



HAL
open science

Mesure in situ et modélisation pour la quantification de la charge sableuse en suspension

Guillaume Dramais, B. Camenen, Jessica Laible, Brahim Moudjed

► To cite this version:

Guillaume Dramais, B. Camenen, Jessica Laible, Brahim Moudjed. Mesure in situ et modélisation pour la quantification de la charge sableuse en suspension. [Rapport de recherche] INRAE, UR RiverLy. 2023. hal-04228327

HAL Id: hal-04228327

<https://hal.science/hal-04228327v1>

Submitted on 4 Oct 2023

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

Mesure in situ et modélisation pour la quantification de la charge sableuse en suspension

Mesure *in situ* et modélisation pour la quantification de la charge sableuse en suspension

Rapport scientifique final

Version du 24 mars 2023

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

Axe A – Comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve

Action 1 – Mesure et quantification de la charge sableuse

Personnes impliquées

Auteurs du rapport : Guillaume Dramais (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Benoît Camenen (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Jessica Laible (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Brahim Moudjed (INRAE, UR RiverLy, HyR)

Contributeurs de l'action : Céline Berni (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Blaise Calmel (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Junjian Deng (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Léa Kieffer (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Jérôme Le Coz (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Adrien Bonnefoy (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Fanny Courapied (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Mickaël Lagouy (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Janna Stepanian (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Fabien Thollet (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Floriane Masquelier (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Alexis Pavaux (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Thibault Vassor (INRAE, UR RiverLy, HyR) ; Aurélien Despax (CNR, Cacoh) ; Serge Françon (CNR Cacoh) ; Thierry Fretaud (CNR Cacoh) ; Rodolphe Jeannot (CNR Cacoh) ; Sébastien Langlais (EDF, DTG) ; François Lauters (EDF, DTG) ; Jérôme Laurent (CNR, Cacoh) ; Brice Mourier (ENTPE) ; Lucas Parmentier (EDF, DTG) ; Gilles Pierrefeu (CNR, Cacoh).

Pour citer ce rapport

Dramais, G., Camenen, B., Laible, J., Moudjed B. (2023). *Mesures in situ et modélisation pour la quantification de la charge sableuse*. Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. Action A1. 41 p.

L'OSR est un programme animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter

Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)

Résumé

Si les connaissances sur le fonctionnement hydro-sédimentaire et morphodynamique du Rhône ont beaucoup progressé lors des cinq précédents programmes OSR, certaines lacunes demeurent, notamment sur la compréhension de la dynamique du sable en suspension dans le Rhône et ses affluents. Ce rapport présente différentes avancées lors du programme OSR6 sur les apports sableux au Rhône depuis le lac Léman au travers du suivi de l'accompagnement des chasses du Haut-Rhône jusqu'au delta. Des expérimentations ont eu lieu pour estimer les stocks mobilisables entre l'Ain et l'amont de Lyon. Des campagnes de jaugeage solide se sont poursuivies sur le Rhône à Lyon malgré une période hydrologique calme. Un suivi fin de la chasse des barrages de la Basse-Isère a également eu lieu autour de la confluence de l'Isère et du Rhône à Bourg-Lès-Valence. Des développements méthodologiques ont également été menés notamment à Grenoble sur l'Isère où une station hydro-sédimentaire acoustique bi-fréquence a été mise en place et où de nombreuses campagnes de mesure ont eu lieu, notamment pour comparer les moyens de prélèvement de la charge sableuse. Parmi les développements effectués dans ce programme OSR6, on peut aussi citer les avancées en terme d'interprétation des signaux acoustiques et de leur post-traitement au travers des travaux de thèse de Jessica Laible et du post-doctorat de Brahim Moudjed.

L'objectif à terme serait de pouvoir mesurer le flux de sable en continu sur le Rhône et de connaître les stocks de sable disponibles et mobilisables en crue. Connaissant ces flux et leur dynamique, les gestionnaires ont la possibilité de mieux gérer les apports, parfois massifs, de sable durant les événements de crue ou de chasse.

Mots-clés

Rhône ; Observatoire ; Sédiments ; Sable ; Concentration ; Flux ; Prélèvements ; Stock ; Hydro-acoustique ; chasse de barrage

Table des matières

1. Introduction.....	6
1.1. Contexte de l'étude.....	6
1.2. Objectifs de l'action.....	6
2. Méthodologies pour l'estimation des flux de sable.....	8
2.1. Quantification de la charge sableuse : prélèvements <i>in situ</i> et incertitudes.....	8
2.1.1. Choix des préleveurs.....	8
2.1.1. Comparaison des préleveurs.....	9
2.1.2. Incertitudes de mesure liées aux préleveurs.....	10
2.2. Méthode de mesure du flux de sable combinant prélèvements et jaugeages ADCP.....	12
2.3. Intercomparaison de mesures de la distribution granulométrique des particules.....	13
3. Synthèse des campagnes de mesure réalisées lors de l'OSR6.....	15
3.1. Le Rhône à Lyon-Perrache.....	15
3.3. La chasse de la Basse-Isère de 2021.....	17
3.4. Le Rhône à Puyrion lors de l'APAVÉR 2021.....	17
3.4.1. Présentation de la campagne de mesure de mai 2021.....	17
3.4.1. Principaux résultats et conclusions.....	18
3.5. L'Isère à Grenoble-campus.....	20
3.5.1. Site de mesure.....	20
3.5.1. Jaugeages solides réalisés.....	20
3.5.2. Courbe de tarage.....	22
4. Évaluation des stocks de sable dans le Rhône en amont de Lyon.....	23
4.1. Contexte de l'étude.....	23
4.2. Site d'étude.....	23
4.3. Méthodologie pour l'évaluation des stocks de fines.....	24
4.3.1. Mesure des stocks locaux.....	24
4.3.2. Évaluation des stocks remobilisés.....	25
4.4. Résultats sur les mesures locales.....	26
4.5. Estimation des stocks de sable remis en suspension lors de la crue de janvier 2018.....	28
4.6. Apport de la modélisation numérique.....	28
5. Méthodes hydro-acoustiques pour la mesure de la suspension de sable.....	30
5.1. Méthode HADCP – synthèse des avancées.....	30
5.1.1. Introduction.....	30
5.1.2. Méthodologies.....	30
5.1.3. Résultats préliminaires.....	32
5.2. Une interface graphique pour la mesure hydro-acoustique.....	32
5.2.1. Contexte.....	32
5.2.2. Présentation de l'interface.....	33
6. Conclusion.....	37
7. Bibliographie.....	38

Listes des abréviations

ABS : Acoustic Backscatter Sensor (capteur de mesure de la rétro-diffusion acoustique)

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler (courantomètre acoustique à effet Doppler)

APAVER : Abaissement PARTiel des retenues de VERbois

CNR : Compagnie National du Rhône

EDF-DTG : Electricité de France - Division Technique Générale

ENTPE : École Nationale des Travaux Publics de l'État

EWI : Equal Width Increment (Incrémentation d'égale largeur)

FISP : Federal Inter-Agency Sedimentation Project (projet inter-agence fédéraux sur la sédimentation)

GPS : Global Positioning System (géo-positionnement par satellite)

HADCP : Horizontal coustic Doppler Current Profiler (ADCP horizontal)

HHLab : Laboratoire d'Hydraulique et d'Hydro-morphologie

IGE : Institut des Géosciences de l'Environnement

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

ISO : International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)

LISST : Laser In Situ Scattering and Transmissometry (diffusion et transmission laser in situ)

MES : Matière En Suspension

OSR : Observatoire des Sédiments du Rhône

SDC : Sand Discharge Computing (calcul du flux de sable)

1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude

La quantification des sédiments en suspension permet de mieux comprendre les processus de transport solide pour améliorer la gestion et le transit des sédiments vers l'aval. De nombreux travaux de recherche sont menés pour comprendre, mesurer en temps réel, modéliser la mobilité des sédiments dans les rivières. Les méthodes de mesure des concentrations et des flux en continu dans le réseau hydrographique sont encore incertaines et parfois peu généralisables.

Contrairement aux argiles et limons, communément et abusivement associés au terme MES (Matière en Suspension), les sables présentent une variabilité spatiale des concentrations très élevées avec des concentrations plus fortes au fond de la colonne d'eau et là où les vitesses du courant sont les plus élevées. Ceci implique une nécessité d'explorer l'ensemble de la section pour en estimer les flux de sable. De plus, dans les rivières à graviers comme le Rhône, la capacité de transport pour les sables est rarement atteinte et les flux sont dépendant des apports amont, limitant fortement les possibilités de prédiction. Même si les enjeux sont forts (dépôts dans les retenus et les chenaux de navigation), la connaissance de la dynamique sableuse dans le Rhône reste très parcellaire et un besoin de méthodologies est nécessaire pour améliorer la mesure.

1.2. Objectifs de l'action

Cette action doit permettre à terme d'améliorer la mesure du flux continu des sables en suspension sur le Rhône et d'y associer les stocks de sable disponibles et mobilisables en crue. Il s'agit à l'échelle du Rhône de localiser (réservoir de barrage, bancs, etc.) et comprendre les excès sableux à certains endroits du continuum fluvial.

La première partie présente les méthodes et outils déployés pour améliorer la détermination des flux de sables par jaugeage solide en combinant prélèvements et jaugeages ADCP. Un effort tout particulier a été mis en œuvre sur les incertitudes de mesure. La méthode de dépouillement du jaugeage solide (SDC, Dramais *et al.*, 2020) a été implémentée dans un outil Python basé sur QRevInt, et une méthode de calcul des incertitudes opérationnelles a été établie. Deux outils importants qui seront transférés aux partenaires scientifiques et opérationnels. Aussi, la mesure de la granulométrie des échantillons prélevés s'est avéré un enjeu méthodologique important, qui a fait l'objet d'un article (Laible *et al.*, 2023).

Une autre action se concentre plus particulièrement sur l'évaluation des zones de stockage de sable, permettant d'expliquer les flux mesurés sur le Rhône à Perrache. En effet, les flux de sables sur un lit de graviers sont très dépendants des apports amont ; il est donc nécessaire non seulement de mesurer ces flux en continu mais aussi de mieux comprendre leurs sources.

La mesure acoustique a été également utilisée et appliquée en lien avec la thèse INRAE/EDF/CNR de Jessica Laible sur l'Isère. Des développements de post-traitement acoustique ont également été menés avec l'objectif d'établir des outils de traitement de données (codes Python dans la suite de la thèse d'Adrien Vergne avec le profileur hydroacoustique multifréquence *AQUAscat™*). Des progrès techniques ont amélioré les moyens de mesure comme l'intégration du profileur (*AQUAscat™*) sur drone aquatique

motorisé Pario/GPS qui doit permettre de nouvelles applications. Plusieurs campagnes de test ont été réalisées notamment pendant la chasse du Haut-Rhône (APAVÉR) en 2021 incluant des mesures contradictoires entre préleveurs (bouteille de Delft, pompage) et mesure hydro-acoustiques (avec le profileur hydroacoustique multifréquence UB-Sediflow d'Ubertone).

Le gros de l'effort sur cette action a porté sur la validation des méthodes (prélèvements, acoustique) pour *in fine* installer des stations hydro-acoustiques sur certains points d'intérêt du bassin. De telles stations hydro-acoustiques permettraient de suivre les flux en continu sur des points stratégiques du réseau hydrographique.

2. Méthodologies pour l'estimation des flux des flux de sable

Dans cette partie sont synthétisés les travaux méthodologiques réalisés sur le prélèvement et l'analyse des sables dans le cadre des différentes campagnes de mesure.

2.1. Quantification de la charge sableuse : prélèvements *in situ* et incertitudes

Dans cette partie sont présentées les méthodologies de prélèvement, d'analyse et d'évaluation des incertitudes de mesure. Cette partie contient des éléments de l'article Dramais *et al.* (2022) et du rapport de stage de master d'Alexis Pavaux (2022).

2.1.1. Choix des préleveurs

Pour estimer les concentrations puis les flux de sédiment en suspension dans les cours d'eau plusieurs solutions existent :

Les méthodes de mesures indirectes qui étudient par exemple le signal d'un capteur optique ou laser immergé (turbidimètre, LISST) ou acoustique par analyse de la rétrodiffusion (ABS, ADCP horizontaux) permettent d'estimer les concentrations ou flux de particules (Gray *et al.*, 2010). Des mesures optiques sans contact (satellite, drone) par analyse de réflectance sont aussi développées dans différentes équipes (Martinez *et al.*, 2009). Ces mesures nécessitent la plupart du temps d'être calibrées par des mesures par prélèvement *in situ*. Les post-traitements de données sont assez complexes et pas toujours généralisables. Ces méthodes ont des sensibilités différentes en fonction de l'étendue granulométrique des sédiments présents en suspension, ce qui pose un certain nombre de questions sur les données résultantes (Laible *et al.*, 2021).

La mesure de concentration en sédiments en suspension peut aussi être effectuée par l'analyse en laboratoire d'un prélèvement d'eau et de sédiment de la rivière. De nombreux préleveurs existent. On peut les classer en différentes familles même si certains préleveurs ont des caractéristiques de plusieurs d'entre elles.

- Les préleveurs ponctuels instantanés, de type trappe (Van Dorn, Niskin, Kemmerer), seau ou remplissage direct d'un flacon. Ils vont capturer un volume d'eau de la rivière de manière simple et quasi-instantanée.
- Les échantillonneurs par pompage, automatiques (ISCO, Sigma...) ou non (pompes péristaltiques, ou immergées (Figure 1d) qui permettent différentes combinaisons de prélèvements suivant des programmes d'échantillonnage définis. Ils font une intégration temporelle et éventuellement spatiale de la concentration.
- Les préleveurs intégratifs suspendus ponctuels ou sur la verticale qui sont exposés pendant des temps relativement courts (de l'ordre de la minute). Ils permettent des échantillons intégrés spatialement ou dans le temps. Pour la plupart, ils sont conçus pour prélever de manière isocinétique (Figure 1a et c).
- Les décanteurs (pièges à sédiment, bouteille de Delft (Figure 1b) sont exposés sur des temps plus longs (supérieurs à la minute et jusqu'à plusieurs jours/semaines). Ils permettent d'obtenir un échantillon intégré dans le temps.



