 33. Distribution des résidus pour chaque station (le carré noir correspond à la moyenne)

Une distinction peut donc être faite en termes de remplissage interstitiel entre le "Rhône amont" (matrices chargées en sédiments fins), d'une part, et le "Rhône médian" et "Rhône aval" (matrices moins chargées en sédiments fins), d'autre part. La courbe de tendance qui s'ajuste sur les sites pavés (Figure 37) montre que le point de jonction entre les résidus positifs et ceux négatifs issus de la régression quantile se fait au niveau de la limite entre le "Rhône amont" et le "Rhône médian". Cette courbe représente le seuil en deçà duquel 90 % des observations peuvent être prédites.

Le gradient longitudinal observé s'explique probablement par la variabilité des apports en sédiments fins des affluents majeurs du Rhône. En outre, dans le "Rhône amont", les opérations APAVER peuvent également favoriser un important flux de sédiments fins dans les stations de Belley et de Chautagne en période de moindre hydraulicité.

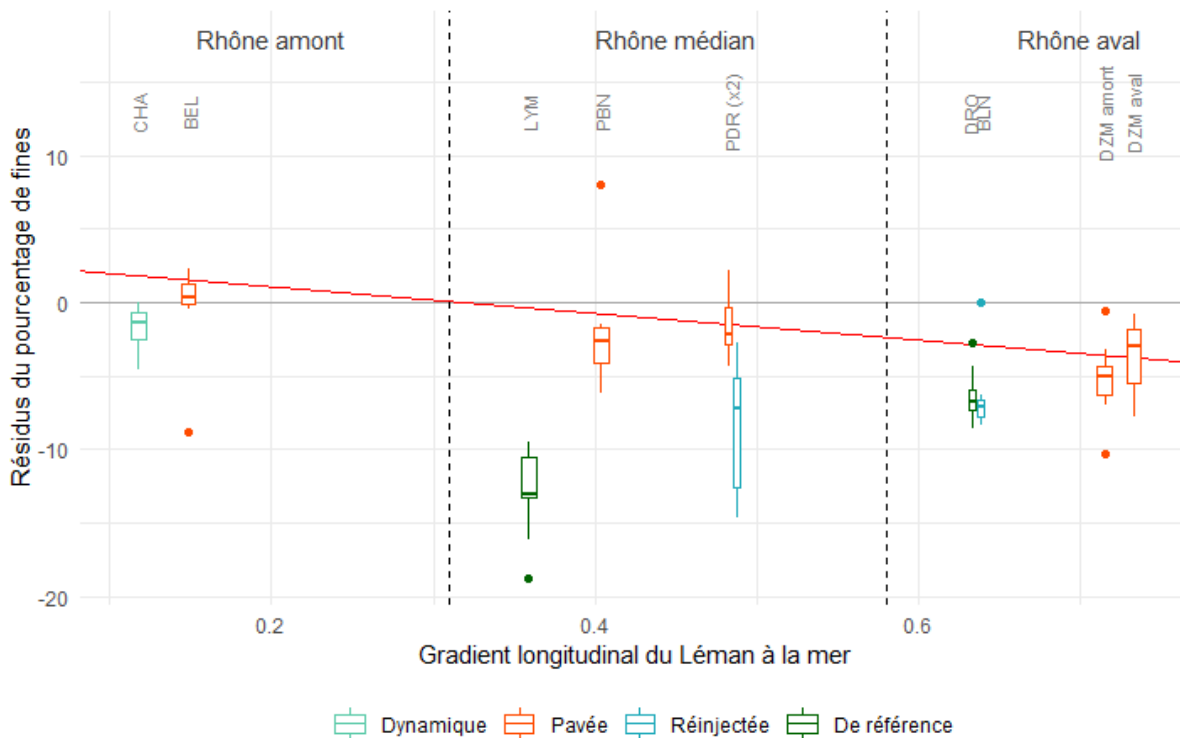


Figure 34. Résidus de la régression quantile par station selon l'axe longitudinal

D'un point de vue temporel, les deux stations réinjectées suivent des trajectoires différentes. La station de BLN semble avoir connu une légère diminution de la part de sédiments fins depuis la réinjection sédimentaire, les résidus ayant une tendance à la baisse comme le montre la *Figure 37*. Pour la station PDR "marges", aucune tendance temporelle ne se dessine. Il faut néanmoins préciser deux éléments susceptibles d'influencer l'évolution de la part de sédiments fins dans le temps. Le premier concerne le débit réservé au moment du prélèvement (Q_r plus élevé au printemps-été qu'en automne-hiver), ce qui conditionne la hauteur d'eau et donc la localisation du point d'échantillonnage (centre du radier en automne-hiver vs. bordure du radier au printemps-été). En effet, l'épaisseur de sédiments caillouteux issus de la réinjection (recouvrant les sédiments de remplissage des anciens casiers) est assez variable en fonction de cette position. Si cette épaisseur est inférieure à 15 cm, alors l'échantillon contient des matériaux de la sous-couche issus du remplissage des anciens casiers, qui sont riches en sédiments fins. Le second élément susceptible d'influencer l'évolution de la part de sédiments fins est que ce radier semble être en cours d'engraissement (d'après les observations de terrain), ce qui devrait *in fine* éviter d'échantillonner les sédiments issus du remplissage des anciens casiers.

