



**HAL**  
open science

## Mesure de la charge sableuse : méthodologies

B. Camenen, Guillaume Dramais, Adrien Vergne, Jérôme Le Coz, Céline Berni

► **To cite this version:**

B. Camenen, Guillaume Dramais, Adrien Vergne, Jérôme Le Coz, Céline Berni. Mesure de la charge sableuse : méthodologies. [Rapport de recherche] INRAE. 2021. hal-03292647

**HAL Id: hal-03292647**

**<https://hal.science/hal-03292647>**

Submitted on 20 Jul 2021

**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.



**O**bservatoire  
**S**édiments  
**du R**hône

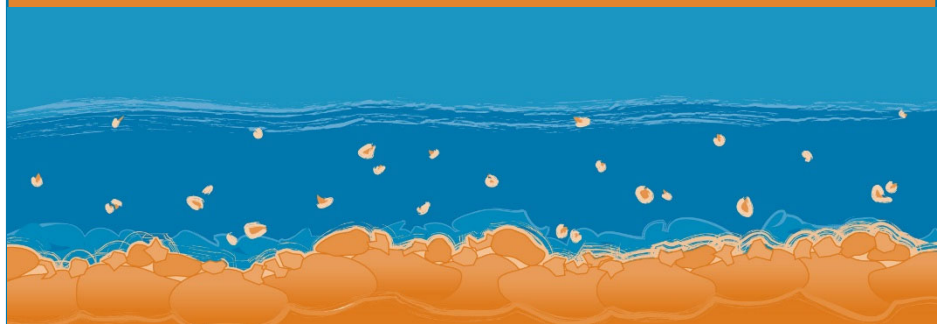
# Mesure de la charge sableuse : méthodologies

OSR5 2018-2020

*Rapport final*



**Plan** ~  
**Rhône**



# Mesure de la charge sableuse : méthodologies

*Rapport final – Version du 15 juin 2021*

Axe B	Monitoring des flux
Action B3	Le suivi des sables
<b>Sous-Action B3.2</b>	<b>Actions sable – morphologie locale</b>

Personnes impliquées	Equipe de recherche
Benoît Camenen Guillaume Dramais Adrien Vergne Jérôme Le Coz Céline Berni	Eq. Hydraulique des rivières, RiverLy, INRAE

## Pour citer ce document :

Camenen B., Dramais G., Vergne A., Le Coz J., Berni C. (2021). *Mesure de la charge sableuse : méthodologies*. Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5<sup>ème</sup> Programme d'Actions, 16 p.

## Résumé

Sont présentés dans ce rapport les principaux résultats des méthodes développées dans le cadre de l'OSR6. Ils correspondent principalement aux travaux issus de la thèse de Guillaume Dramais (2016-2020) en ce qui concerne les méthodologies de prélèvement de la suspension sableuse et de la thèse d'Adrien Vergne (2015-2018) en ce qui concerne les développements de la méthode acoustique.

## Mots-clés

OSR ; Rhône ; Méthode ; Mesure ; Flux ; Sable ; Prélèvement ; Analyse Acoustique

<b>1. MESURE DES CONCENTRATIONS ET FLUX DE SABLE PAR PRELEVEMENT</b> .....	3
1.1. Analyse d'un échantillon .....	3
1.2. Prélèvement avec une pompe péristaltique .....	3
1.2.1. Pompes testées .....	3
1.2.2. Vitesse d'aspiration .....	4
1.2.3. Prélèvement isocinétique .....	5
1.2.4. Comparaison mesures par pompage et avec une bouteille de Delft.....	6
1.3. Comparaison préleveurs pour le sable .....	7
1.3.1. Mesure de la profondeur de prélèvement .....	8
1.3.2. Comparaison entre les concentrations mesurées avec la bouteille Van-Dorn et P61	8
1.4. Une nouvelle méthode d'analyse des flux combinant mesure ADCP et échantillonnage ponctuel .....	9
1.4.1. Amélioration de la description du gradient de sable sur une verticale .....	9
1.4.2. Amélioration de la description du gradient de sable sur une verticale.....	10
<b>2. MESURES DES FLUX DE SABLE PAR ANALYSE ACOUSTIQUE</b> .....	11
2.1. Principes de l'analyse acoustique .....	11
2.2. Application au Rhône à la confluence avec l'Isère.....	12
<b>3. CONCLUSION</b> .....	13
<b>4. REFERENCES</b> .....	14