Figure 1: Différents types de préleveurs testés lors de cette étude : (a) US-P6, (b) Bouteille de Delft, (c) préleveur intégratif Nilsson, (d) pompe de prélèvement immergée.

Le calcul de flux peut être effectué également de différentes façons selon les instruments utilisés. Les échantillons distribués dans la section (ponctuels ou intégrés sur la verticale, pondérés ou pas par la vitesse) sont utilisés pour déterminer une concentration moyenne dans la section ou par sous-section. Ces concentrations sont ensuite combinées au débit liquide déduit d'une courbe de tarage ou mesuré avec une méthode de jaugeage. Plusieurs méthodes de calcul existent (Gray & Landers, 2014 ; ISO 4363, 2002). Dans le cas particulier des décanteurs comme la bouteille de Delft, le flux total est obtenu par intégration dans la section des différents flux ponctuels.

2.1.1. Comparaison des préleveurs

Le FISP (Federal Inter-Agency Sedimentation Project) rassemble les agences gouvernementales et les acteurs de la mesure des sédiments dans les cours d'eau depuis 1939 aux États-Unis. Le FISP recensait, en 1940, 65 échantillonneurs pour le prélèvement d'eau et de sédiments en suspension (FISP, 1940). A l'heure actuelle, dans la spécification technique ISO 3716 (2006), on trouve encore une grande variété de préleveurs de par le monde.

En métrologie, pour estimer les incertitudes ou étalonner un instrument, on va essayer de comparer la mesure obtenue par celui-ci à une mesure de référence délivrée par un étalon raccordé aux étalons internationaux. Pour la mesure des concentrations *in situ* il n'existe pas encore d'étalon, on peut s'appuyer sur des travaux de comparaison entre instruments pour déterminer les incertitudes de mesure. Plusieurs évaluations ont été effectuées sur le terrain et en laboratoire. Ces essais sont indispensables pour garantir la fiabilité des données. De plus ils peuvent permettre de fournir une valeur consensuelle d'incertitude par comparaison avec des méthodes de mesures reconnues fiables par la communauté, même si elles ne sont pas raccordées à des étalons. Une étude bibliographique (Dramais, 2020) recense quelques-unes des comparaisons citées dans la littérature. Nous retiendrons par exemple une incertitude type de 15% pour les concentrations en sable mesurées avec le préleveur P-61 (Préleveur ponctuel isocinétique) (Topping *et al.*, 2011). Pour les bouteilles horizontales de type trappe (Niskin, Van Dorn, Kemmerer), si les valeurs de la littérature semblent plutôt favorables (10% pour Long (1989) et 4% pour Filizola et Guyot (2004), une valeur supérieure devrait être envisagée pour les concentrations en sable (Dramais *et al.* 2020b) de l'ordre de 15 %. Les limites des préleveurs de type bouteille horizontale sont connues depuis longtemps, il s'agit principalement du caractère instantané du prélèvement qui ne permet pas une moyenne temporelle des fluctuations naturelles de concentration mais aussi des phénomènes d'accumulation de particules dans le préleveur du fait de sa non-isocinéticité, ce phénomène a été observé en laboratoire (FISP, 1941).

2.1.2. Incertitudes de mesure liées aux préleveurs

Les valeurs d'incertitude de mesure que l'on trouve dans la littérature étant parfois assez peu démontrées/détaillées il nous a paru intéressant d'essayer d'appliquer la norme en vigueur pour ce type d'estimations, la norme ISO 4363 (2002).

La norme ISO 4363 (2002) décrit la procédure à utiliser pour la réalisation des jaugeages solides (sélection du site, des préleveurs, méthode de calcul) ainsi que celle à mettre en place pour déterminer les incertitudes de mesure des préleveurs de sédiments. Néanmoins, toutes les sources d'erreurs aléatoires (erreurs faisant qu'une mesure diffère légèrement de la suivante et qui sont dues à des changements imprévisibles au cours de la mesure) et systématiques (petits écarts obtenus en fonctionnement nominal des équipements que des observations répétées ne permettent pas d'identifier, ni de quantifier) responsables des incertitudes de mesures sont décrites ci-dessous :

- Erreurs aléatoires et systématiques dues au préleveur utilisé, $e_{r,c}$ et $e_{s,c}$: Ces erreurs se déterminent par la comparaison du préleveur étudié à un préleveur de référence, ici le préleveur US-P6. Les données utilisées seront des données répétées réalisées avec les deux préleveurs et dans des conditions similaires.
- Erreur aléatoire due aux fluctuations naturelles de la concentration en sédiments, $e_{r,e}$: les fluctuations de la concentration en sédiments dans les cours d'eau sont rapides et importantes. Ces fluctuations viennent alors impacter l'incertitude du résultat. Cette erreur se détermine par des mesures de concentration répétées au même endroit à peu de temps d'écart avec le préleveur étudié. Ce phénomène étant purement aléatoire, il n'y a pas d'erreur systématique associée.
- Erreurs aléatoires et systématiques dues au traitement de l'échantillon par filtration, $e_{r,s}$ et $e_{s,s}$: pour ces deux erreurs, les valeurs de la norme ont été utilisées. Ces

erreurs concernent la pesée, les pertes de sédiments lors de la filtration ou de la manipulation des filtres.

- Erreurs aléatoires et systématiques dues à la sélection d'un nombre fini de points explorés sur une verticale $e_{r,p}$, $e_{s,p}$ et d'un nombre fini de verticale dans la section $e_{r,n}$, $e_{s,n}$: pour ces deux types d'erreur, la norme n'a pas pu être appliquée car elle fait appel à une concentration « approximativement vraie » que nous ne connaissons pas pour notre étude. La méthode Q+ (Le Coz *et al.*, 2014) qui est habituellement utilisée pour les calculs d'incertitudes de vitesses et compatible avec la norme ISO 748 et le GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) a été utilisée basé sur une analogie entre les mesures de la concentration en sédiments et les mesures de vitesse.

La méthode et les différentes options de calcul ont été appliquées grâce à des codes écrits en Python durant les travaux de stage d'Alexis Pavaux (2022). Plusieurs campagnes de comparaison ont eu lieu et ont donné des résultats intéressants. En effet plusieurs préleveurs ont pu être comparés par mesures successives sur les points de mesure comme illustré Figure 2.

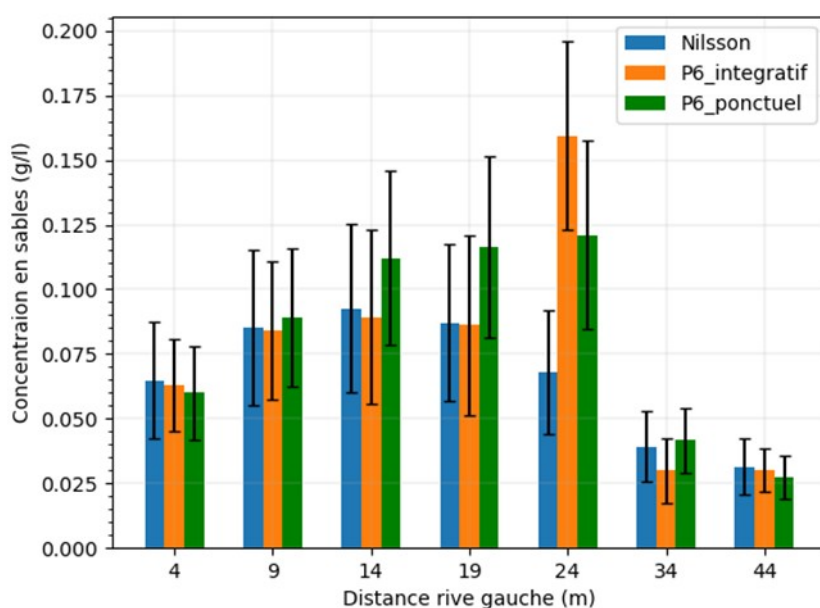


Figure 2: Résultats de comparaison de concentrations issues des préleveurs isocinétiques sur des verticales successives (préleveurs Nilsson et US-P6, juin 2022).

A partir de ces campagnes d'essais les incertitudes de mesure ont été évaluées en suivant le référentiel de la norme ISO 4363 (2002). La Figure 3 met en évidence l'impact important des fluctuations naturelles de la concentration en sédiments.

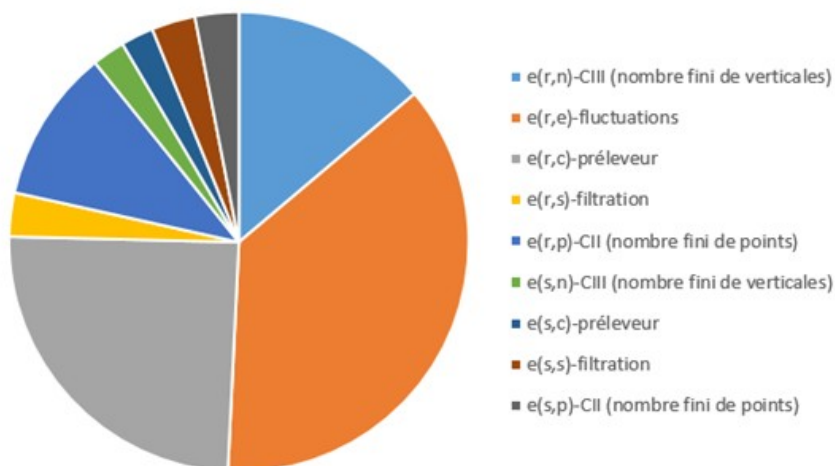


Figure 3: Identification des sources d'erreur et quantification des incertitudes pour un jaugeage solide sur l'Isère à Grenoble Campus.

La quantification des incertitudes pour les jaugeages solides réalisés en juin 2022 a donné 30% pour ceux réalisés avec le préleveur US-P6 et 35% avec le déploiement du Nilsson, (incertitudes élargies à 95%, $k=2$).

Plusieurs limites de la norme ont été identifiées pour la quantification des incertitudes et des perspectives pour améliorer cette approche par propagation ont été proposées et sont en cours de test.

2.2. Méthode de mesure du flux de sable combinant prélèvements et jaugeages ADCP

Une méthode de calcul des jaugeages solides de sable en suspension est utilisée à partir d'une exploration de la section par ADCP et prélèvement (Dramais *et al.* 2021).

La zone proche du fond est particulièrement active pour ce qui est de la suspension graduée de sable et la prise en compte d'une concentration dans cette zone est importante pour une bonne estimation du flux de sable. Ainsi, pour réduire les incertitudes sur le flux, la méthode de jaugeage solide du sable en suspension nécessite d'explorer une section de cours d'eau et de déterminer le débit liquide et la concentration en sable. Nous proposons pour cela l'utilisation d'un ADCP et d'un préleveur instantané horizontal. Un protocole d'analyse des échantillons en laboratoire adapté au sable est ensuite nécessaire pour une estimation fiable des concentrations (Dramais *et al.* 2018).

La méthode de calcul du jaugeage solide est basée sur l'utilisation des données haute résolution de vitesse et de bathymétrie mesurées par ADCP et des concentrations mesurées à différentes profondeurs sur plusieurs verticales. La combinaison de ces mesures permet d'affecter spatialement une concentration à chaque cellule de l'ADCP et d'estimer ainsi la répartition du flux de façon plus réaliste dans la section (Figure 4). Des profils théoriques de concentration sont ajustés sur les mesures afin de déterminer la concentration dans la partie non-mesurée au fond. Les paramètres des profils sont interpolés latéralement en fonction des contraintes hydrauliques locales, supposées en première approximation proportionnelles à la hauteur d'eau. Pour calculer ensuite des bilans de flux de sable à

l'échelle d'un événement, une courbe de tarage sédimentaire basée sur la capacité de transport est utilisée.

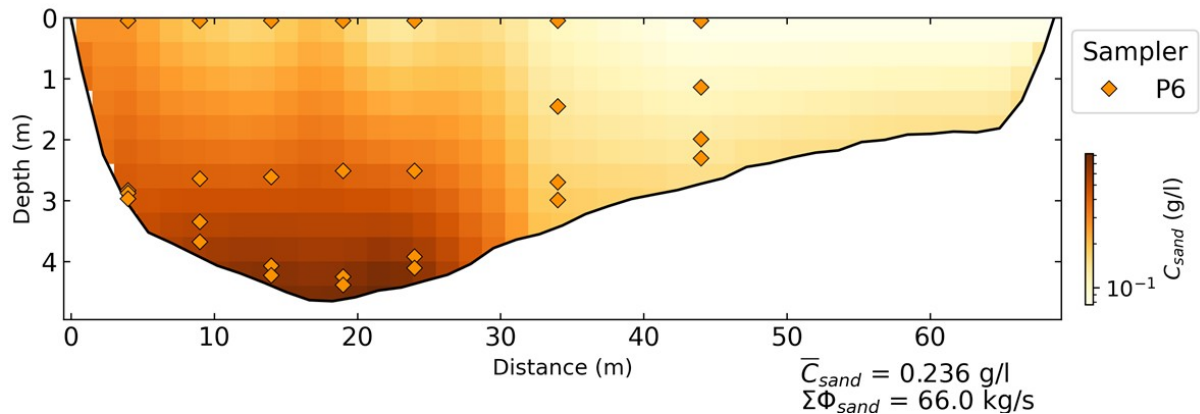


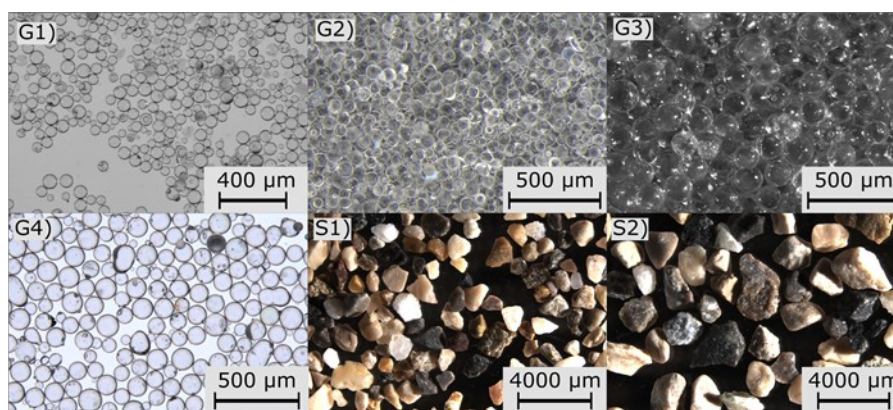
Figure 4: Représentation de la répartition des concentrations en sable dans une section de l'Isère issue de la méthode combinant prélèvements et mesures ADCP.