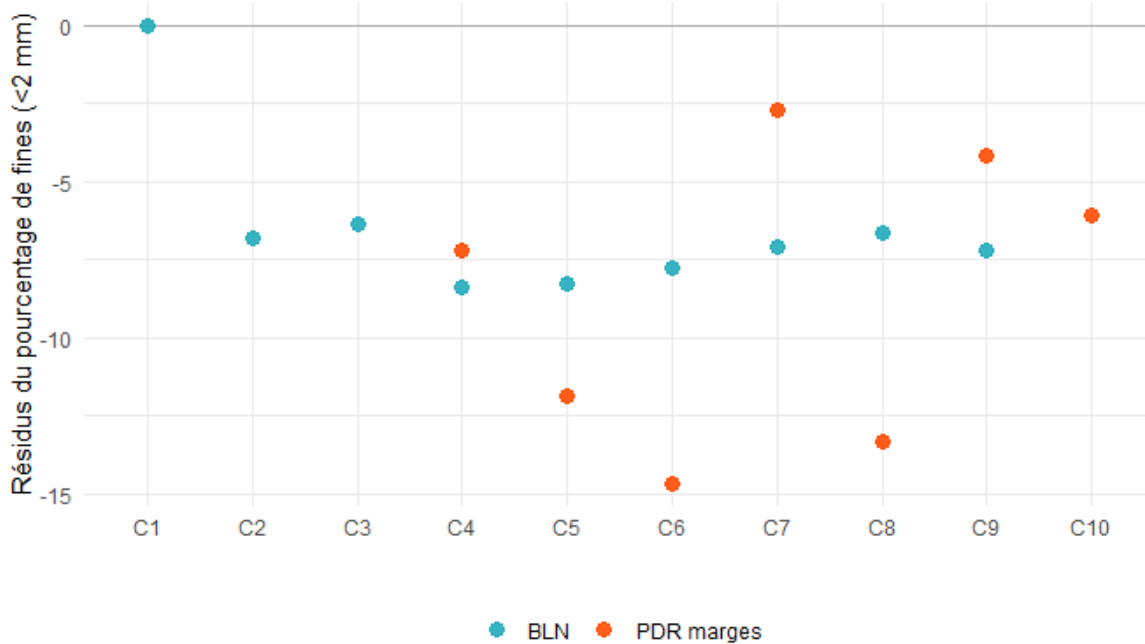


Figure 38. Evolution temporelle des résidus pour les stations réinjectées : PDR "marges" et BLN

Ainsi, il existe une distinction et un gradient quant au remplissage des interstices par les sédiments fins entre, d'une part, les sites de référence, les sites avec une réinjection sédimentaire et les sites dynamiques ; et d'autre part les sites pavés, comme nous le formulions avec la seconde hypothèse, qui est ainsi validée. Ceci nécessite cependant de s'affranchir de conditions locales (vitesse de l'écoulement, granulométrie du radier) et de considérer également l'existence d'un gradient amont - aval, le "Rhône amont" se distinguant du "Rhône médian" et "du Rhône aval" par des valeurs de comblement plus importantes, tous types de station confondus.

En ce qui concerne les opérations de réinjection, un plus faible comblement interstitiel est bien observé sur les deux stations d'étude (comparées aux stations pavées). Une légère amélioration dans le temps est en outre observé pour le site de BLN. Ceci doit maintenant encore se vérifier sur d'autres stations.

5. Conclusions et perspectives

Le suivi des 10 stations sur 10 campagnes durant 2,5 ans a permis de mettre en lumière plusieurs éléments concernant la qualité de l'habitat benthique et du comblement interstitiel du fond du lit. Le premier constat est que la variabilité de la distribution granulométrique intra-stationnelle (au sein d'une même station) est inférieure à la variabilité inter-stationnelle (entre les stations). En effet, les résultats des prélèvements ont montré que chaque site se comporte de manière singulière, en restant relativement stable dans le temps, confirmant ainsi la première hypothèse. Des comportements similaires ont pu également être observés entre les sites, qui suivent la typologie préétablie (sites de références, sites réinjectés, site dynamique, sites pavés).