# 1. MESURE DES CONCENTRATIONS ET FLUX DE SABLE PAR PRELEVEMENT

---

Les développements méthodologiques présentés ici sont issus des résultats de la thèse de Guillaume Dramais (2017-2020) et des stages de Robin de Angelis (2019) et Loïc Deville-Cavellin (2020) pour l'utilisation d'une pompe péristaltique.

## 1.1. Analyse d'un échantillon

Dramais et al. (2018) ont montré l'importance du choix de la méthode de mesure sur les incertitudes de mesure de la concentration, en particulier en cas de présence de sable. La présence de sable (> 63 $\mu$ m) dans des échantillons met en effet en défaut la méthode de sous-échantillonnage par déversement rapide du prélèvement. Il est donc dans ce cas préconisé d'utiliser la norme américaine ASTM D3977 (2007) impliquant un tamisage préalable de l'échantillon à 63  $\mu$ m avec une analyse séparée des concentrations (et éventuellement granulométrie) en fines et en sables.

## 1.2. Prélèvement avec une pompe péristaltique

Une importante problématique pour la compréhension de la dynamique sableuse est l'acquisition de données de concentration fiables. Un défi est de pouvoir réaliser des prélèvements permettant de décrire la variabilité spatiale (sur une section de mesure) des concentrations en sable en un temps limité. Les systèmes existants (bouteille de Delft, préleveurs de l'USGS, etc.) restent des références en terme de qualité de mesure mais sont difficiles à mettre en œuvre et surtout coûteux en temps. C'est pourquoi nous cherchons à développer une mesure par pompage permettant de multiplier les échantillons sans avoir la contrainte de manipulation du préleveur pour récupérer l'échantillon. Ce paragraphe est en partie tiré des rapports de stage de Robin de Angelis (2019) et Loïc Deville-Cavellin (2020).

### 1.2.1. Pompes testées

Les limites liées à la puissance de pompage des pompes ISCO (problématique en cas de hauteur de charge de plusieurs mètres) et surtout liées à l'impossibilité de maîtriser la vitesse de pompage nous ont poussé à tester une pompe péristaltique plus puissante et avec variateur. Nous avons choisi une pompe péristaltique Albin Pump ALP17 (Figure 1a, au premier plan).



Figure 1 : Photos de la pompe péristaltique lors de l'expérience sur l'Arc-en-Maurienne pendant la chasse du 18 juin 2019 (a) et du système de pompe de forage (adapté sur la bouteille de Delft) lors de la campagne de mesure sur l'Isère à Grenoble le 4 juillet 2019 (b) (photos Thollet et Camenen).

Il est à noter que l'équipe d'INRAE Grenoble travaille sur une problématique similaire en utilisant des pompes immergées utilisées pour le pompage de fluide dense en forage (Figure 1b). Ce type de pompe a l'avantage d'être beaucoup plus puissante et donc adaptable à tout type de rivière (en terme de vitesse et hauteur de charge) ; elles sont cependant plus fragiles que les pompes péristaltiques, nécessitant ainsi une grille de protection (voire même une chambre de décantation, cf. photo Figure 1b, partie en appui sur la bouteille avant le coude) qui complexifie la méthodologie de mesure, i.e. comment intégrer dans les échantillons la partie sédimentée et/ou bloquée par la grille.