Les méthodes de calcul des jaugeages solides, combinant les mesures ADCP et des prélèvements grâce aux différentes techniques ont été implémentés dans un code Python basé sur le logiciel open-source QrevInt par Jessica Laible en 2022 avec l'aide de Baise Calmel et des stages de Thibault Vassor et Alexis Pavaux. Elles font l'objet d'un article de journal en préparation pour *Environmental Fluid Mechanics*.

2.3. Intercomparaison de mesures de la distribution granulométrique des particules

La distribution des classes de taille de particules dans l'écoulement est un paramètre crucial pour la compréhension des mécanismes de transfert des MES dans les cours d'eau. Une étude a été menée et un article a été publié (Laible *et al.*, 2023) sur la comparaison des différents granulomètres laser utilisés par les différents partenaires du projet. Ces granulomètres sont utilisés pour mesurer la distribution des tailles de particules des MES prélevés par les différents moyens d'échantillonnage présentés (cf. ci-dessus). Une série d'échantillons naturels et synthétiques ont été préparés et analysés dans différents laboratoires. Il ressort de cette étude un certain nombre de résultats très intéressants.

Quatre appareils ont été évalués : Le Cilas (INRAE LAMA), le Malvern Mastersizer 3000 (ENTPE), LISST 200X (CNR) et Fritsch Analysette (prestataire EDF-DTG). Douze échantillons de différentes tailles de grains et de pourcentages de mélange constitués de billes de verre et de sable naturel ont été utilisés (Figure 5).



Sample	Material	Fine mode		Coarse mode	
		Range (μm)	%	Range (μm)	%
G1	G	10 - 45	100		
G2	G	45 - 90	100		
G3	G	75 - 150	100		
G4	G	200 - 450	100		
S1	S	500 - 1000	100		
S2	S	1000 - 2000	100		
95G1_5G4	G	10 - 45	95	200 - 450	5
80G1_20G4	G	10 - 45	80	200 - 450	20
60G1_40G4	G	10 - 45	60	200 - 450	40
20G1_80G4	G	10 - 45	20	200 - 450	80
80G3_20S1	G & S	75 - 150	80	500 - 1000	20
80G3_20S2	G & S	75 - 150	80	1000 - 2000	20

Figure 5 : Échantillons analysés dans l'intercomparaison.

Les conclusions principales de l'article sont que la qualité de la mesure peut être dégradée lorsque les échantillons comportent un mélange de sédiments fins et de sables. En effet (pour les granulomètres testés dans cette étude), les résultats obtenus montrent que les mesures issues de mélanges inhomogènes de particules ne sont pas représentatifs de la distribution réelle de l'échantillon. L'opération de mélange n'est pas optimale malgré l'utilisation d'ultrasons et un potentiel masquage de la classe grossière par la suspension de fines peut apparaître. Certains paramètres de la mesure sont aussi très impactants sur l'analyse granulométrique des échantillons bimodaux comme la vitesse d'agitation de l'échantillon en particulier.

Les perspectives à ce travail sont, entre autres, de préparer/tester des échantillons de référence bimodaux contenant des sables. Il faudrait aussi s'intéresser de plus près à l'influence de la forme des particules, du modèle optique et de la diffusion multiple.

3. Synthèse des campagnes de mesure réalisées lors de l'OSR6

Dans cette partie sont synthétisés les travaux méthodologiques réalisés sur le prélèvement et l'analyse des sables dans le cadre des différentes campagnes de mesure.

3.1. Le Rhône à Lyon-Perrache

La station hydrométrique du Rhône à Lyon Perrache est en amont de la confluence avec la Saône et recueille les écoulements d'un bassin versant de 20 300 km².

Dans la continuité des travaux de thèse de Dramais (2020), plusieurs jaugeages solides ont été réalisés et sont présentés Tableau 1 pour des débits relativement modestes en 2022.

Tableau 1: Jaugeages solides de sable effectués sur le Rhône à Lyon (Perrache)

Date	Débit liquide [m ³ /s]	Débit solide [kg/s]	Préleveur
13/12/2017	1480	33	Niskin
05/01/2018	20190	278	Niskin
05/01/2018	2220	222	Niskin
22/01/2018	2000	102	Niskin
23/01/2018	2650	464	Niskin
24/01/2018	2740	347	Niskin
25/01/2018	2150	85	Niskin
12/06/2019	860	3	Niskin
06/03/2020	1780	105	Niskin
16/07/2021	2140	220	Niskin
14/06/2022	280	7,3	Nilsson
10/11/2022	945	11	Niskin

Aussi, l'embarcation de mesure « Salmo » de INRAE a été améliorée avec une potence et un treuil pour des déploiements avec des préleveurs variés (Figure 6).



Figure 6: Déploiement du préleveur US-P6 depuis le treuil de l'embarcation Salmo d'INRAE.

Enfin, ces jaugeages solides ont permis de compléter la courbe de tarage de sable présentée Figure 7. L'effort de mesure devra se poursuivre avant d'exploiter cette courbe de tarage pour faire des bilans de long terme. Notamment il faudrait compléter les suivis par des campagnes de mesure lors de crues du Haut Rhône, plutôt que de l'Ain (majoritaires pour l'instant dans le jeu de données). L'étude de ces crues pourrait permettre de voir si la capacité de transport peut être aussi atteinte lors d'événements avec des apports amont différents.

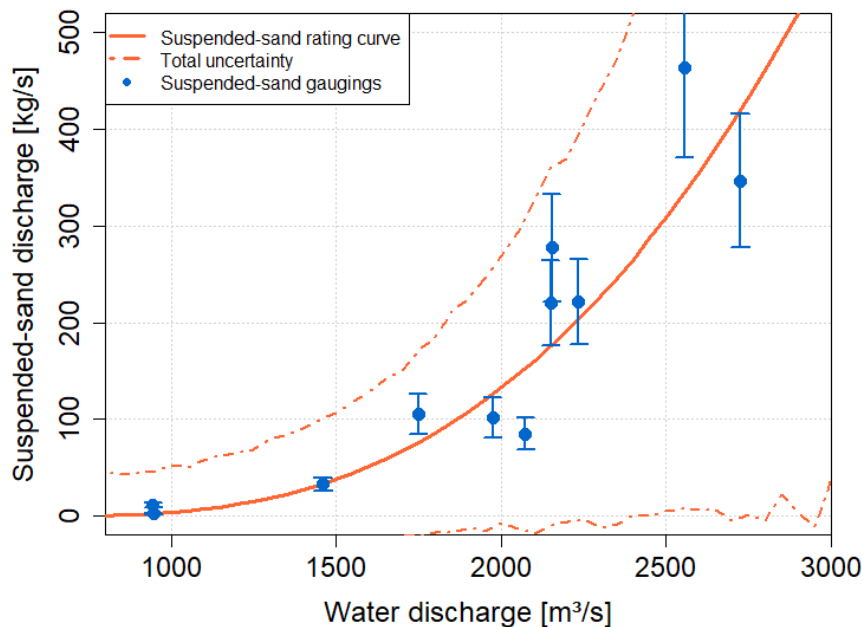


Figure 7: Courbe de tarage de sable en suspension sur le Rhône à Lyon (Perrache).

3.2.

3.3. La chasse de la Basse-Isère de 2021

De nombreuses mesures ont pu être réalisées lors de la chasse des barrages de la Basse-Isère en collaboration entre INRAE, CNR et EDF. Plus de détails sur les résultats peuvent être trouvés dans le rapport de synthèse (Camenen *et al.*, 2022) ; ils font aussi l'objet d'un article en préparation pour *Environmental Fluid Mechanics*. Les principales conclusions sont :

- Les mesures par pompage au niveau du barrage de Beaumont-Monteux se sont avérées extrêmement intéressantes car elles permettent de manière relativement aisée d'avoir une vision temporelle des apports en sable. Il faudra cependant s'assurer de la bonne homogénéité sur la section ;
- Les mesures de flux de sable par exploration d'une section de rivière restent complexes et incertaines. Mais l'utilisation de préleveurs isocinétiques est possible sur les trilles hydrométriques. Ces mesures peuvent permettre de caler la méthode de concentration témoin (Santini *et al.*, 2019) ;
- Une corrélation très intéressante est apparue entre la concentration en sable mesurée en berge avec le préleveur ISCO et la concentration moyenne sur la section issue de l'exploration spatiale. L'application de la méthode de concentration témoin (reliant la concentration d'une mesure locale à la valeur moyenne sur la section), si elle est généralisable, pourrait permettre l'utilisation d'un préleveur, voire d'un turbidimètre (calé sur les concentrations totales et concentrations en fines) positionnés en berge pour l'évaluation des flux de sable ;
- Nous avons pu montrer que les flux évacués par les barrages de la Basse-Isère lors de cette chasse sont d'environ 3 millions de tonnes dont près de 50% de sable.

3.4. Le Rhône à Pyrimont lors de l'APAVER 2021

3.4.1. Présentation de la campagne de mesure de mai 2021

Les opérations APAVER, réalisées tous les 3 à 4 ans, avec un abaissement partiel de la retenue de Génissiat, entraînent un accroissement du flux de sédiments sur l'ensemble du linéaire du Rhône et nécessitent de la part de CNR un accompagnement et un suivi sur ses ouvrages entre la frontière suisse et Lyon, l'objectif étant de garantir la sûreté hydraulique, la qualité de l'eau et plus largement de limiter les impacts environnementaux. La campagne de mesure présentée dans le rapport spécifique (Dramais *et al.* 2022b) et réalisée en mai 2021 avait pour objectif de mesurer en détail les profils verticaux de matières en suspension (MES) et de sable sur une verticale au pont de Pyrimont (Figure 8) pour constituer un jeu de données de référence pour la modélisation et l'inversion acoustique. Des prélèvements ont été effectués pour évaluer les flux de sable en suspension à l'aide d'une bouteille de Delft (Figure 1b). Les flux charriés ont été mesurés par prélèvements Helley-Smith (Figure 8). Cette campagne de mesure a apporté des éléments intéressants sur le suivi du sable mis en suspension par les manœuvres du barrage de Génissiat lors des opérations APAVER.



Figure 8: Dispositif de déploiement par treuil sur la verticale centrale du pont de Pyrimont.

Des détails sur le protocole de mesure, le détail des analyses et des post-traitements sont disponibles dans le rapport de Dramais et al. (2022b).

3.4.1. Principaux résultats et conclusions

Les masses sèches des échantillons prélevés au pont de Pyrimont ont été mesurées au laboratoire HHlab d'INRAE à Villeurbanne, après passage à l'étuve (83 échantillons ont été analysés). Les distributions granulométriques d'une partie des échantillons ont été mesurées sur le granulomètre Malvern Mastersizer 3000 de l'ENTPE à Vaulx en Velin. Sur 38 mesures de la distribution granulométrique effectuées sur les échantillons de la bouteille de Delft, le diamètre médian d_{50} se situe autour de 113 μm sans évolution marquée pendant les jours du suivi. Un exemple d'échantillon de sable est illustré Figure 9. Les flux de sable en suspension et charriés ont été évalué sur la verticale et sur la section en faisant des hypothèses sur la largeur de la bande active (Dramais *et al.* 2022b).



Figure 9: Echantillon de sable en suspension prélevé en sub-surface avec la bouteille de Delft le 26 mai 2021.

Plusieurs points ont été très positifs durant cette campagne de mesure :

- La potence de déploiement des préleveurs développée par le Cacoh s'est avérée un outil très utile. Ce dispositif permet des mesures intéressantes pour le suivi de la verticale centrale à Pyrimont où le flux est probablement plus homogène qu'à Bognes, mais ne permet pas facilement à court terme d'estimer un flux total sur la section. Pour cela, il serait nécessaire d'estimer une relation entre le flux sur la verticale et des jaugeages solides complets à Pyrimont, éventuellement par des traversées avec un capteur acoustique. Le dispositif de déploiement pourrait être amélioré avec l'utilisation d'un câble électroporteur permettant d'utiliser d'autres instruments et un compteur permettant de déterminer la profondeur d'immersion en direct (une sonde de pression restant toujours nécessaire pour mesurer *a posteriori* la profondeur vraie).
- Au niveau temporel le suivi de la verticale est très utile ; il permet de mettre en évidence l'arrivée de sable en suspension lors des manœuvres de la vanne de fond. Ce suivi aurait été d'autant plus intéressant si toutes les journées de l'opération APAVER avaient été suivies.
- Sur la verticale, les résultats obtenus avec la bouteille de Delft semblent cohérents et l'information de vitesse ADCP permet de recalculer des concentrations en sable. Ces résultats et le calage de profils verticaux de concentration et de flux seront d'une grande utilité pour la calibration/validation des mesures obtenues avec les technologies acoustiques (UBSediflow).
- Des mesures complémentaires avec d'autres préleveurs pourraient être envisagées lors des prochaines opérations d'APAVER, en vue de la validation de la bouteille de Delft pour estimer les flux de sable.

3.5. L'Isère à Grenoble-campus

3.5.1. Site de mesure

La station hydrométrique de Grenoble Campus (W1410010) fait partie du site atelier Arc-Isère de la Zone Atelier Bassin Rhône. La station est cogérée par l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) et EDF. Le site a pour objectif l'étude des débits et des flux sédimentaires de l'Isère. L'Isère a un régime hydrologique nivo-pluvial avec un transport sédimentaire élevé durant les hautes eaux en particulier en période de fonte. L'Isère, affluent de rive gauche du Rhône a un débit annuel moyen à l'exutoire de 333 m³/s. Cette station est munie d'une traille permettant de déployer les préleveurs de sédiments à différentes verticales et profondeurs de la section. Lors des jaugeages solides la section est découpée en 7 verticales dont les positions ont été définies en utilisant la méthode EWI (Equal Width Increment) de la norme ISO 4363 (2002).

L'effort de mesure à la station de Grenoble campus est partagé entre INRAE et EDF-DTG avec l'appui de la CNR.