La seconde hypothèse considérait que la part des sédiments fins évoluait de façon décroissante entre les stations pavées (BEL, PBN, PDR "pavée", DZM PAM et DZM PAV), les stations avec une réinjection sédimentaire (PDR "marges" et BLN), la station dynamique (CHA), et les stations de référence (LYM et Drôme). L'étude des résidus a mis en évidence que la part de sédiments fins répond à des caractéristiques locales des radiers mais aussi à un gradient longitudinal. Dans les secteurs amont du fleuve ("Rhône amont"), la part des sédiments fins est plus élevée que dans les secteurs situés plus en aval ("Rhône médian" et "Rhône aval"), indépendamment du type de station. L'analyse de ce gradient longitudinal sera approfondie dans le cadre du programme OSR7, notamment sur la base de l'examen des concentrations de MES (axes D et E) et de l'étude des affluents principaux du Rhône.

Lorsque le Rhône est découpé en 3 tronçons, le "Rhône amont" (stations de CHA et BEL), le "Rhône médian" (LYM, PBN et PDR), et enfin le "Rhône aval" (DRO, BLN et DZM), chaque tronçon dispose d'un site référentiel (CHA, LYM, DRO) pour lequel le comblement interstitiel demeure inférieur aux sites pavés. Les stations pavées des deux tronçons les plus en amont (BEL et PBN) disposent d'une matrice fortement comblée, ce qui n'est pas le cas pour les stations situées plus en aval. En ce qui concerne les stations ayant connu une réinjection sédimentaire (PDR "marges" et BLN), elles présentent une part de sédiments fins comprise entre celle de leur station de référence (respectivement LYM et DRO) et celles de leurs stations pavées dans leur tronçon respectif. Le site de PDR montre une grande variabilité de la part de sédiments fins au cours du temps et ne suit aucune tendance temporelle particulière. La station de BLN quant à elle indique un décomblement progressif et une faible variation. Le panel de sites ne comporte néanmoins que deux sites réinjectés, ce qui est encore faible pour bien saisir les effets d'une réinjection sédimentaire sur le comblement interstitiel.

Pour autant, la période hydrologique durant laquelle ces suivis ont été réalisés ne comporte pas de crue supérieure à la crue décennale. Il est donc difficile de comprendre quel serait l'effet d'un tel événement sur le comblement interstitiel du fond du lit des Vieux-Rhône. Les campagnes de terrain ont été réalisées dans une fenêtre temporelle relativement courte (2,5 ans). La poursuite des suivis, intégrant des événements hydrologiques plus marqués, nous apportera davantage de compréhension sur l'évolution du comblement interstitiel à moyen terme.

Bien que ces premiers résultats permettent de mieux comprendre l'état et la dynamique du compartiment interstitiel des Vieux-Rhône, plusieurs aspects restent néanmoins mal connus : (i) la variabilité spatiale de la part de sédiments fins au sein d'un Vieux-Rhône, (ii) l'influence

des affluents sur le gradient amont-aval de l'évolution de la part de sédiments fins, et (iii) l'effet de la concentration en MES du Rhône et de ses affluents sur la part de sédiments fins dans le milieu interstitiel.

Ces différents aspects nécessitent des études complémentaires afin de mieux comprendre la dynamique spatiale et temporelle du compartiment interstitiel des Vieux-Rhône.

(i) Ainsi, pour déterminer dans quelle mesure la part de sédiments fins peut varier au sein d'un Vieux-Rhône, il est nécessaire de multiplier les prélèvements sur radier le long d'un même Vieux-Rhône. Cette approche à échelle spatiale plus fine sera mise en œuvre sur le Vieux-Rhône de Chautagne en 2024 dans le cadre d'un stage de M2. Ce travail permettra d'établir un référentiel, qui pourra servir de point de comparaison avec des prélèvements réalisés aux mêmes stations après un événement APAVER (prévu pour 2025).

(ii) Pour caractériser l'influence des affluents sur le gradient amont-aval de l'évolution de la part de sédiments fins, deux nouvelles stations seront échantillonnées régulièrement dans le cadre du programme ORS7, à savoir sur l'Arve et sur l'Ain. Avec la Drôme, qui fait déjà partie du plan d'échantillonnage du programme OSR6, les informations relatives à l'état interstitiel de ces trois affluents permettront de mieux comprendre leur influence sur la qualité du compartiment interstitiel du fleuve Rhône.

(iii) Ensuite, pour caractériser les effets de la concentration en MES du Rhône et de ses affluents sur la part de sédiments fins dans le milieu interstitiel, les données relatives à ces concentrations et leur évolution dans le temps doivent être rassemblées et analysées. Elles pourront par la suite être intégrées dans le modèle présenté dans cette étude et sans doute mieux comprendre le gradient amont-aval qui est mis en évidence en termes de comblement interstitiel.