### 1.2.2. Vitesse d'aspiration

Il est possible d'exprimer la vitesse d'aspiration (de prélèvement) selon l'équation suivante (Camenen et al., 2019) :

$$V_n = \sqrt{\frac{A - 2g\Delta h}{B + CL}} \quad (1)$$

avec  $\Delta h$  la différence de hauteur d'eau (charge),  $L$  la longueur du tuyau,  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $A$ ,  $B$ , et  $C$  des coefficients.  $A$  correspond à la charge maximum que peut supporter la pompe,  $B$  au coefficient de perte de charge singulière et  $C$  au coefficient de frottement dans le tuyau.

La Figure 2a présente les résultats de vitesse de pompage en fonction de la longueur de tuyau et de la hauteur de charge pour la pompe péristaltique Albin Pump ALP17 avec un tuyau PVC de diamètre 8 mm. On s'aperçoit bien au regard des résultats expérimentaux de la forte sensibilité de la longueur de tuyau et de la hauteur de charge. A la vue des incertitudes, l'Eq. 1 donne une bonne représentation des résultats avec  $A = 175\text{m}^2\text{s}^{-2}$ , et  $B = 120$  et  $C = 25\text{m}^{-1}$ . On observe ainsi que la limite maximale de hauteur d'aspiration serait d'environ 9 m.



Quelques mesures ont aussi été réalisées avec un préleveur de type ISCO (Figure 2b). Il apparaît que pour des longueurs de tuyau et/ou hauteur d'aspiration équivalentes, les vitesses d'aspiration de l'ISCO sont beaucoup plus faibles et restent inférieures à 1 m/s, ce qui peut être problématique pour une application en rivière où les vitesses peuvent être bien plus importantes. On s'aperçoit cependant que la sensibilité à la hauteur de charge est très faible.