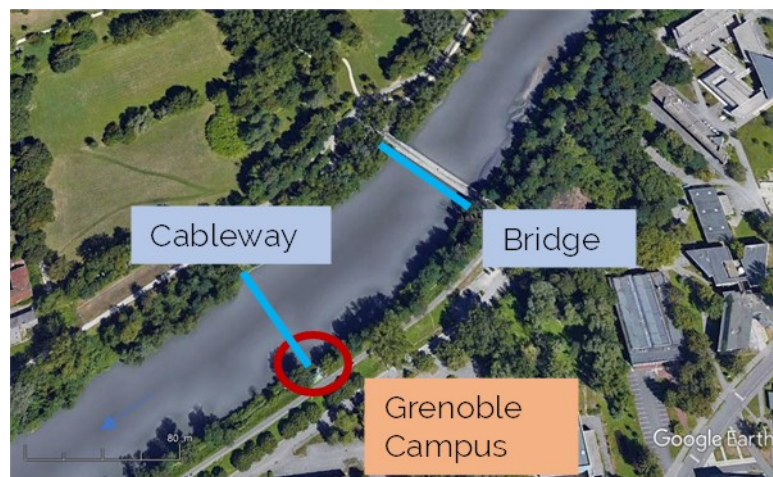


Figure 10: Vue du tronçon de l'Isère à Grenoble Campus (Laible, 2022).

3.5.1. Jaugeages solides réalisés

Des jaugeages solides ont été réalisés depuis la traille de mesure et la passerelle située en amont. Plusieurs types de jaugeages sont réalisés, depuis la traille avec des préleveurs isocinétiques US-P72 et US-P6 et depuis la passerelle des jaugeages avec une bouteille de Delft et une pompe immergée. Ces différentes techniques de jaugeage solide ont été comparées à plusieurs reprises dans différentes situations hydrologiques.

- Les jaugeages depuis la traille sont effectués soit depuis la cabine de pilotage en rive gauche (3h par jaugeage) soit combinés avec une équipe de mariners (Figure 11) qui récupère chaque échantillon en barque pour optimiser la durée des jaugeages solides (1h30).



• **Figure 11: Prélèvements combinés traîle - barque permettant d'optimiser la durée des jaugages solides.**

- Les jaugages solides à la passerelle sont effectués grâce aux moyens techniques de Ideaux ou Fargier (Camion grue) mobilisés par EDF-DTG et permettant le déploiement de la bouteille de Delft avec sa structure (Figure 12) et différents autres instruments. Des jaugages par prélèvement à la pompe immergée sont effectués simultanément aux jaugages à la bouteille de Delft.



Figure 12: Bouteille de Delft - Mini pompe immergée et Moulinet Ott déployés depuis la passerelle à Grenoble Campus.

- Des jaugages liquides sont aussi effectués grâce au déploiement de drones aquatiques motorisés (Figure 13) munis d'ADCP et reliés sans fil à des pilotes en berge.



Figure 13: Drone aquatique motorisé pour les jaugeages liquides par ADCP.

3.5.2. Courbe de tarage

Les résultats de ces jaugeages solides sont illustrés Figure 14 ils ont été réalisés durant 9 campagnes de mesure. Ces jaugeages solides permettront d'affiner le post-traitement des données de la station acoustique mise en place en rive gauche dans le cadre des travaux de thèse de Jessica Laible. Même si sur ce site, du fait des spécificités du bassin versant, les flux de sables sont a priori très sensibles aux apports (crues d'automne, crue de fonte accompagnés parfois de laves torrentielles sur certains affluents, opérations de chasses sur les ouvrages hydro-électrique du bassin...) il apparaît qu'une simple courbe de tarage pourrait être proposée :

$$Q_{ss} = a(Q - Q_{cr})^b \quad \text{Eq. 1}$$

avec $a=0,0018$, $b=2$ et $Q_{cr}=115 \text{ m}^3/\text{s}$.

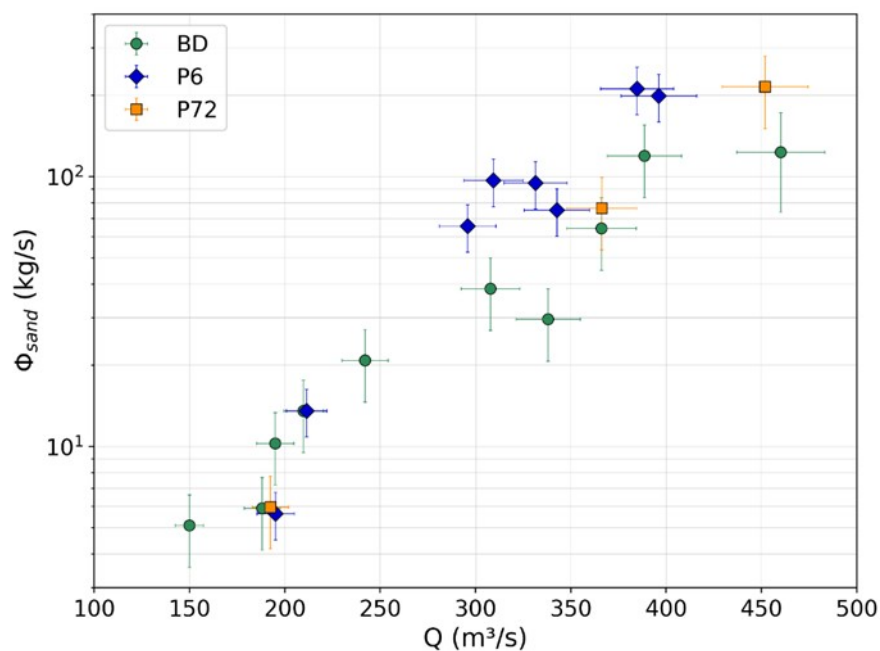


Figure 14: Jaugeages solides de sable ont été effectués sur l'Isère à Grenoble campus depuis le début du projet en 2021.

4. Évaluation des stocks de sable dans le Rhône en amont de Lyon

Ce travail est en grande partie tiré du stage de Floriane Masquelier, qui a ensuite fait l'objet d'une présentation pour la conférence Gravel-Bed Rivers à Villareca, Chili (Camenen *et al.*, 2023).

4.1. Contexte de l'étude

L'estimation du transport de sable dans les rivières à lit de gravier est une tâche complexe car la charge de fond ou la charge en suspension peut prévaloir en fonction des conditions hydrodynamiques et parce que le transport de sable est très souvent inférieur à la capacité de transport pour les sables du fait des apports en sable variables et potentiellement insuffisants. Comme discuté dans la première partie de ce rapport, l'échantillonnage de la charge en suspension pose de nombreuses difficultés techniques en raison des forts gradients verticaux et latéraux. Un tel échantillonnage direct, bien que nécessaire, a un coût prohibitif et ne peut permettre une fréquence de mesure élevée.

Une courbe de tarage sédimentaire peut être applicable si le système n'est pas limité en termes d'apport amont. Dramais (2020) a mesuré la charge en suspension dans le Rhône à Lyon-Perrache pendant la crue de janvier 2018. Ces mesures ont pu montrer qu'une capacité de transport serait atteinte pour les débits de crue. Il a proposé un modèle de courbe de tarage sédimentaire basé sur l'inférence bayésienne pour évaluer en continu la charge en suspension dans le Rhône (Figure 7), qui a permis d'estimer le flux solide à Lyon-Perrache en continu (Figure 15). Au final, il a obtenu un flux de sable total de 175 000 tonnes lors de cet événement. L'objet de cette étude est de comprendre où se trouvent les stocks de sédiments fins pour alimenter ce système.

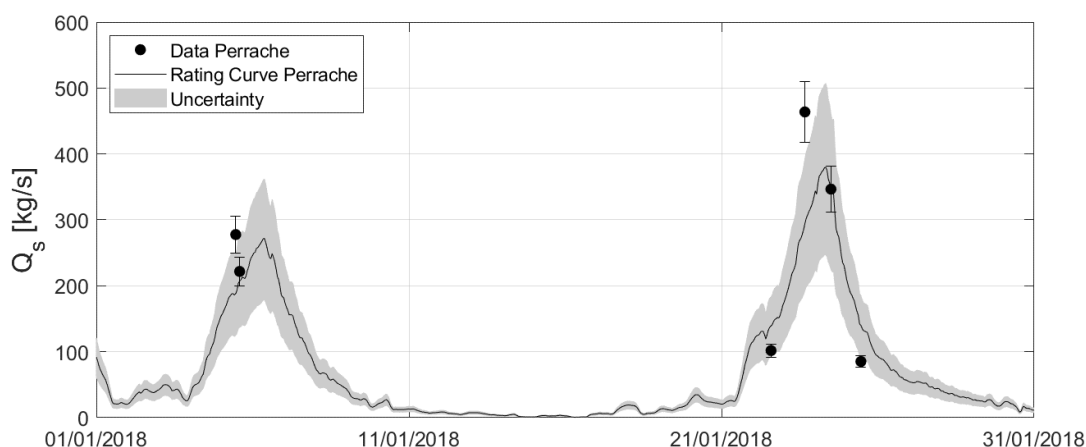


Figure 15: Estimation des flux de sable pendant la crue de janvier 2018 avec incertitudes (d'après Dramais, 2020)

4.2. Site d'étude

Le site d'étude se trouve autour du fleuve Rhône en amont de Lyon. En première approche, nous avons considéré que les stocks permettant d'approvisionner le Rhône à

Perrache en sédiments sableux provenaient principalement des formes sédimentaires observées dans le canal de Miribel et dans le Rhône jusqu'à la confluence avec l'Ain. Même si cette partie du Rhône est une des dernières zones dynamiques du Rhône en terme de charriage, elle n'en demeure pas moins très aménagée. Une centrale hydroélectrique est située sur le canal de Jonage (débit maximal de 640 m³/s) et un débit minimum (90 m³/s) est fixé pour le canal de Miribel. En cas de crue, toute l'eau qui ne peut être turbinée est dirigée vers le canal de Miribel. Un certain nombre de sites ont été sélectionnés car susceptibles de remobiliser les sables stockés dans le tronçon, soit au niveau des bancs en aval du seuil de Villeurbanne, dans le canal de Miribel, puis sur les bancs de l'Ain à la confluence avec le Rhône. Du fait des barrages et d'une absence de forts débits, le canal de Jonage a été exclu de l'étude, ainsi que le Vieux-Rhône aval car l'écoulement y est fortement contraint par les niveaux dans le canal de Jonage.

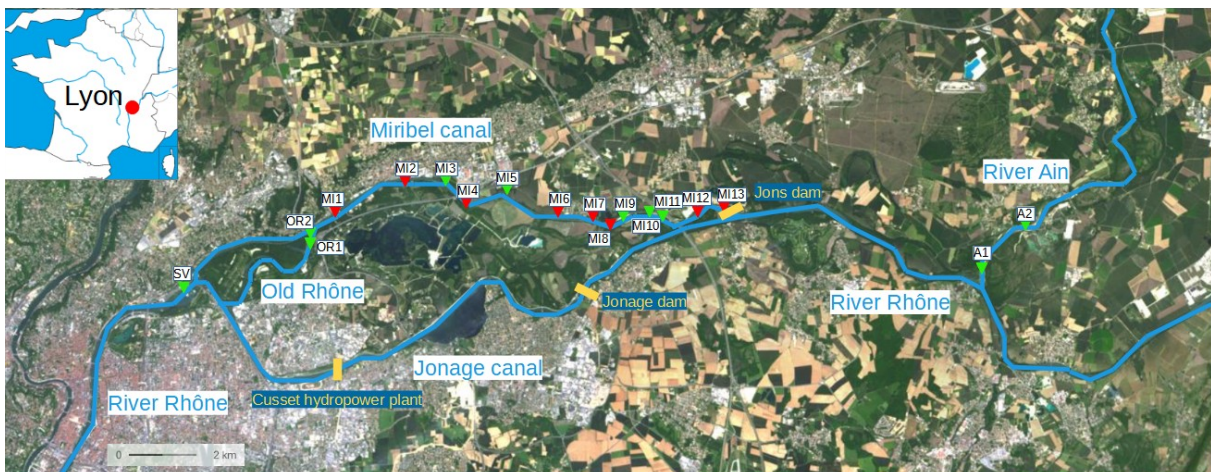


Figure 16: Localisation du site d'étude et des différentes formes sédimentaires existantes (triangles) incluant celles qui ont été étudiées (triangles verts).

4.3. Méthodologie pour l'évaluation des stocks de fines

4.3.1. Mesure des stocks locaux

Les stocks locaux sur les différentes formes sédimentaires ont été évalués sur la base de placettes effectuées selon les méthodes de Deng *et al.* (2023) pour les zones émergées et McNeil & Ahnell (1964) pour les zones immergées. Ces deux méthodes consistent à échantillonner la matrice graveleuse en surface et subsurface, puis d'établir la courbe granulométrique des échantillons collectés, en se focalisant tout particulièrement sur les fractions fines (cf. Figure 17). Ainsi le tamisage se fait sur le terrain pour des contraintes d'efficacité avec les diamètre de tamis de 10 mm, 2 mm, 500 μm et 100 μm. Ce tamisage est réalisé au dessus d'une bassine avec un volume V d'eau de rinçage rajouté (issue de la rivière). La concentration C en fines ($d < 100 \mu m$) du mélange obtenu dans la bassine (passant) et donc la masse $M_f = C V$ de fines sont ainsi mesurés. Au final il est possible d'exprimer le stock de sable en surface par unité de surface [kg/m²] :

$$S_s = \frac{M_{s[0,1-2]mm}}{A_p} \quad \text{Eq. 2}$$

avec A_p la surface de la placette et $M_{s,[0,1-2]mm}$ la masse totale de sable en surface. De la même manière, le stock de sable en subsurface peut s'exprimer :

$$S_b = \frac{M_{b,[0,1-2]mm}}{A_p H_b} \quad \text{Eq. 3}$$

avec H_b la hauteur d'échantillonnage de subsurface (Figure 17) et $M_{b,[0,1-2]mm}$ la masse totale de sable en subsurface.