Enfin, la construction d'un référentiel en termes d'état du milieu interstitiel présente également un intérêt à être couplé avec un inventaire et une analyse des macro-invertébrés benthiques. Selon les objectifs d'évaluation des habitats benthiques du vieux Rhône, une méthodologie devrait être élaborée en collaboration avec des hydroécologues et des hydrobiologistes, afin de tester des hypothèses et de mettre en œuvre un protocole adapté et pertinent (e.g., prélèvement au droit des sites, score d'habitabilité). Dans cette optique, le programme OSR7 devrait créer davantage de ponts avec le programme de restauration RhônEco, notamment en associant les suivis de la qualité des habitats avec des suivis de l'évolution des communautés aquatiques, et ce, sur un plan d'échantillonnage commun. Ainsi, coupler ces deux types de suivi fournirait une évaluation plus globale des opérations de restauration.

6. Bibliographie

- Acornley R.M., Sear D.A. (1999). Sediment transport and siltation of brown trout (*Salmo trutta* L.) spawning gravels in chalk streams. *Hydrological Processes*, 13(3), 447-458.
- Bravard J.-P. (1986). Le Rhône, du Léman à Lyon. La Manufacture, Lyon, 451 p.
- Bulteau T., Marteau B., Batalla R.J., Chapron E., Valette P., Piégay H., sous presse. Effects of repeated drawdown flushing on riverbed fine sediment dynamics downstream from a dam. *Anthropocene*.
- Bunte K. (2004). Gravel mitigation and augmentation below hydroelectric dams: a geomorphological perspective. State of the Science Review.
- Bunte K., Abt S. (2001). Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring. General Technical Report, United States Department of Agriculture, Forest Service, 428 p.
- Church M., McLean D.G., Walcott J.F. (1987). River bed gravels: sampling and analysis. *In: Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, Thorne C.R., Bathurst J.C., Hey R.D. (eds.), John Wiley and Sons, Chichester, p. 43 – 88.
- Descloux S., Detry T., Philippe M., Marmonier P. (2010). Comparison of different techniques to assess surface and subsurface streambed colmation with fine sediments. *International Review of Hydrobiology*, 95, 520-540.
- Greig S.M., Sear D.A., Carling P.A. (2005). The impact of fine sediment accumulation on the survival of incubating salmon progeny: Implications for sediment management. *Science of the Total Environment*, 344(1-3), 241-258.
- Greig S.M., Sear D.A., Carling P.A. (2007). A review of factors influencing the availability of dissolved oxygen to incubating salmonid embryos. *Hydrological Processes*, 21(3), 323-334.
- Lisle T.E. (1989). Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, north coastal California. *Water Resources Research*, 25(6), 1303-1319.
- McNeil W.J., Ahnell W.H. (1964). Success of pink salmon spawning relative to size of spawning bed materials. U.S. Fish and Wildlife Service Special Scientific Report. *Fisheries* 469.
- Maridet L., Wasson J., Philippe M. (1992). Vertical distribution of fauna in the bed sediment of three running water sites: influence of physical and trophic factors. *Regulated Rivers*, 7: 45-55. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450070107>
- Maridet L., Wasson J.G., Philippe M., Amoros C. (1995). Benthic organic matter dynamics in three streams: riparian vegetation or bed morphology control? *Archiv für Hydrobiologie*, 132: 415-425. DOI: 10.1127/archiv-hydrobiol/132/1995/415
- Masquelier, F. (2022). Évaluation des stocks de sable dans le Rhône en amont de Lyon. Rapport de master INRAE, 77 p. <https://hal.science/OSR/hal-04081317v1>

- Parrot E. (2015). *Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée*. Thèse de Doctorat, Géomorphologie fluviale, Université Jean Moulin (Lyon 3), 2015. <http://www.theses.fr/2015LYO30054/document>
- Peeters A., Houbrechts G., de le Court B., Hallot E., Van Campenhout J., Petit F. (2021). Suitability and sustainability of spawning gravel placement in degraded river reaches, Belgium. *Catena*, 201, 105217. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105217>
- Peeters A., Cassel M., Navratil O., Vázquez-Tarrío D., Perret F., Bourjaillat B., Mouquet-Noppe C., Rey L., Nedelec R., Berthier-Laumond S., Michel K., Tissot N., Parmentier H., Piégay H., Mora C., Meric L., Falgon A., Bounous M. et Pont B. (2024). *Suivis des enregistrements RFID et géophones. Synthèse des campagnes de terrain*. Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône - 6e programme d'action. 106p. <https://hal.science/OSR/hal-03750532>
- Petit F. (1988). Phénomènes influençant la mise en mouvement et le transport des particules en rivières naturelles. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 32, 299-310.
- Petit F., Poinart D., Bravard J.P. (1996). Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France ("Canal de Miribel"). *Catena*, 209-226. [doi:10.1016/0341-8162\(95\)00047-X](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00047-X)
- Rex J.F., Petticrew E.L. (2011). Fine Sediment Deposition at Forest Road Crossings: An Overview and Effective Monitoring Protocol. *In Sediment Transport in Aquatic Environments*, edited by Andrew Manning. London: IntechOpen, 2011. 10.5772/24275
- Rice S.P., Church M., 1998. Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 345-363.
- Surian N., 1999. Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 1135-1151.
- Van Campenhout J., Petit F., Peeters A., Houbrechts G. (2022). Estimation of the area-specific suspended sediment yield from discrete samples in different regions of Belgium. *J Soils Sediments*, 22: 704–729. doi.org/10.1007/s11368-021-03076-w
- Vázquez Tarrío D., Cassel M., Piégay H., Dépret T., Arnaud F., Mouquet-Noppe C., Michel K., Noirot B., Vaudor L, Mora C., Meric L. (2021). Suivi de l'effet morphologique du démantèlement des marges : validation des estimations de charriage par des observations in situ. Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5ème Programme d'Actions, 58 p <https://hal.science/OSR/hal-03291004v1>
- Wood P.J., Armitage P.D. (1997). Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental Management*, 21(2), 203-217.
- Young M.K., Hubert W.A., Wesche T.A. (1991). Biases associated with four stream substrate samplers. *Can J Fish Aquat Sci* 48:1882-1886. DOI: 10.1139/f91-223