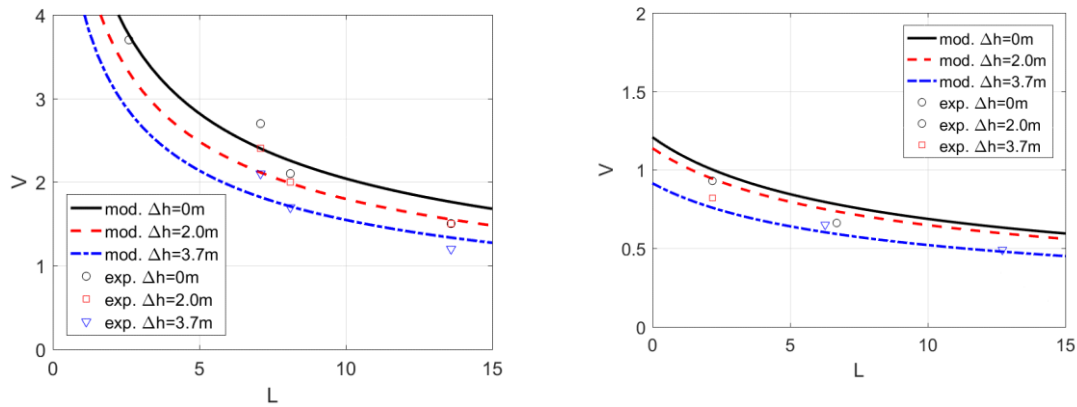


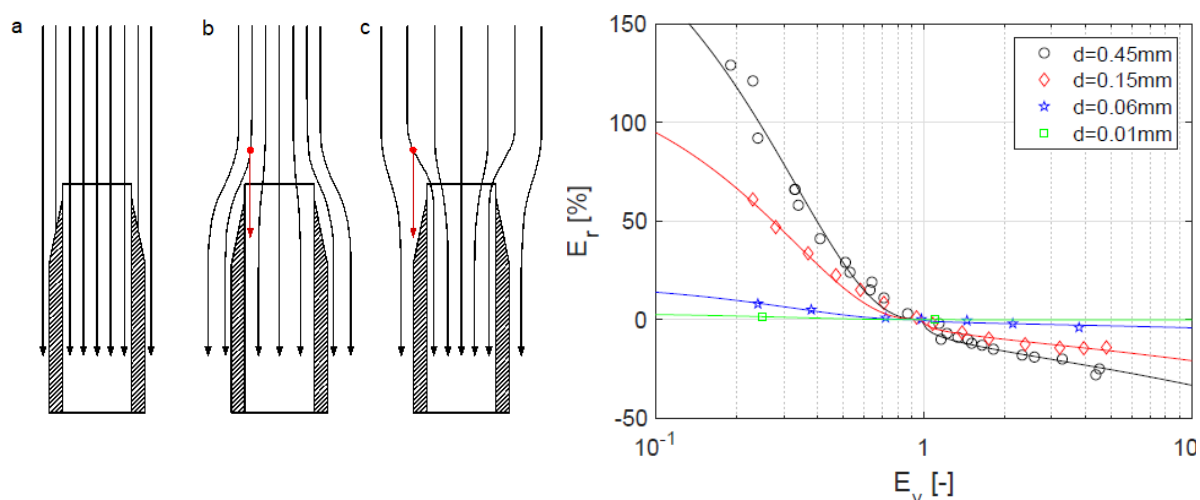
Figure 2 : Vitesse de pompage en fonction de la longueur de tuyau et de la hauteur de charge : (a) pompe péristaltique Albin Pump ALP17 ; (b) ISCO.

### 1.2.3. Prélèvement isocinétique

Même s'il n'existe que peu de mesures pour le valider, les équipes de l'USGS ont montré l'importance du critère iso-cinétique pour les mesures par prélèvement (FISP, 1941). La mesure iso-cinétique est définie par le coefficient d'efficacité d'entrée (Intake Efficiency) :

$$IE = \frac{V_n}{V} \quad (2)$$

où  $V$  est la vitesse de l'écoulement et  $V_n$  la vitesse à l'entrée du préleveur (vitesse de prélèvement). La Figure 3 illustre la potentielle erreur de mesure de concentration en cas de non-respect du critère iso-cinétique. En effet, si la vitesse de prélèvement est plus faible (respectivement plus forte) que la vitesse de l'écoulement, les lignes de courant vont s'écartier (se resserrer), et du fait de l'inertie des particules, plus (moins) de particules vont rentrer dans le préleveur, impliquant ainsi une sur-estimation (sous-estimation) de la concentration. La masse impactant l'inertie, cet effet est donc d'autant plus fort que les particules sont grosses. Il est donc fondamental de bien maîtriser la vitesse de pompage lors de nos prélèvements.



**Figure 3 : Influence de la vitesse de prélèvement sur la concentration en se focalisant tout particulièrement sur les lignes de courant (a : prélèvement isocinétique, b : prélèvement avec  $V_p < V$ , c : prélèvement avec  $V_p > V$ ) et Evaluation de l'erreur de concentration sur le prélèvement  $E_r$  en fonction du coefficient d'efficacité  $E_v$  et de la taille des sédiments (données expérimentales du FISP, 1941 ; Camenen et al., 2021).**

La Figure 3 (droite) présente les résultats sur l'erreur d'échantillonnage  $E_r$  en fonction de la taille des sédiments et le coefficient d'efficacité. Il apparaît que cette erreur est plus sensible aux prélèvements en sous-vitesse avec une erreur de plus de 150% dans le cas d'un échantillonnage avec  $E_v=0.1$  et  $d=0.45$  mm. Ces résultats ont été obtenus dans le cas où l'embout du préleveur est correctement positionné face à l'écoulement. Winterstein & Stefan (1983) ont montré que l'orientation de l'embout (angle par rapport à l'écoulement) pouvait significativement modifier les résultats.

Les capacités d'une pompe péristaltique (pompe Albin ALP17) à réaliser un prélèvement non-biaisé d'une suspension, soit selon le critère iso-cinétique, ont été évaluées à l'aide d'un banc de mesure développé à la CNR, Lyon (Deville-Cavellin, 2020). Ce banc permet de maintenir une suspension de granulométrie à une concentration maîtrisée et de tester des turbidimètres et prélèvements selon différents types et orientations d'embout. Les premiers résultats indiquent une dispersion assez importante des résultats par rapport à ceux obtenus par le FISP (1941). Ceci peut être en parti dû à des difficultés expérimentales (mesures des concentrations, référence). Nous avons cependant montré que les fluctuations de vitesses observées pour les pompes péristaltiques peuvent très largement impacter les résultats. Il serait enfin nécessaire de compléter le jeu de données en testant différentes tailles de sédiments et d'autres coefficients d'efficacité (Camenen et al., 2021).