Figure 17: Méthodologie de mesure des stocks de fines par placette hors-eau (a ; Deng et al., 2023) ou placette en eau (b ; McNeil & Ahnell, 1964), et méthode de tamisage *in situ* (c)

Au total, 120 échantillons ont été prélevés lors de 12 campagnes de terrain sur 10 sites (deux sur l'Ain, cinq sur Miribel, 2 sur le Vieux-Rhône, un en aval du seuil de Villeurbanne). La majorité de ces échantillons ont été réalisés sur des placettes émergées selon la méthode de Deng et al. (2022). Quelques échantillons ont été aussi réalisés sur des placettes immergées avec le préleveur McNeil à titre de comparaison principalement. Masquelier a ainsi observé une relative homogénéité des échantillons sur les différents sites étudiés permettant d'en utiliser la valeur moyenne pour les extrapolations et estimations des stocks.

4.3.2. Évaluation des stocks remobilisés

Une évaluation des surfaces pour chaque zone homogène (tête de banc, queue de banc, zone secondaire, etc.) a été réalisée sous SIG (Masquelier, 2022) ; sur chacune de ces

zones ont été affectées des valeurs de stocks issus des mesures *in situ* les plus représentatives. Le modèle 1D du Rhône a ensuite été utilisé pour estimer la contrainte de cisaillement moyenne sur le lit au pic de la crue de janvier 2018. La profondeur d'érosion peut alors être évaluée comme (Pugh & Wilson, 1999) :

$$\delta = 10 d_{90} \theta \quad \text{Eq. 4}$$

où d_{90} est le diamètre du lit correspondant à 90 % de passant en masse et θ le paramètre de Shields calculé sur la base du diamètre médian d_{50} pour le pic de crue. Au final, en faisant l'hypothèse que sur une zone homogène du point de vue stock, la contrainte y est uniforme, la masse totale de sable potentiellement remis en suspension suite à la crue de janvier 2018 peut être calculée selon l'équation suivante :

$$M_s = \sum_i (S_{s,i} A_i + S_{b,i} A_i \delta_i) \quad \text{Eq. 5}$$

avec A_i la surface de la zone homogène i .

4.4. Résultats sur les mesures locales

La Figure 18 présente les principaux résultats sur les pourcentages de fines (<100 μm , [100-500] μm et [0.5-2] mm) en masse dans la matrice.

Sur la bases des mesures en émergés, on remarque pour tous le sites, que la quantité de particules inférieures à 100 μm est faible. Les valeurs ne dépassent pas les 3 % de la masse totale. Les quantités de sable peuvent être beaucoup plus importantes en particulier sur l'Ain où elles atteignent en moyenne 18 % de la masse totale en surface et 5 % en subsurface. Si dans le Vieux-Rhône, les valeurs de surface approchent 10 %, elles sont plus faibles sur Miribel et au seuil de Villeurbanne (2-3 % en surface). Par contre, on retrouve plus d'homogénéité en sub-surface avec des valeurs autour de 10 %. De façon étonnante, la classe [0.5-2] mm domine sur Miribel alors que c'est la classe [100-500] μm qui domine sur les autres sites. Des résultats similaires mais souvent plus faibles ont été obtenus avec le préleveur McNeil ; il semblerait en effet que des pertes de fines soient possibles lors de son enfouissement (en zone immergées). Si la mesure avec le préleveur McNeil est réalisée sur une zone émergée, nous avons observé des résultats très similaires à ceux issus de la méthode Deng, et donc une bonne cohérence entre les deux méthodes.

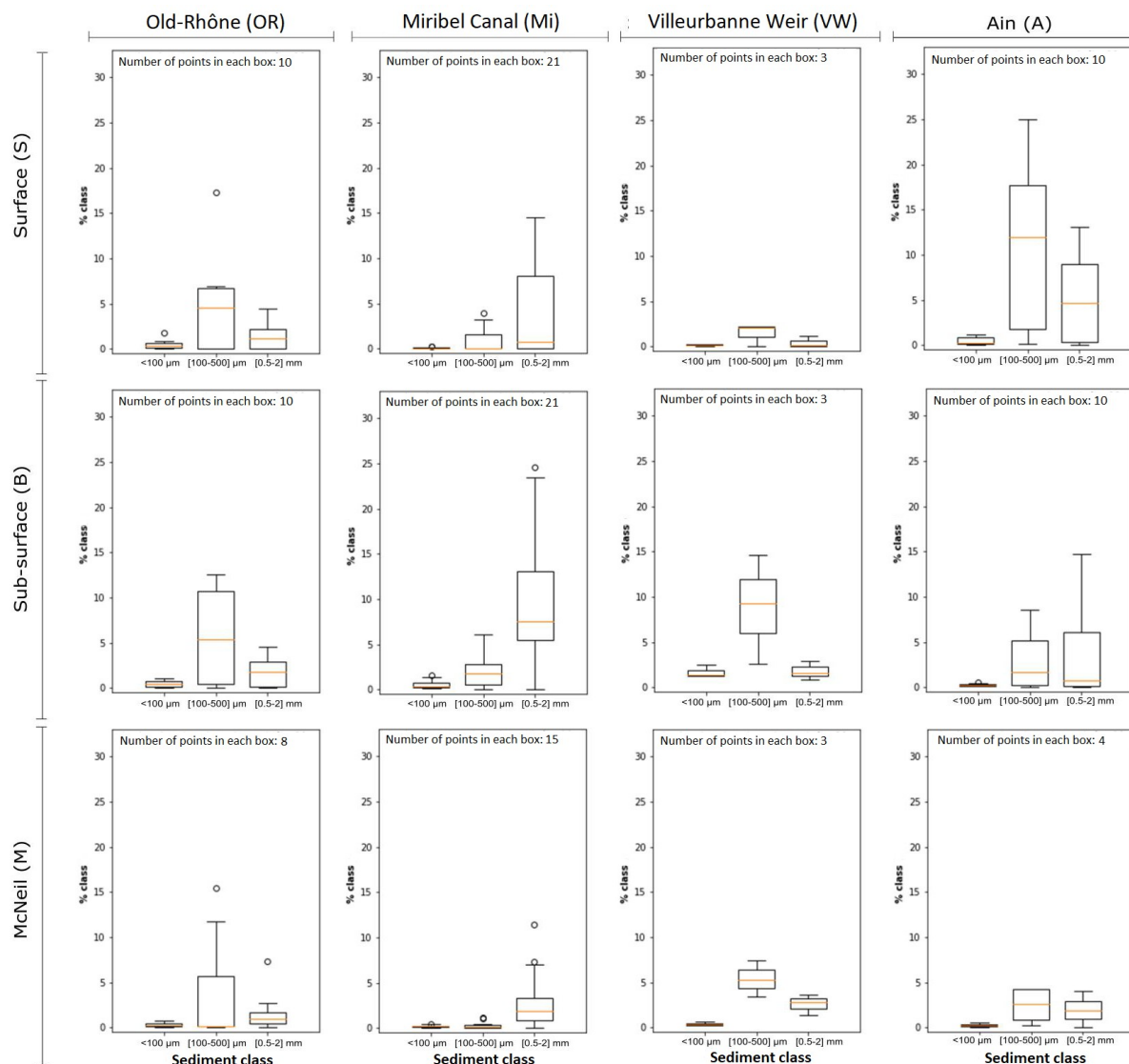


Figure 18: Répartition des pourcentages des classes granulométriques inférieures à 2mm pour les échantillons prélevés dans quatre secteurs : Vieux-Rhône, Canal de Miribel, Seuil de Villeurbanne, Confluence Ain-Rhône. Les échantillons sont séparés selon le secteur ainsi que selon le type, à savoir, échantillon de surface ou de sub-surface prélevé selon la méthode des « placettes », échantillon total prélevé selon la méthode « McNeil », ou dépôt prélevé en surface.

Les stocks locaux, ou ponctuels, de l'ensemble des échantillons représentés en Figure 19 sous la forme de diagrammes à moustache, en distinguant surface (stocks surfaciques en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$), sub-surface et « McNeil » (stocks volumiques en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Les valeurs médianes indiquent que les stocks de sable en surface sur l'Ain sont plus importants que dans les deux autres secteurs, avec des valeurs de l'ordre de $5\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ pour le banc de l'Ain, $1\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ pour les bancs du canal de Miribel et seuil de Villeurbanne et $4\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ pour les bancs du Vieux-Rhône. A l'inverse, les stocks de sub-surface sont plus faibles sur l'Ain avec une valeur médiane de près de $20\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ contre $175\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour les bancs du canal de Miribel et seuil de Villeurbanne et $80\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour les bancs du Vieux Rhône. Les stocks sont néanmoins très variables à l'échelle des trois grands secteurs. En effet, certains stocks ponctuels sont particulièrement élevés, jusqu'à près de $850\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour l'un des échantillons de sub-surface.

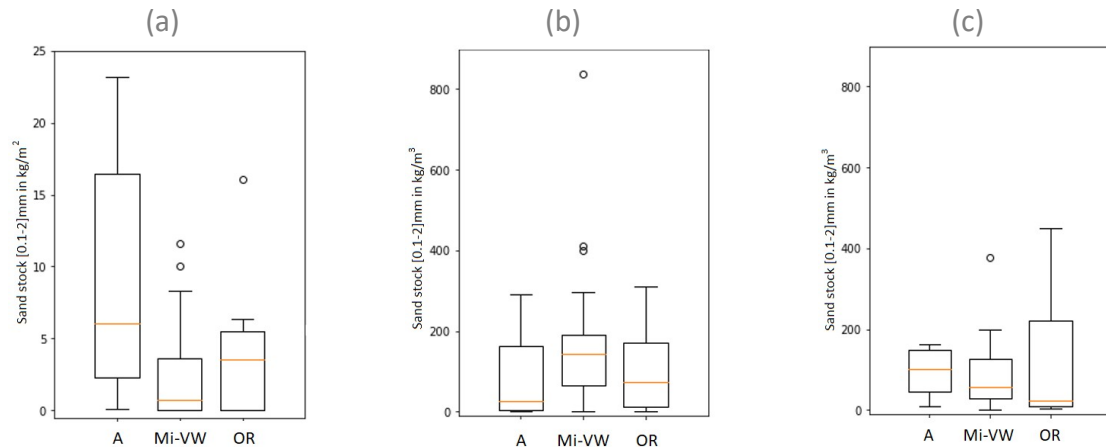


Figure 19: Stocks ponctuels de sables en surface (a), sub-surface (b) et dans le chenal en eau (c, « McNeil »). Les abréviations A, Mi-SV et VR correspondent respectivement aux trois grands secteurs d'études : « Ain », « Canal de Miribel et seuil de Villeurbanne » et « Vieux Rhône ».

4.5. Estimation des stocks de sable remis en suspension lors de la crue de janvier 2018

Nous avons appliqué l'Eq. 5 sur l'ensemble des trois secteurs étudiés. Le stock total, par cumul des stocks de chaque zone, est estimé à 1 900 tonnes. On compte 1 300 tonnes en provenance des bancs localisés à la confluence Ain-Rhône et 600 tonnes sur le canal de Miribel et seuil de Villeurbanne. Aussi, 1 600 tonnes des sables mobilisés correspondraient à la remise en suspension de la couche de surface ; les 300 tonnes restantes viendraient de la sub-surface.

Les stocks totaux sont distingués selon leur granulométrie. Globalement, la fraction des sables fins - ceux dont le diamètre est compris entre 100 et 500 μm – correspond à 3/5ème des sables mobilisés ; les 2/5ème restant sont des sables grossiers ([0.5 - 2 mm]).

Pour comparaison, près de 175 000 tonnes de sable ont été mobilisées pour l'événement hydrologique de janvier 2018. Notre estimation de la resuspension de sable par les crues ne représente donc que 1 % du flux total. Bien sûr, nous avons négligé les stocks remobilisés dans le chenal principal et l'érosion verticale estimée à l'aide du modèle numérique 1D est sans doute sous-estimée. Il a toutefois été observé sur les photos aériennes que cet événement a créé une forte avulsion du chenal sur l'Ain qui a donc mobilisé des volumes beaucoup plus importants de sable. Il semblerait donc que l'Ain soit une importante source de sable au Rhône, qui mériterait d'être mieux évaluée. Une première estimation grossière de ces volumes pourra être faite via une analyse de photos aériennes avant et après événement.

4.6. Apport de la modélisation numérique

Le modèle numérique hydro-sédimentaire (Mage-AdisTS, Guertault *et al.*, 2016) développé dans le cadre de l'OSR (Observatoire des sédiments du Rhône, Dugué *et al.*, 2015) a été utilisé pour simuler la crue de 2018. Les débits d'eau des stations hydrométriques (Port-Galland, rivière Ain ; Lagnieu, rivière Rhône) ont été utilisés pour les conditions limites en amont. Une courbe de tarage sédimentaire simple (cf. Eq. 1) a été ajustée (sur le coefficient a , $b=2$ et $Q_{cr}=0$) de manière à ce que la moitié du flux

proviennent approximativement de chaque condition aux limites amont (Ain et Haut-Rhône). Les résultats sont présentés en Figure 20.

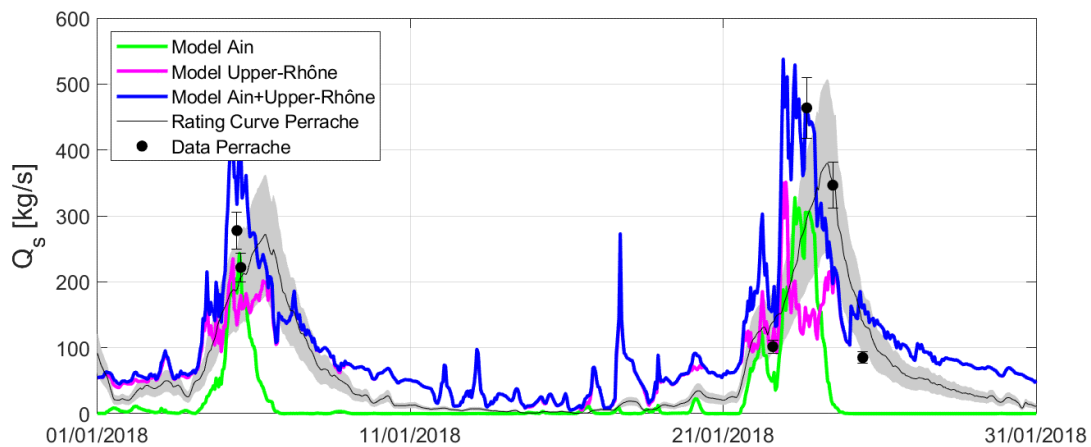


Figure 20: Flux de sable estimés sur le Lyon à Lyon-Perrache selon la courbe de tarage établie par Dramais (2020) et selon le modèle Mage-AdiTS sur la base d'apports simplifiés provenant de l'Ain et du Haut-Rhône.