7. Annexes

Annexe I : données environnementales et de prélèvement (C1 à C10)

Camp.	Date	Site	Station	Prélèvemt.	heau	v10cm	Masse	Masse (kg)	% + gros élément
					CE (cm)	(cm/s)	(kg)		
C1	07/10/2021	Chautagne	CHA	1	-	-	5,14	18,29	7,87
C1	07/10/2021			2	-	-	6,15		
C1	07/10/2021			3	-	-	7,00		
C2	01/12/2021			1	24,00	35,00	6,97	17,76	5,42
C2	01/12/2021			2	27,00	45,00	4,62		
C2	01/12/2021			3	19,00	50,00	6,17		
C3	28/02/2022			1	38,00	80,00	5,69	22,04	5,58
C3	28/02/2022			2	41,00	52,00	7,48		
C3	28/02/2022			3	31,00	75,00	8,87		
C4	19/05/2022			1	33,00	96,00	6,66	17,77	5,35
C4	19/05/2022			2	45,00	100,00	5,68		
C4	19/05/2022			3	46,00	77,00	5,43		
C6	28/11/2022			1	18,00	52,00	5,34	17,07	17,14
C6	28/11/2022			2	16,00	65,00	5,59		
C6	28/11/2022			3	18,00	35,00	6,14		
C7	23/01/2023	1	13,00	46,00	4,63	15,73	2,80		
C7	23/01/2023	2	14,00	-	5,18				
C7	23/01/2023	3	12,00	48,00	5,92				
C8	18/04/2023	1	16,00	49,00	5,48	14,75	3,05		
C8	18/04/2023	2	24,00	-	5,13				
C8	18/04/2023	3	26,50	85,00	4,14				
C9	13/09/2023	1	10,00	26,00	4,40	12,51	10,35		
C9	13/09/2023	2	14,00	48,00	4,71				
C9	13/09/2023	3	12,00	-	3,40				
C1	24/09/2021	Belley amont	BEL PAM	1	-	-	7,46	24,85	-
C1	24/09/2021			2	-	-	7,61		
C1	24/09/2021			3	-	-	9,78		
C1	24/09/2021	Belley aval	BEL PAV	1	-	-	7,32	21,23	-
C1	24/09/2021			2	-	-	7,37		
C1	24/09/2021			3	-	-	6,55		
C2	01/12/2021			1	18,00	30,00	6,93	22,91	2,25
C2	01/12/2021			2	15,00	35,00	8,69		

C2	01/12/2021			3	13,00	40,00	7,29		
C3	28/02/2022			1	17,00	55,00	8,65	23,95	2,55
C3	28/02/2022			2	17,00	40,00	8,11		
C3	28/02/2022			3	17,00	30,00	7,18		
C4	19/05/2022			1	23,00	56,00	7,32	21,29	3,36
C4	19/05/2022			2	23,00	60,00	7,38		
C4	19/05/2022			3	26,00	56,00	6,59		
C5	18/08/2022			1	23,00	-	6,33	19,16	3,94
C5	18/08/2022			2	15,00	-	6,74		
C5	18/08/2022			3	12,00	-	6,08		
C6	29/11/2022			1	9,00	17,00	7,33	21,04	2,28
C6	29/11/2022			2	12,00	57,00	7,07		
C6	29/11/2022			3	16,00	34,00	6,65		
C8	18/04/2023			1	28,00	64,00	4,98	22,69	1,98
C8	18/04/2023			2	30,00	69,00	10,51		
C8	18/04/2023			3	36,00	55,00	7,19		
C9	13/09/2023			1	15,00	22,00	5,01	15,15	3,60
C9	13/09/2023			2	16,00	24,00	5,41		
C9	13/09/2023			3	17,00	32,00	4,73		
C1	22/09/2021	Neyron amont	LYM_PAM	1	-	-	8,63	23,59	-
C1	22/09/2021			2	-	-	7,88		
C1	22/09/2021			3	-	-	7,07		
C2	02/12/2021			1	16,00	95,00	6,48	17,73	1,55
C2	02/12/2021			2	15,00	95,00	5,37		
C2	02/12/2021			3	11,00	90,00	5,88		
C3	04/03/2022			1	17,00	30,00	9,33	22,64	9,50
C3	04/03/2022			2	30,00	45,00	6,89		
C3	04/03/2022			3	35,00	40,00	6,42		
C4	25/05/2022			1	18,00	12,00	6,74	19,61	3,19
C4	25/05/2022			2	30,00	13,00	6,69		
C4	25/05/2022			3	40,00	16,00	6,18		
C5	24/08/2022			1	13,00	-	6,70	20,63	8,17
C5	24/08/2022			2	26,00	-	6,84		
C5	24/08/2022			3	33,00	-	7,09		
C6	30/11/2022			1	13,00	45,00	5,42	17,52	5,02
C6	30/11/2022			2	3,00	55,00	5,99		
C6	30/11/2022			3	26,00	62,00	6,11		
C7	24/01/2023			1	33,00	53,00	6,15	18,17	2,41
C7	24/01/2023			2	36,00	56,00	5,84		
C7	24/01/2023			3	31,00	70,00	6,18		
C8	19/04/2023			1	31,00	20,00	5,36	15,17	2,27

C8	19/04/2023			2	35,00	26,00	4,66		
C8	19/04/2023			3	35,00	40,00	5,15		
C9	22/08/2023			1	20,50	75,00	7,01	20,41	2,25
C9	22/08/2023			2	29,00	76,00	6,67		
C9	22/08/2023			3	38,00	75,00	6,74		
C1	22/09/2021	Neyron aval	LYM_PAV	1	-	-	7,88	24,12	-
C1	22/09/2021			2	-	-	6,48		
C1	22/09/2021			3	-	-	9,77		
C2	02/12/2021	Pierre-Bénite	PBN	1	32,00	10,00	6,88	21,71	12,81
C2	02/12/2021			2	28,00	9,00	6,27		
C2	02/12/2021			3	15,00	5,00	8,55		
C3	01/03/2022			1	29,00	10,00	4,23	18,37	8,14
C3	01/03/2022			2	44,00	11,00	6,73		
C3	01/03/2022			3	40,00	10,00	7,42		
C4	20/05/2022			1	24,00	3,00	8,18	22,58	19,25
C4	20/05/2022			2	26,00	5,00	6,36		
C4	20/05/2022			3	31,00	3,00	8,04		
C5	18/08/2022			1	28,00	-	6,30	17,94	9,42
C5	18/08/2022			2	15,00	-	5,01		
C5	18/08/2022			3	9,00	-	6,63		
C6	30/11/2022			1	20,00	-	7,56	21,91	4,36
C6	30/11/2022			2	27,00	9,00	6,51		
C6	30/11/2022			3	36,00	13,00	7,84		
C7	24/01/2023			1	36,00	11,00	4,02	14,68	9,88
C7	24/01/2023			2	31,00	8,00	6,45		
C7	24/01/2023			3	25,00	8,00	4,21		
C8	19/04/2023			1	38,00	12,00	6,04	18,86	6,73
C8	19/04/2023			2	39,50	14,00	7,57		
C8	19/04/2023			3	37,50	-	5,25		
C9	22/08/2023			1	26,50	11,00	7,61	20,00	7,78
C9	22/08/2023			2	40,00	12,00	7,08		
C9	22/08/2023			3	45,50	-	5,31		
C4	20/05/2022	Péage de Roussillon	PDR (Pavée)	1	24,00	25,00	7,36	20,38	10,04
C4	20/05/2022			2	26,00	20,00	6,89		
C4	20/05/2022			3	28,00	16,00	6,13		
C5	19/08/2022			1	47,00	-	7,31	18,84	18,34
C5	19/08/2022			2	38,00	-	5,58		
C5	18/08/2022			3	40,00	-	5,95		
C6	17/11/2022			1	42,00	27,00	5,50	15,62	11,67
C6	17/11/2022			2	38,00	21,00	4,76		