Les pics de crue ont été légèrement lissés en raison de la mise en eau de la plaine d'inondation, qui n'est pas correctement modélisée. Cependant, les résultats restent cohérents et montrent un décalage des flux de sable modélisés (courbe bleue Figure 20) par rapport au débit mesuré à Perrache, et donc aux résultats de la courbe de tarage (courbe noire avec les incertitudes en grisé sur la Figure 20). Ce décalage serait typiquement dû aux apports de l'Ain car la crue de l'Ain arrive un peu plus tôt (courbe verte Figure 20). Une courbe de tarage sédimentaire établie sur le Rhône à Perrache peut sous-estimer l'apport de la rivière Ain, montrant ainsi que le système est potentiellement limité en apports. Cependant, il apparaît tout de même que les apports provenant du Haut-Rhône ne sont pas négligeables. En effet, sur le second pic de crue, entre le 22 et 27 janvier, la crue de l'Ain n'apportant plus de sédiments après le 24 janvier, seuls les apports du Haut-Rhône peuvent expliquer les jaugages solides élevés mesurés les 24 et 25 janvier.

Ces résultats montrent la nécessité d'avoir une meilleure connaissance des apports en sable en amont de Lyon provenant de l'Ain mais aussi provenant du Haut-Rhône malgré la série de barrages.

5. Méthodes hydro-acoustiques pour la mesure de la suspension de sable

5.1. Méthode HADCP – synthèse des avancées

5.1.1. Introduction

La connaissance du flux, de la distribution granulométrique et de la distribution temporelle et spatiale du sable en suspension joue un rôle important pour la gestion sédimentaire des rivières alpines aménagées. Dans ces rivières, comme l'Arc ou l'Isère, le sédiment s'accumule en amont des barrages ce qui requiert des chasses d'hydrocurage régulières afin de maintenir la capacité de stockage des retenues. Dans le cas de la Basse-Isère, les chasses des barrages effectuées en 2008 et 2015 ont mené à des dépôts de sables importants dans la zone de la confluence avec le Rhône. Cela a engendré un arrêt de la navigation, des opérations de dragage, ainsi qu'un contentieux entre les gestionnaires. Afin d'améliorer la gestion sédimentaire dans la Basse-Isère, il est primordial de connaître la quantité, la granulométrie et la distribution spatiale et temporelle de la fraction sableuse. Notamment pendant les chasses, des informations en continu et en temps réel sont essentielles pour les exploitants des barrages.

Néanmoins, la mesure en continu de la concentration reste un fort enjeu, car la distribution du sable en suspension est caractérisée par des gradients horizontaux et verticaux importants. Son exploration spatiale et temporelle requiert des échantillons fréquents et distribués dans toute la section de la rivière. L'approche classique par jaugeages solides utilise des échantillons de l'eau et/ou de sédiment répartis sur plusieurs verticales et à différentes profondeurs dans la colonne d'eau, mais elle offre une résolution spatiale et temporelle limitée. L'objectif de cette étude est d'établir des séries temporelles de concentration et granulométrie du sable en suspension en améliorant la résolution temporelle par l'utilisation d'une méthode acoustique multi-fréquentielle se basant sur l'atténuation et la rétrodiffusion acoustique pour mesurer indirectement la suspension. Selon les expériences de Moore *et al.* (2012) et de l'USGS, l'utilisation de deux fréquences différentes dans la gamme de 300 à 2000 kHz environ permet la séparation de la fraction fine (argiles et limons), qui domine l'atténuation acoustique, de la fraction sableuse causant la majorité de la rétrodiffusion acoustique. Par l'inversion du signal acoustique, la concentration et la granulométrie du sédiment en suspension peuvent être déterminées en corrigeant l'intensité du signal par les pertes de transmission pour chacune des deux fréquences.

5.1.2. Méthodologies

Cette étude suit l'approche de l'USGS qui exploite plusieurs stations hydroacoustiques sur le Colorado depuis une dizaine d'années. Par rapport au Colorado, la teneur en sédiments fins dans l'Isère est plus prononcée et le rapport entre les concentrations en sédiments fins et en sable change en fonction des conditions hydro-sédimentaires. Appliquer la méthode bi-fréquentielle de Topping & Wright (2016) nécessitera sans doute des adaptations. Deux Horizontal Acoustic Doppler Current Profilers (HADCPs) monostatiques de 400 et 1000 kHz ont été installés à la station hydro-sédimentaire de l'Isère à Grenoble Campus (Figure 21).

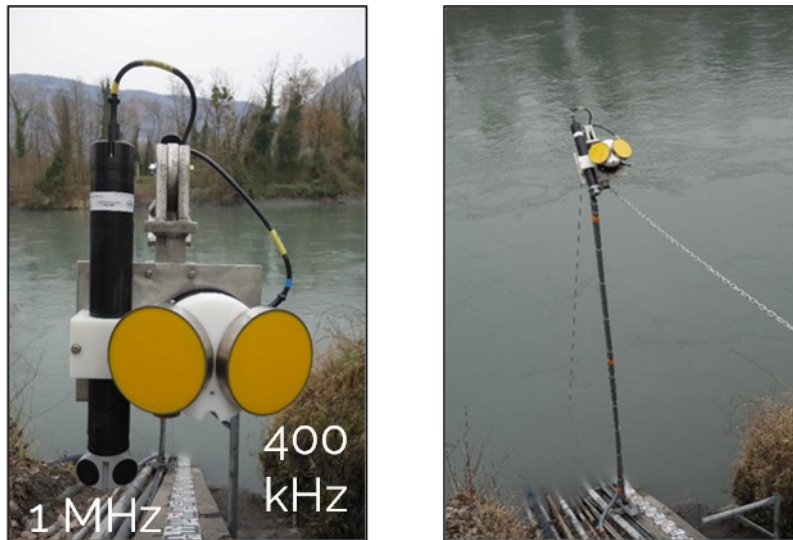


Figure 21: ADCP Horizontaux installés à Grenoble Campus (fréquence d'acquisition : toute les 10 minutes).

Des échantillons isocinétiques prélevés avec des échantillonneurs de suspension US P-72 et US P-6 près de la zone de mesure des HADCPs permettent d'établir une relation entre la rétrodiffusion acoustique corrigée et la concentration du sédiment en suspension. Pour déterminer le flux sableux total à travers la section de la rivière, des jaugeages solides réalisés avec une Bouteille de Delft et des mesures ADCP sont effectués simultanément. En combinant les échantillons dans la zone de mesure des HADCPs avec ceux faits dans toute la section, il est possible d'établir une relation entre la concentration index du sable en suspension évaluée sur la zone de mesure des HADCP et la concentration moyenne sur la section. Des séries temporelles de concentration et granulométrie du sable en suspension à Grenoble Campus peuvent être déterminées en effectuant des campagnes de prélèvement régulières (Figure 22).

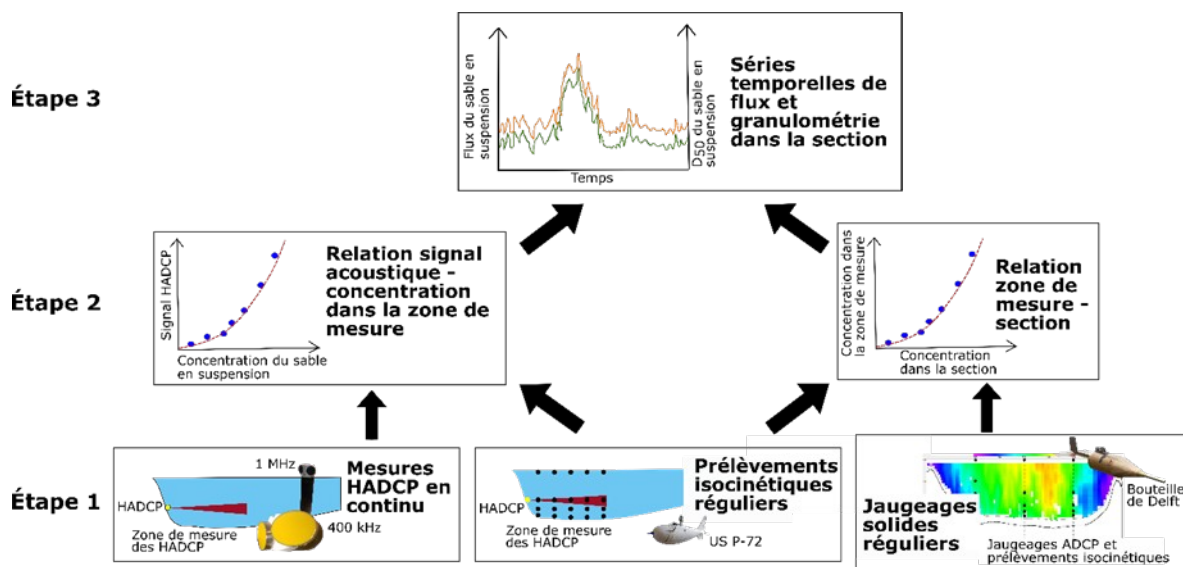


Figure 22: Méthodologie mise en place à Grenoble Campus sur l'Isère

5.1.3. Résultats préliminaires

Les premiers résultats permettent l'établissement des séries temporelles d'atténuation liée aux sédiments α_{sed} et de rétrodiffusion corrigée suivant la méthodologie de Topping et Wright (2016). Des pics prononcés du signal d'atténuation, correspondent à des événements extrêmes (une lave torrentielle en amont, des chasses des barrages ou une crue de printemps). Ces résultats sont obtenus en faisant l'hypothèse forte d'une suspension homogène tant en concentration qu'en distribution granulométrique.

Faisant le lien entre la concentration des sédiments en suspension (déterminée à l'aide de la turbidimétrie plus sensible aux sédiments fins qu'au sable) et l'atténuation liée aux sédiments pour les deux fréquences, une bonne corrélation est obtenue (Figure 23).

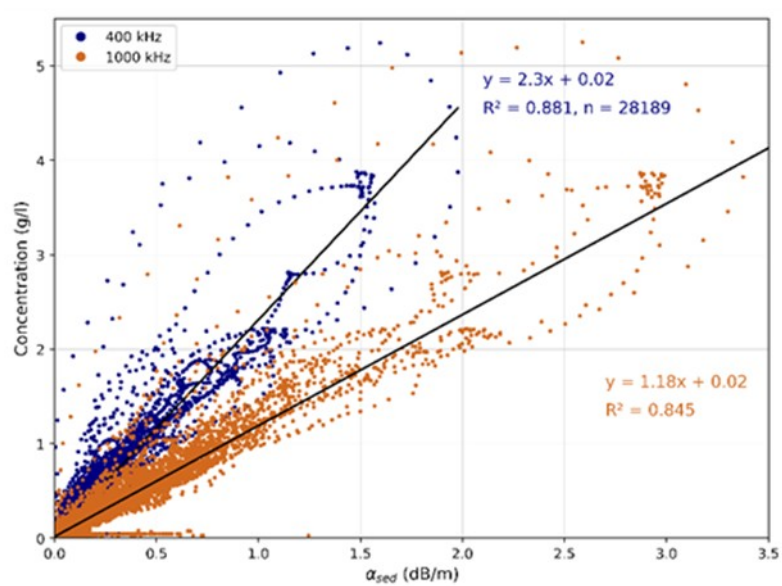


Figure 23: Relation entre la concentration et l'atténuation liée aux sédiments pour les deux fréquences

Des événements extrêmes montrent des signatures spécifiques causant des boucles d'hystérésis prononcées qui peuvent être liées à des changements de la granulométrie du sédiment en suspension. Les informations sur la concentration et la granulométrie des prélèvements récoltés lors des jaugeages et des préleveurs automatiques de la station pourront aider à comprendre précisément ce comportement. Certaines hétérogénéités de concentration et de granulométrie le long du faisceau acoustique pourraient contredire la distribution homogène supposée par la méthode et requièrent peut-être une analyse locale adaptée.

5.2. Une interface graphique pour la mesure hydro-acoustique

5.2.1. Contexte

La mesure de flux sédimentaire est essentielle à la gestion des rivières. Elle nécessite de quantifier vitesse et concentration en sédiment, en tout point d'une section de la rivière. La quantification du flux de sédiments fins en suspension repose, la plupart du temps sur : la mesure locale de la turbidité, en un point de la section considérée, et, des mesures de

vitesse par vélocimétrie acoustique (ADCP). Une calibration concentration en sédiments/turbidité est établie à l'aide de prélèvements. On en déduit alors la concentration en sédiments fins dans la section en continu sous l'hypothèse que la concentration est homogène dans la section et que les propriétés des sédiments (leur taille notamment) ne varie pas dans le temps. Cependant, la concentration en sédiments dans une section peut ne pas être homogène, en particulier en présence de sable. Dans ce cas, une mesure de turbidité ne suffit pas à représenter le flux et il devient nécessaire de mesurer la distribution des sédiments dans la section et/ou de faire la part entre sédiments fins et grossiers. Ces constats ont conduit à l'exploration de données acoustiques (notamment celles issues des profileurs de vitesse type ADCP) pour estimer la distribution des concentrations en sédiments dans une section.

Plus récemment, un système qui repose sur la rétro-diffusion acoustique multi-fréquence a été utilisé dans le cadre de la thèse de A. Vergne (2018). Il s'agit de l'*AQUAscat*[™] (<https://www.aquatecgroup.com/aquascats/aquascats-1000r>) : un profileur acoustique multi-fréquentiel qui permet d'insonifier une colonne d'eau. Il peut être déployé en position verticale à la surface de la rivière et, est déplacé à l'aide d'un drone aquatique, support flottant motorisé, le long d'un transect (section transversale à la rivière) et/ou en statique (pour mesurer une verticale pendant un laps de temps défini). Il permet de mesurer et d'évaluer la distribution spatiale et/ou l'évolution temporelle des concentrations en sédiments fins (< 63 μ m) et en sables (> 63 μ m).