C6	17/11/2022			3	37,00	23,00	5,36		
C7	25/01/2023			1	33,00	31,00	6,88	18,16	9,42
C7	25/01/2023			2	28,00	22,00	5,59		
C7	25/01/2023			3	23,00	6,00	5,69		
C8	20/04/2023			1	62,00	36,00	3,31	3,31	9,51
C9	29/08/2023			1	26,00	25,00	5,35	18,76	9,65
C9	29/08/2023			2	34,00	26,00	7,66		
C9	29/08/2023			3	21,00	20,00	5,74		
C10	15/01/2024			1	28,00	22,20	5,76	17,25	16,96
C10	15/01/2024			2	23,00	28,60	6,91		
C10	15/01/2024			3	26,50	14,30	4,58		
C1	15/10/2021	Péage de Roussillon	PDR PAMp	1	-	-	4,27	14,55	-
C1	15/10/2021	Amont		2	-	-	5,72		
C1	15/10/2021	pavée		3	-	-	4,55		
C2	03/12/2021	Péage de Roussillon	PDR PAM (Marges)	1	24,00	2,00	7,48	20,80	5,55
C2	03/12/2021	amont		2	21,00	3,00	5,36		
C2	03/12/2021			3	20,00	2,00	7,95		
C3	01/03/2022			1	10,00	69,00	8,08	20,61	2,72
C3	01/03/2022			2	24,00	97,00	5,13		
C3	01/03/2022			3	20,00	67,00	7,40		
C4	20/05/2022			1	34,00	74,00	7,71	21,60	3,03
C4	20/05/2022			2	25,00	63,00	7,02		
C4	20/05/2022			3	14,00	58,00	6,87		
C5	19/08/2022			1	43,00	-	5,71	16,76	2,21
C5	19/08/2022			2	40,00	-	5,00		
C5	19/08/2022			3	44,00	-	6,05		
C6	17/11/2022			1	9,00	20,00	6,85	13,66	8,40
C6	17/11/2022			2	5,00	18,00	6,81		
C6	17/11/2022			3	12,00	14,00	6,28	19,03	5,17
C7	25/01/2023			2	17,00	66,00	7,37		
C7	25/01/2023			3	13,00	52,00	5,39		
C8	20/04/2023			1	24,00	70,00	5,51	16,92	4,85
C8	20/04/2023			2	24,00	84,00	6,95		
C8	20/04/2023			3	22,00	83,00	4,46		
C9	29/08/2023			1	32,00	45,00	6,39	18,59	5,19
C9	29/08/2023			2	31,00	47,00	6,64		
C9	29/08/2023			3	29,00	46,00	5,56		
C10	15/01/2024			1	6,50	11,10	7,02	20,90	8,38
C10	15/01/2024			2	2,00	11,10	6,82		
C10	15/01/2024			3	10,00	33,30	7,05		

C1	15/10/2021	Péage de Roussillon aval	PDR PAV	1	-	-	6,44	22,03	-		
C1	15/10/2021			2	-	-	6,48				
C1	15/10/2021			3	-	-	9,11				
C2	03/12/2021			1	24,00	30,00	9,04	27,79	8,58		
C2	03/12/2021			2	25,00	52,00	9,50				
C2	03/12/2021			3	19,00	39,00	9,26				
C1	29/10/2021	Drôme	DRO	1	-	-	6,71	21,37	5,24		
C1	29/10/2021			2	-	-	8,36				
C1	29/10/2021			3	-	-	6,30				
C3	02/03/2022			1	34,00	83,00	5,07	17,95	2,82		
C3	02/03/2022			2	14,00	69,00	6,48				
C3	02/03/2022			3	18,00	-	6,40				
C4	24/05/2022			1	11,00	54,00	6,74	18,64	3,14		
C4	24/05/2022			2	23,00	58,00	5,18				
C4	24/05/2022			3	16,00	38,00	6,72				
C5	22/08/2022			1	6,00	-	5,66	17,58	2,47		
C5	22/08/2022			2	10,00	-	6,15				
C5	22/08/2022			3	5,00	-	5,76				
C6	16/11/2022			1	42,00	20,00	4,83	16,64	2,79		
C6	16/11/2022			2	34,00	32,00	5,53				
C6	16/11/2022			3	41,00	43,00	6,28				
C7	07/02/2023			1	7,00	33,00	5,82	20,77	4,56		
C7	07/02/2023			2	8,00	45,00	7,92				
C7	07/02/2023			3	8,00	62,00	7,02				
C8	24/04/2023			1	37,00	83,00	5,08	17,40	3,54		
C8	24/04/2023			2	30,00	97,00	5,67				
C8	24/04/2023			3	23,00	76,00	6,64				
C9	28/08/2023			1	35,00	33,00	4,37	13,09	8,59		
C9	28/08/2023			2	45,00	103,00	5,00				
C9	28/08/2023			3	33,00	77,00	3,72				
C2	21/12/2021			Baix-le-Logis-Neuf	BLN	1	36,00	70,00	6,45	20,65	9,41
C2	21/12/2021					2	41,00	67,00	7,02		
C2	21/12/2021	3	43,00			92,00	7,19				
C3	02/03/2022	1	32,00			33,00	6,11	20,44	13,67		
C3	02/03/2022	2	41,00			25,00	6,92				
C3	02/03/2022	3	30,00			55,00	7,41				
C4	24/05/2022	1	28,00			75,00	7,90	21,75	7,43		
C4	24/05/2022	2	28,00			64,00	6,26				
C4	24/05/2022	3	23,00			44,00	7,59				
C5	23/08/2022	1	39,00			-	5,80	16,50	7,30		