Une méthode théorique dite d'inversion acoustique a été développée et appliquée en rivière (Vergne et al. 2020). La concentration des sédiments en suspension est calculée à partir du signal acoustique rétro-diffusé et enregistré par l'*AQUAscat*[™]. Cette méthode d'inversion est calibrée à partir de prélèvements d'échantillons de sédiments sur une verticale. Sur le plan spatial, elle permet d'extrapoler les concentrations sur une section transversale à la rivière. Sur le plan temporel, elle permet d'extrapoler les concentrations sur un temps caractéristique où la nature des sédiments fins d'une part, et des sables d'autres part, évolue peu. Les échantillons sont analysés en terme de concentration (masse de sédiments par unité de volume d'eau prélevé) et en terme de granulométrie (distributions des diamètres des particules sédimentaires). Ce sont les résultats de ces analyses qui permettent de calibrer la méthode d'inversion acoustique. Pour la mesure le long d'un transect, des échantillons peuvent également être prélevés sur d'autres verticales pour être comparés aux valeurs issues du calcul par inversion acoustique.

Du point de vue théorique, la méthode est basée sur l'hypothèse selon laquelle la rétro-diffusion du signal est principalement due aux particules de sable tandis que l'atténuation acoustique est dominée par les sédiments fins. Cette théorie reste néanmoins complexe, aussi bien dans sa compréhension que dans sa mise en place, et nécessite donc, une certaine expertise.

5.2.2. Présentation de l'interface

Dans ce contexte, on se propose de développer un outil opérationnel permettant de démocratiser l'utilisation de ces méthodes théoriques d'inversion du signal acoustique rétro-diffusé multifréquence, pour *in fine*, appuyer l'étude des mécanismes physiques sédimentaires. Cet outil prend la forme d'une interface graphique qui remplit, entre autres, les critères suivants :

- être mutualisée, c'est-à-dire, facile d'utilisation et traduite en plusieurs langues,
- être générique en étant fonctionnelle pour différents types d'outil de mesure (AQUAscat™, UBSediFlow™) et pour différents sites d'étude,
- être opérationnelle pour une utilisation directement sur site et en laboratoire,
- être évolutive et permettre d'assurer une certaine veille technologique.

Cette interface graphique est développée avec le langage de programmation Python, en particulier, à partir du module PyQt (version 5). Elle est développée en anglais et la traduction automatique en anglais-français est déjà disponible. Dans sa première version, elle se limite à la méthode d'inversion décrite dans Vergne *et al.* (2020) : pour les cours d'eau faiblement (quelques dizaines de mg/L) et fortement (plusieurs dizaines de g/L) concentrés et avec le système AQUAscat™. Le jeu de données utilisé pour élaborer l'interface graphique est celui des sites à la confluence entre le Rhône et l'Isère et à la confluence entre le Rhône et la Saône (cf. Vergne *et al.* 2020).

Un aperçu de l'interface graphique est fourni dans les figures 1 à 4. Elle se compose de 6 onglets. Les onglets 5 et 6 correspondent respectivement à l'onglet « bloc-note » et à l'onglet manuel d'utilisation. Il est cependant à noter que tout n'est pas encore fonctionnel et qu'il s'agit pour le moment d'une version sans graphiques dynamiques et sans calculs (développements en cours).

Le premier onglet (Figure 24) correspond aux données acoustiques. Il permet de visualiser le signal acoustique rétro-diffusé brut en temps et en espace ainsi que la qualité du signal à travers le rapport signal sur bruit. Les données acoustiques brutes et GPS sont importées et les informations des mesures sont affichées automatiquement. Un tableau exportable permet de concaténer les données et des options de tracé sont également disponibles. Un algorithme de détection du fond de la rivière (lignes épaisses continues rouges et noires sur les tracés de la Figure 24) est intégré dans l'onglet. Il consiste à repérer, à basse fréquence, le pic du signal rétro-diffusé sur chacun des profils verticaux.

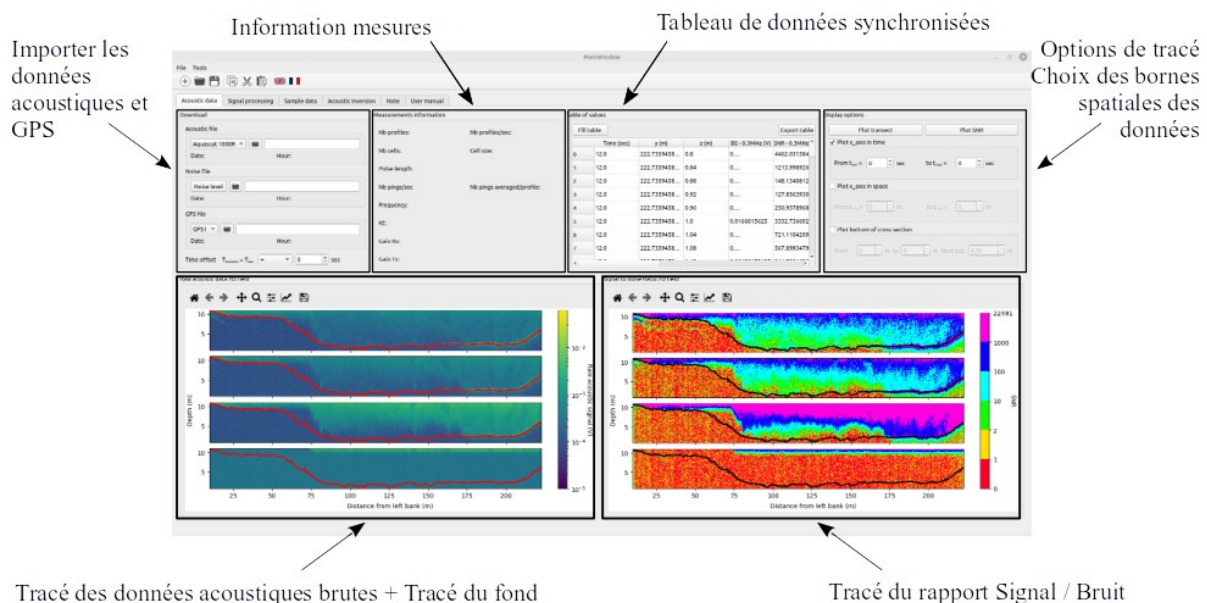


Figure 24: Onglet 1 - Données acoustiques

Le deuxième onglet (Figure 25) accompagne l'utilisateur pour post-traiter les données brutes. Il pourra, en particulier, filtrer le signal (suppression du bruit et des valeurs indésirables), calculer la moyenne et évaluer des constantes d'atténuation acoustique, ingrédients clés dans la théorie d'inversion acoustique. Le tracé en haut à gauche de l'onglet permet à l'utilisateur de visualiser automatiquement la position du profil sur le transect.

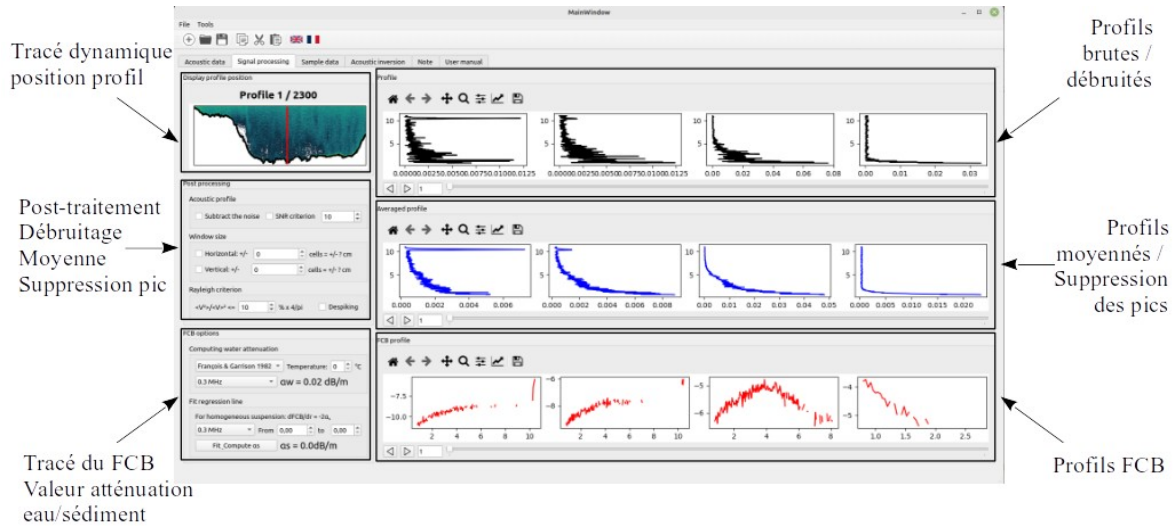


Figure 25: Onglet 2 - Traitement du signal

Le troisième onglet (Figure 26) s'intéresse aux prélèvements d'échantillons de sédiments fins et de sables. Les distributions granulométriques des prélèvements et leurs concentrations sont importés depuis des fichiers types. A l'image du premier onglet, un tableau exportable permet de concaténer toutes les données tracées dans la moitié inférieure de l'onglet. L'utilisateur peut sélectionner dans ce tableau le (ou les) échantillon(s) à tracer (en terme de distribution granulométrique) et visualiser sa (ou leurs) position(s) dans le transect (figure en haut à droite de l'onglet). La verticale à partir de laquelle le champ de concentration est extrapolé par inversion acoustique, est également choisie par l'utilisateur.

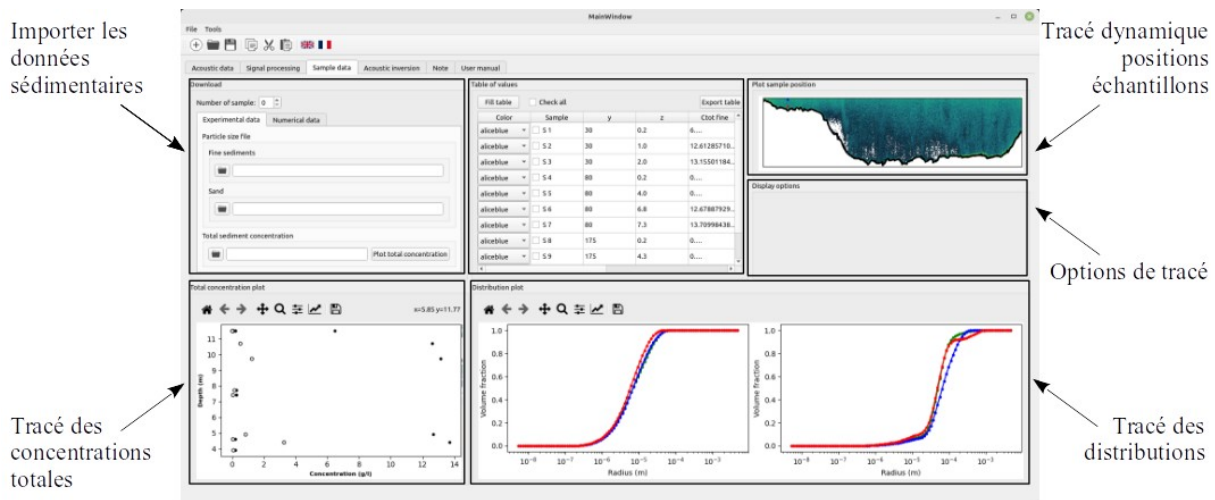


Figure 26: Onglet 3 - Données échantillons

Le quatrième onglet (Figure 27) comporte la méthode d'inversion acoustique. Tous les choix de traitement des trois premiers onglets sont enregistrés et ré-utilisés dans cet onglet. L'utilisateur peut y visualiser les champs bidimensionnels de concentrations en sédiments fins et en sables ainsi que l'écart entre les concentrations issues de la théorie et les concentrations issues des prélèvements.

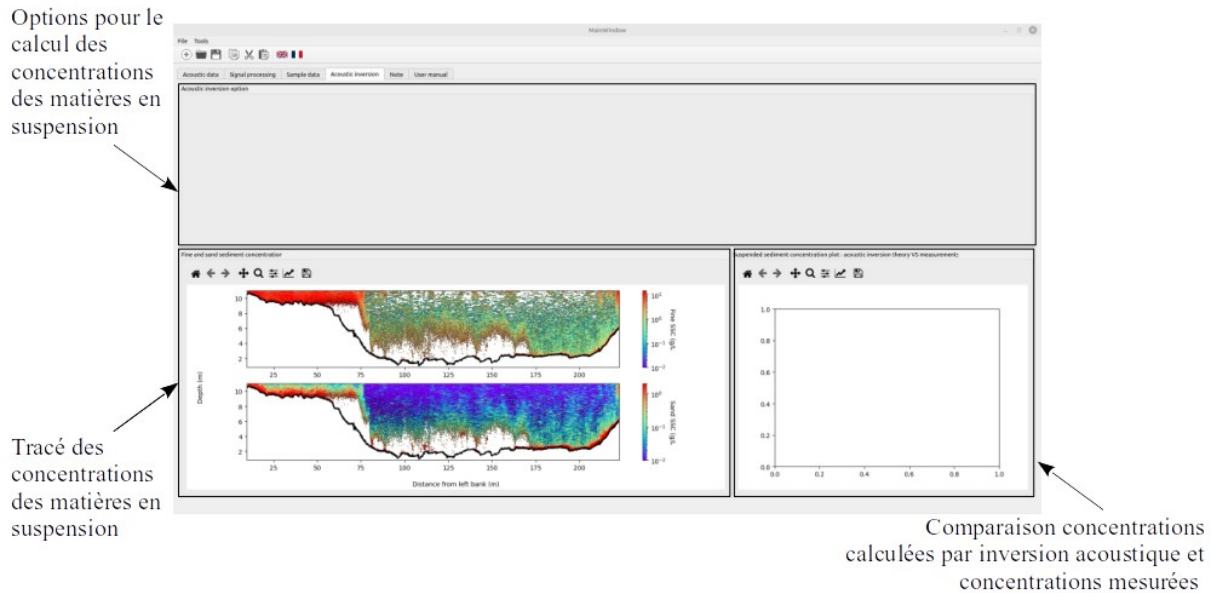


Figure 27: Onglet 4 - Inversion acoustique

Aujourd'hui, tous les éléments graphiques qui apparaissent dans les quatre figures et toute la théorie d'inversion acoustique ont été programmés et intégrés à l'interface graphique. Certaines fonctionnalités comme l'internationalisation et l'importation des données sont déjà opérationnelles. L'onglet « bloc-note » est également opérationnel. Un travail est en cours pour rendre actives les fonctionnalités de tracé.

Cette interface sera utilisable sous Linux et Windows sous la forme d'un exécutable et des possibilités d'enregistrement des traitements/paramétrages seront proposées. A long terme, d'autres méthodes d'inversion acoustique pourront être rajoutées.

6. Conclusion

Dans le cadre de l'OSR6, de nombreuses avancées méthodologiques ont permis de progresser sur la mesure des sables. Aujourd'hui, un protocole pour les jaugeages solides complet, de la mesure à l'estimation des flux, est proposé, incluant une estimation des incertitudes (Dramais *et al.*, 2023). L'équipe a aussi acquis une expérience de la mesure avec une bonne vision des avantages et limites des différents instruments. Un outil Python basé sur QRevlnt permet aujourd'hui de calculer le flux solide total selon la méthode SDC, avec jaugeage ADCP. Il apparaît de plus que la méthode de la concentration témoin pourrait être d'un grand intérêt pour la mesure en continu des concentrations en sable, par l'intermédiaire d'un prélèvement régulier, d'une mesure de turbidité ou de l'hydro-acoustique. Même si la connaissance des flux de sables reste encore très lacunaire, la connaissance de la dynamique sableuse a progressé sur plusieurs sites du Rhône (Génissiat, Lyon, confluence avec l'Isère).

Les volumes de sable stockés et potentiellement mobilisables ont été estimés en amont de Lyon sur plusieurs secteurs, les volumes semblent modestes par rapports aux flux de sable en suspension qui transitent lors des crues du Rhône. Ceci est probablement lié au fait que l'érosion latérale n'a pas été prise en compte. L'apport de sable en suspension de l'Ain semble important mais aussi les apports du Haut-Rhône, ce qu'il faudra confirmer par des mesures complémentaires afin d'expliquer les volumes qui transitent à Lyon.

De nombreux efforts sur la mesure hydro-acoustique ont pu être réalisés avec en particulier le travail de thèse de Jessica Laible sur l'utilisation de HADCP pour la mesure en continu des sables en combinant les analyses de l'atténuation et de la rétrodiffusion acoustique. L'outil nécessite encore quelques étapes d'amélioration des post-traitements pour être utilisé et déployé en routine. L'utilisation d'appareils de rétro-diffusion multi-fréquences (*AQUAScat*[™], *UB-Sediflow*) semble être une option plus adaptée et moins onéreuse pour nos besoins (estimation de la concentration et du diamètre moyen des sables, sur un volume limité mais représentatif du flux moyen). L'interface graphique pour la mesure hydro-acoustique devrait par la suite démocratiser l'utilisation de ces outils hydro-acoustiques.

Remerciements : Stéphane Rodrigues (Université de Tours, UMR CITERES) et le Plan Loire pour le prêt du Préleveur US-P6.

7. Bibliographie

- ASTM (2007). Standard test method for determining sediment concentration in water samples. D3977-97R07, West Conshohocken, PA. 6p.
- Beverage, J. P. and Williams, D. T. (1989). *Comparison of US P-61 and Delft sediment samplers*. Journal of Hydraulic Engineering, 115(2):1702–1706. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:12(1702)
- Camenen, B., Buffet, A., Thollet, F., Lacroix, F., Liger, L. & Pénard, L. (2018). Expérience de terrain lors de la chasse de la retenue d'Aigueblanche sur l'Isère (6 au 10 mai 2018) pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses. Rapport Irstea-EDF ; 53 p.
- Camenen, B., Buffet, A., Thollet, F., Lacroix, F., Liger, L. & Pénard, L. (2019a). Expériences de terrain sur le site Arc-Isère pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses. Irstea/EDF-CIH, 61 p.
- Camenen, B., Deville-Cavellin, L., Thollet, F., Bonnefoy, A., Fretaud, T. & Pierrefeu, G. (2021a). Evaluation d'une pompe péristaltique pour l'échantillonnage de suspension sableuse. Proc. Hydrométrie 2021 - "De la mesure à la prise de décision", 23 et 24 Novembre 2021.
- Camenen, B., Dramais, G., Bouche, M., Stepanian, J., Lauters, F., Reynaud, S., Menu, S., Pierrefeu, G., Le Coz, J., Laible, J., Thollet, F., Bonnefoy, A., Lagouy, M., Fretaud, T. & Nunes, P. (2022). Synthèse des mesures hydro-sédimentaires lors de la chasse de la Basse-Isère de janvier 2021. Rapport CNR/EDF/Inrae , 91 p.
- Camenen, B., Dramais, G., Laible, J., Le Coz, J., Pierrefeu, G. & Lauters, F. (2023) . Continuous evaluation of sand fluxes downstream of a dam during a flushing event. En préparation pour Environmental Fluid Mechanics.
- Camenen, B., Masquelier, F., Bonnefoy, A., Kieffer, L., & Dramais, G. (2023). *Origin of sand suspension measured in the River Rhône at Lyon-Perrache during a flood*. 9th conference on Gravel-Bed Rivers (GRB9), Villareca, Chili, Jan. 2023.
- Camenen, B. & Melun, G. (2021b). Guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide, Edition OFB (Office National de la Biodiversité), Collection Guides et protocoles. 146 p.
- Camenen, B., Naudet, G., Dramais, G. Le Coz, J & Paquier A. (2019b). *A multi-technique approach for evaluating sand dynamics in a complex engineered piedmont river system*. Science of the Total Environment, 657:485-497. doi : 10.1080/00221686.2017.1312575
- Dramais, G. (2020). *Observation et modélisation des flux de sable dans les grands cours d'eau*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1, INRAE, 313p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03188258>.
- Dramais, G., Camenen B. & Le Coz, J. (2018). *Comparaisons de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable*. La Houille Blanche. 5-6: 96-105. doi : 10.1051/lhb/2018056
- Dramais, G., Camenen, B., Le Coz, J., Thollet, F., Bonnefoy, A., Lagouy, M., Laible, J., Calmel, B., Stepanian, J. (2022). Suivi du sable en suspension à Pymont pendant les opérations APAVER sur le Rhône en 2021. Rapport. Février 2022. <hal-04028098>
- Dramais, G., Camenen, B., Le Coz, J., Pierrefeu, G., Peteuil, C., Fretaud, T. (2018) Observation and modeling of sand fluxes in the Rhône River during a flood. Proc. AGU fall meeting, Washington DC, USA.

Dramais, G., Camenen, B., Le Coz, J., Topping, D.J., Peteuil, C. & Pierrefeu, G. (2019) *A physically based method of combining ADCP velocity data with point samples to compute suspended-sand discharge — application to the Rhône River, France*. Proc. SedHyd conference. Reno, Nevada, USA.

Dramais, G., Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Topping, D.J., & Pierrefeu, G. (2023) . Methodology for River suspended-sand discharge-computation with uncertainty estimation, using water samples and high-resolution ADCP measurements. En préparation pour Environmental Fluid Mechanics.

Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Fretaud, T., & Pierrefeu, G. (2022). *Comment prélever les sédiments en suspension dans les cours d'eau?* La Houille Blanche, 108(1), 2072783. doi : 10.1080/27678490.2022.2072783

Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Topping, D., Griffiths, R. & Pierrefeu, G. (2020). Sampling suspended sand in rivers using instantaneous horizontal bottle samplers: a comparison against other techniques. Proc. River Flow conference, July 2020, Delft, The Netherlands.

Deng, J., Camenen, B., Legout, C. & Nord, G. (2023). *Estimation of fine sediment stocks in alpine rivers including the sand fraction*. In revision for Sedimentology.

Dugué, V, Walter, C., Andries, E., Launay, M., Le Coz, J., Camenen, B & Faure, J.-B. (2015). *Accounting for hydropower schemes' operation rules in the 1D hydrodynamic modeling of the Rhône River from lake Geneva to the Mediterranean sea*. Proc. 36th IAHR Congress, paper 3366 : The Hague, The Netherlands

Filizola, N. & Guyot, J. (2004). The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon. Hydrological Sciences Journal, 49(1):143–154. doi : 10.1002/hyp.7394

FISP. (1940). Measurements and analysis of sediment loads in streams. field practice and equipment used in sampling suspended sediment. Rapport technique Report N°1, Federal Interagency Sedimentation Project.

FISP. (1941). Laboratory investigation of suspended-sediment samplers. Rapport technique Report No. 5, Federal Interagency Sedimentation Project.

Gray, J. R., Laronne, J. B. & Marr, J. D. G. (2010). Bedload-surrogate monitoring technologies. Techreport N° 2010-5091 U.S. Geological Survey.

Gray, J. & Landers, M. (2014). *Measuring Suspended Sediment*. Ahuja, S. (Ed.), Comprehensive Water Quality and Purification 4 Elsevier, p. 159-204.

Guertault, L., Camenen, B., Peteuil, C., Paquier, A. & Faure, J.-B. (2016). *One dimensional modelling of suspended sediment dynamics in elongated dam reservoirs*. Journal of Hydraulic Engineering , 142(10-04016033) : 1-9. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001157

GUM (2008). Evaluation of measurement data - Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, JCGM member organizations.

ISO 748 (2007). Hydrometry - measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats. Norme Internationale, Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO 3716 TS (2006). Hydrométrie — Spécifications de fonctionnement et caractéristiques des appareils d'échantillonnage pour la détermination des charges sédimentaires en suspension. Norme Internationale, Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO 4363 (2002). Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts-Méthodes de mesurages des caractéristiques des sédiments en suspension. Norme Internationale, Organisation internationale de normalisation, Genève.

Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G. (2022). Determination of Time Series of Concentration and Grain Size of Suspended Sand using an Acoustic Method. Proceedings of the 39th IAHR World Congress.

Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Lauters, F. & Pierrefeu, G. (2022) Développement d'une station de mesure hydroacoustique pour la mesure de la concentration et de la granulométrie du sable en suspension en continu. Colloque TSMR – CFBR « Transport sédimentaire : rivières & barrages réservoirs », Saclay, France

Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Lauters, F. & Pierrefeu, G. (2022). Establishing time series of flux and grain size of suspended sand in rivers using an acoustic method. In EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienne, Autriche.

Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Lauters, F. & Pierrefeu, G. (2023). Using a hydroacoustic method to establish continuous time series of suspended sand concentration and grain size in the Isère River, France In EGU, Vienne, Autriche.

Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Pierrefeu, G. & Lauters, F. (2021). Développement d'une station de mesure en continu des flux de sable dans l'Isère à Grenoble. Conférence SHF Hydrométrie 2021 - "De la mesure à la prise de décision" 23 et 24 Novembre 2021

Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Pierrefeu, G., Mourier, B., Lauters, F. & Dramais, G. (2023) *Comparison of grain size distribution measurements of sand-silt mixtures using laser diffraction systems*. Journal of Soils and Sediments, doi : 10.1007/s11368-023-03470-6

Le Coz, J., Bechon, P.M., Camenen, B., Dramais, G.(2014) Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses. La Houille Blanche, doi : 10.1051/lhb/2014047

Martinez, J. M., Guyot, J. L., Filizola, N., & Sondag, F. (2009). Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. Catena, 79(3), 257-264. doi : 10.1016/j.catena.2009.05.011

Masquelier, F. (2022). Évaluation des stocks de sable dans le Rhône en amont de Lyon. Rapport de Master 2, Université de Reims-Champagne-Ardenne, INRAE.

McNeil, W. J. & Ahnell, W. H. (1964). Success of pink salmon spawning relative to size of spawning bed materials. US Department of the Interior, Bureau of Commercial Fisheries. Special Scientific Report-Fisheries, 469, 17.

Moore, S. A., Le Coz, J., Hurther, D., & Paquier, A. (2012). On the application of horizontal ADCPs to suspended sediment transport surveys in rivers. Continental Shelf Research, 46, 50-63. doi : 10.1016/j.csr.2011.10.013

Pavaux, A. (2022). Comparaison de préleveurs et estimation des incertitudes de mesure. Rapport de Master 1, Université de Lyon, INRAE.

Pugh, F. J. & Wilson, K. C. (1999). Velocity and concentration distributions in sheet flow above plane beds. Journal of Hydraulic Engineering, 125(2):117-125. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:2(117)

Santini, W., Camenen, B., Le Coz, J., Vauchel, P., Guyot, J.-L., Lavado, W., Carranza, J., Paredes, M., Pères-Arévalo, J. J., Arévalo, N., Espinoza-Villar, R., Julien, F. & Martinez, J.M. (2019). *An index concentration method for suspended load monitoring*. Earth Surface Dynamics, 7(2): 515-536

Topping, D. J., Rubin, D. M., Wright, S. A. et Melis, T. S. (2011). Field evaluation of the error arising from inadequate time averaging in the standard use of depth-integrating suspended sediment samplers. US Geological Survey professional paper 1774.

Topping, D. J., & Wright, S. A. (2016). Long-term continuous acoustical suspended-sediment measurements in rivers-Theory, application, bias, and error (No. 1823). US Geological Survey.

Vergne A. (2018), *Mesure acoustique des sédiments en suspension dans les rivières*, Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes-INRAE <https://theses.hal.science/tel-02115348>.

Vergne, A, Le Coz, J., Berni, C. & Pierrefeu, G. (2020). *Using a down-looking multifrequency ABS for measuring suspended sediments in rivers*, Water Resources Research. 56(2), e2019WR024877, doi : 10.1029/2019WR024877

Vergne, A., Berni, C., Le Coz, J. (2023). Sound scattering by river suspended sediments: limitations of the solid particle theory, soumis Journal of Geophysical Research

Vergne, A., Berni, C., Le Coz, J., Tencé, F. (2021) Acoustic backscatter and attenuation due to river fine sediments: experimental evaluation of models and inversion methods, Water Resources Research. 67(9, e2021WR029589) : 1-28. doi : 10.1029/2021WR029589



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers



Cofinancé par
l'Union européenne