C5	23/08/2022			2	41,00	-	4,41		
C5	23/08/2022			3	26,00	-	6,29		
C6	17/11/2022			1	38,00	51,00	5,11	19,29	5,37
C6	17/11/2022			2	32,00	52,00	7,59		
C6	17/11/2022			3	23,00	35,00	6,59		
C7	08/02/2023			1	39,00	61,00	5,90	18,70	9,22
C7	08/02/2023			2	36,00	59,00	5,97		
C7	08/02/2023			3	40,00	74,00	6,83		
C8	24/04/2023			1	34,00	47,00	5,42	18,36	4,68
C8	24/04/2023			2	42,00	50,00	6,06		
C8	24/04/2023			3	45,00		6,88		
C9	25/09/2023			1	29,00	-	5,70	17,69	7,92
C9	25/09/2023			2	28,00	-	7,87		
C9	25/09/2023			3	31,00	-	4,12		
C1	28/10/2021	Donzère- Mondragon Amont	DZM PAM	1	-	-	7,94	20,47	4,54
C1	28/10/2021			2	-	-	6,95		
C1	28/10/2021			3	-	-	5,58		
C2	21/12/2021			1	32,00	18,00	8,73	25,53	6,84
C2	21/12/2021			2	22,00	27,00	9,39		
C2	21/12/2021			3	38,00	52,00	7,40		
C3	02/03/2022			1	35,00	45,00	7,78	19,87	9,47
C3	02/03/2022			2	34,00	32,00	6,55		
C3	02/03/2022			3	26,00	25,00	5,55		
C4	23/05/2022			1	33,00	89,00	7,50	23,05	9,99
C4	23/05/2022			2	35,00	145,00	8,20		
C4	23/05/2022			3	26,00	113,00	7,35		
C5	22/08/2022			1	23,00	-	6,26	18,88	6,06
C5	22/08/2022			2	25,00	-	5,74		
C5	22/08/2022			3	25,00	-	6,87		
C6	16/10/2022			1	34,00	-	6,47	17,81	10,11
C6	16/10/2022			2	31,00	46,00	5,76		
C6	16/10/2022			3	30,00	44,00	5,58		
C7	07/02/2023			1	35,00	35,00	4,82	13,23	6,27
C7	07/02/2023			2	29,00	36,00	3,60		
C7	07/02/2023			3	36,00	33,00	4,81		
C8	24/04/2023			1	42,00	75,00	6,28	19,36	12,76
C8	24/04/2023			2	-	-	6,90		
C8	24/04/2023			3	37,50	61,00	6,18		
C9	28/08/2023			1	25,00	35,00	5,85	18,40	8,51
C9	28/08/2023			2	34,00	47,00	5,85		
C9	28/08/2023			3	35,00	34,00	6,70		

C1	28/10/2021	Donzère- Mondragon aval	DZM PAV	1	-	-	9,36	23,14	5,75
C1	28/10/2021			2	-	-	7,16		
C1	28/10/2021			3	-	-	6,62		
C2	21/12/2021			1	15,00	14,00	6,42	18,35	16,20
C2	21/12/2021			2	19,00	18,00	6,58		
C2	21/12/2021			3	22,00	34,00	5,36		
C3	02/03/2022			1	27,00	125,00	7,15	21,33	3,91
C3	02/03/2022			2	27,00	160,00	7,77		
C3	02/03/2022			3	27,00	75,00	6,41		
C4	23/05/2022			1	28,00	48,00	9,02	23,73	8,96
C4	23/05/2022			2	39,00	64,00	7,05		
C4	23/05/2022			3	33,00	26,00	7,65		
C5	22/08/2022			1	33,00	-	7,26	17,74	7,97
C5	22/08/2022			2	38,00	-	5,60		
C5	22/08/2022			3	25,00	-	4,87		
C6	16/10/2022			1	22,00	66,00	5,85	16,22	14,21
C6	16/10/2022			2	21,00	98,00	5,21		
C6	16/10/2022			3	23,00	100,00	5,16		
C7	07/02/2023			1	19,00	82,00	6,47	16,67	9,72
C7	07/02/2023			2	19,00	94,00	5,11		
C7	07/02/2023			3	23,00	96,00	5,08		
C8	24/04/2023			1	27,00	43,00	6,36	14,19	4,72
C8	24/04/2023			2	30,00	30,00	3,97		
C8	24/04/2023			3	37,00	45,00	3,85		
C9	28/08/2023			1	35,00	116,00	6,72	18,75	17,04
C9	28/08/2023			2	31,00	130,00	7,88		
C9	28/08/2023			3	30,00	70,00	4,15		



Observatoire des Sédiments du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers