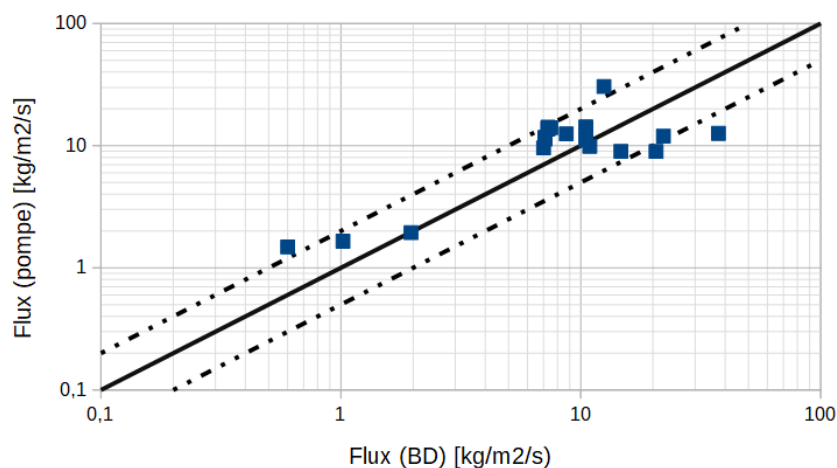
#### 1.2.4. Comparaison mesures par pompage et avec une bouteille de Delft

A l'occasion de la chasse de l'Arc, des mesures de concentrations en sable ont été réalisées le 17 (veille de la chasse) et le 18 juin 2019 en utilisant conjointement la bouteille de Delft et le système de pompage. Pour cela, le tuyau de la pompe ALP17 a été directement fixé sur la bouteille de Delft à peu près à la même hauteur que l'embout. Durant ces deux journées, des mesures de vitesse de surface à l'aide d'un radar et des mesures de flux à différentes profondeurs ont eu lieu. Sur la base d'un profil vertical théorique des vitesses (loi logarithmique), nous avons ainsi pu transformer les mesures de



concentration (avec la pompe) en mesures de flux afin de les comparer. Du fait des conditions hydrauliques et sédimentaires (vitesses élevées et transport solide important), il n'a pas été possible de faire des mesures près du fond. Les prélèvements ont été faits à vitesse maximale de la pompe, soit une vitesse d'aspiration de 0,8 m/s tandis que les vitesses d'écoulement étaient de l'ordre de 3 m/s. Contrairement à ce que nous souhaitons, les mesures n'ont donc pas pu être iso-cinétiques. En effet, l'importante hauteur d'aspiration (6 m) ainsi que la longueur totale des tuyaux (12 m) ne permettaient pas d'avoir une vitesse de prélèvement élevée.

Les résultats obtenus sont présentés Figure 4. Du fait des sous-vitesses de pompage, on aurait imaginé, encore une fois en suivant la théorie, que les concentrations et flux estimés à partir du système de pompage seraient très sur-estimés. Comme l'indique la Figure 4, du fait des incertitudes de l'ordre d'un facteur 2, c'est loin d'être aussi net que pour les mesures réalisées en 2018 avec un ISCO et une bouteille de Delft sur le Pont-de-Grésy, Isère, lors de la chasse du barrage d'Aigueblanche (Camenen et al., 2018). Cependant, la granulométrie des échantillons était clairement plus grossière pour la bouteille de Delft indiquant une différence non-négligeable entre les deux systèmes. Beverage & Williams (1989) ont cependant montré que les prélèvements issus de la bouteille de Delft pouvaient aussi être biaisés en quantité et en qualité du fait d'un possible sous-échantillonnage des particules les plus fines.



**Figure 4 : Comparaison entre les flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft ou avec notre système de pompage lors de la chasse de l'Arc-en-Maurienne le 18 juin 2019.**

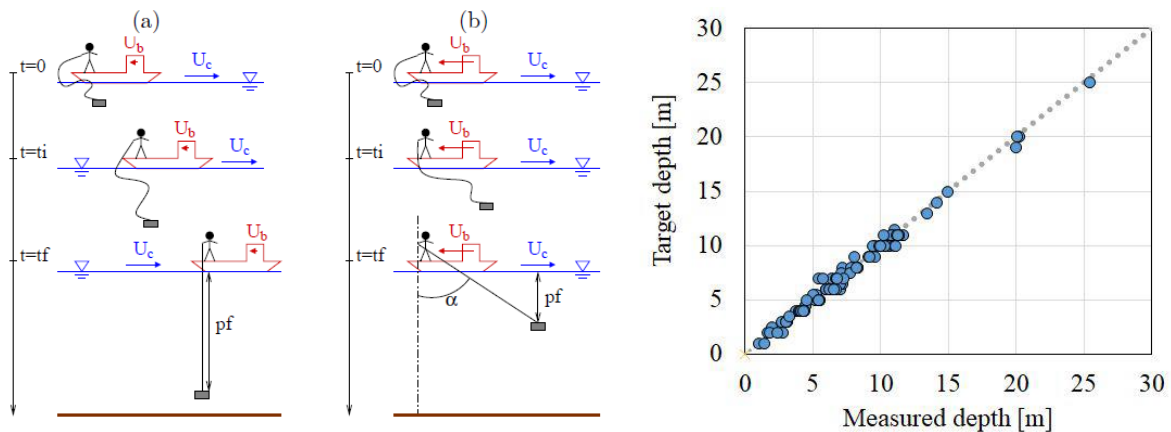
### 1.3. Comparaison préleveurs pour le sable

Afin de déterminer les flux de sables en suspension dans une rivière, il est nécessaire de faire une exploration des concentrations sur l'ensemble de la section d'une rivière du fait de la forte variabilité spatiale des concentrations en sable. Aussi du fait des difficultés expérimentales, les méthodes de prélèvement existantes sont limitées à un certain nombre de mesures ponctuelles dans la section. Il existe plusieurs types de préleveur permettant une mesure de plus ou moins bonne qualité (isocinétique, moyennée dans le temps, etc.). Nous chercherons ici à comparer et valider l'utilisation d'une bouteille de type Van Dorn (ou Niskin) par rapport à un prélèvement isocinétique et moyenné

dans le temps (P61 de l'USGS). Ce paragraphe est principalement tiré des travaux de G. Dramais (2016-2020) et tout particulièrement de l'article Dramais et al. (2020).

### 1.3.1. Mesure de la profondeur de prélèvement

Le bouteille Van-Dorn (ou Niskin) est très couramment utilisée pour réaliser de échantillons instantanés dans les lacs ou estuaires, si les vitesses restent inférieures à 0,5 m/s (Ward & Harr, 1990). Ces appareils sont légers et peu coûteux, et leur configuration horizontale permet de les déployer aussi en rivière avec des vitesses plus élevées si l'on respecte bien le protocole de mesure pour échantillonner à la profondeur désirée (Figure 4a). Un test a été réalisé pour valider la méthode par rapport à la fiabilité de la profondeur de mesure estimée par cette méthodologie, soit par la longueur de corde avant de lancer le messenger et fermer la bouteille, avec une mesure à l'aide d'un capteur de pression. On peut voir Figure 4b que la corrélation est très bonne et les incertitudes sur la profondeur d'immersion relativement faibles (<5%).



**Figure 5 : Protocole de mesure avec une bouteille Niskin (gauche : Camenen, 2018) et comparaison entre profondeur mesurée avec un capteur de pression et profondeur de consigne (droite).**

### 1.3.2. Comparaison entre les concentrations mesurées avec la bouteille Van-Dorn et P61

Deux campagnes de mesure ont été réalisées sur le Colorado à Diamond Creek (19/12/2018 et 02/04/2019) dans le cadre du séjour de Guillaume Dramais à l'USGS. Ces campagnes ont permis de mesurer sur le même site des profils de concentration de sable en utilisant une bouteille Van-Dorn en comparaison avec des prélèvements avec un préleveur isocinétique P61 combiné avec des mesures de courant à l'aide d'un ADCP.

La Figure 6a présente la comparaison des deux méthodes pour les deux campagnes de mesure. Il est à noter que chaque point de mesure correspond à une moyenne de trois échantillons. On peut noter que même si des différences sont notables, les résultats restent très proches (différences inférieures à 10% à l'exception de quelques points près du fond). Il est à noter pour la campagne de décembre 2018 que les verticales avec les deux instruments ont été réalisées à la suite ; les différences observées sont sans doute dues à une variabilité de l'écoulement. Lors de la campagne d'avril 2020, chaque point de mesure a été réalisé avec les deux instruments à la suite ; les résultats sont plus proches. On

retrouve toutefois une plus forte dispersion des résultats pour la bouteille Van-Dorn (a priori lié à la mesure instantanée alors que le P61 intègre la mesure dans le temps) et une tendance légère à la surestimation par rapport au P61. Le Van-Dorn tend aussi à surestimer légèrement la granulométrie ; ceci pourrait être la conséquence de l'échantillonnage non-isocinétique. Il est à noter qu'un gradient vertical de la granulométrie est aussi observé avec un  $d_{50}$  allant de 90 and 200  $\mu\text{m}$  entre la surface et le fond.

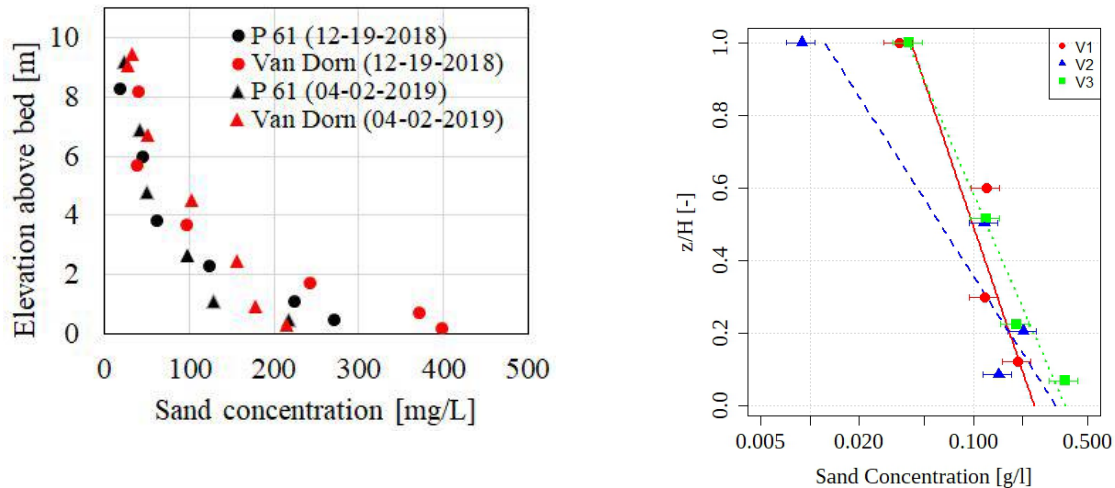


Figure 6 : Comparaison des concentrations mesurée avec la bouteille Van-Dorn et le préleveur P61 pour différentes profondeurs (gauche) et ajustement d'une loi exponentielle sur les profils verticaux de concentration (droite).

## 1.4. Une nouvelle méthode d'analyse des flux combinant mesure ADCP et échantillonnage ponctuel

Dramais et al. (2019) ont proposé une nouvelle méthodologie pour l'analyse d'un flux de sable en se basant sur une spatialisation des résultats grâce à la mesure ADCP.

### 1.4.1. Amélioration de la description du gradient de sable sur une verticale

Une amélioration proposée pour le dépouillement des données de concentration est de non pas calculer directement le flux en multipliant les données de concentration mesurées (préleveur) avec les données de vitesse mesurées (ADCP) mais de préalablement ajuster un profil exponentiel sur les données de concentration (Figure 6b). En effet, en faisant l'hypothèse d'un coefficient de diffusion vertical constant sur la verticale, l'équation de conservation de la masse pour la concentration dans des conditions permanentes et uniformes se simplifie en une loi exponentielle :

$$C(z) = C_R \exp\left(\alpha \frac{z}{h}\right) \quad (3)$$

avec  $C_R$  la concentration de référence au fond et  $\alpha$  un coefficient à déterminer. Le profil vertical des vitesses peut être obtenu à partir d'une mesure ADCP en fixe permettant de moyennner dans le temps

la mesure. Ainsi le flux en suspension sur une verticale peut être estimé avec le pas d'espace de l'ADCP, soit sur un nombre relativement élevé de cellules.

$$\Phi = \sum_i u(z_i) C(z_i) dz_i \quad (4)$$

où  $i$  correspond à la cellule  $i$  de l'ADCP. L'intérêt d'une telle méthode est de permettre une atténuation des potentielles erreurs sur un point de mesure mais surtout de mieux extrapoler les concentrations près du fond où il n'est pas possible de mesurer alors que le gradient de concentration est très élevé.

Dramais et al. (2020) ont ainsi montré que cette prise en compte du flux solide proche du fond, exclu par les méthodologies américaines se basant sur un prélèvement intégré, pouvait accroître l'estimation du transport solide de 10 à 20%.

#### 1.4.2. Amélioration de la description du gradient de sable sur une verticale

Dramais et al. (2019) ont proposé une nouvelle méthodologie pour l'analyse d'un flux de sable en se basant sur une spatialisation des résultats grâce à la mesure ADCP. Le flux solide de sables en suspension  $Q_s$  [kg/s] peut ainsi être calculé selon l'équation suivante :

$$Q_s = \sum_{j=0}^{m+1} \sum_{i=0}^{n+1} C_{ij} u_{ij} dy_j dz_i \quad (5)$$

où  $C_{ij}$  [kg/m<sup>3</sup>] et  $u_{ij}$  [m/s] sont les concentrations et vitesses estimées sur chacune des cellule  $(i,j)$  de largeur  $dy_j$  et de hauteur  $dz_i$ . Les zones non mesurées par l'ADCP, aux bords ( $j=0, j=m+1$ ), au fond ( $i=0$ ) et en surface ( $i=n+1$ ) sont incluses dans le calcul. La vitesse  $u_{ij}$  est directement donnée par la mesure ADCP (extrapolation selon une loi puissance) alors que  $C_{ij}$  est estimée à partir des prélèvements.  $C_{ij}$  peut être estimée sur la base d'une interpolation entre les mesures (ou attribution de la valeur mesurée la plus proche), voire une extrapolation au fond selon une loi exponentielle comme discuté plus tôt. Mais surtout, une telle méthode permettrait une meilleure interpolation / extrapolation latérale des profils mesurés en supposant par exemple que la concentration au fond varie en fonction de la contrainte locale, voire en fonction du taux de rétrodiffusion acoustique mesuré.

La Figure 7 présente une comparaison de résultats d'un dépouillement d'un jaugeage solide selon deux hypothèses de traitement des concentrations. Dans le premier cas (Figure 7a), la concentration pour chacune des cellules est estimée en lui attribuant la valeur mesurée la plus proche. Dans le second cas, la concentration est estimée pour chacune des cellules selon la méthodologie décrite ci-dessus, soit après un ajustement des concentrations mesurées sur les verticales de mesure pour estimer  $C_R$  et  $\alpha$ . Pour chacun des ensembles (verticales) ADCP,  $C_R$  et  $\alpha$  sont interpolés (extrapolés) selon les contraintes locales, soit selon la hauteur d'eau.

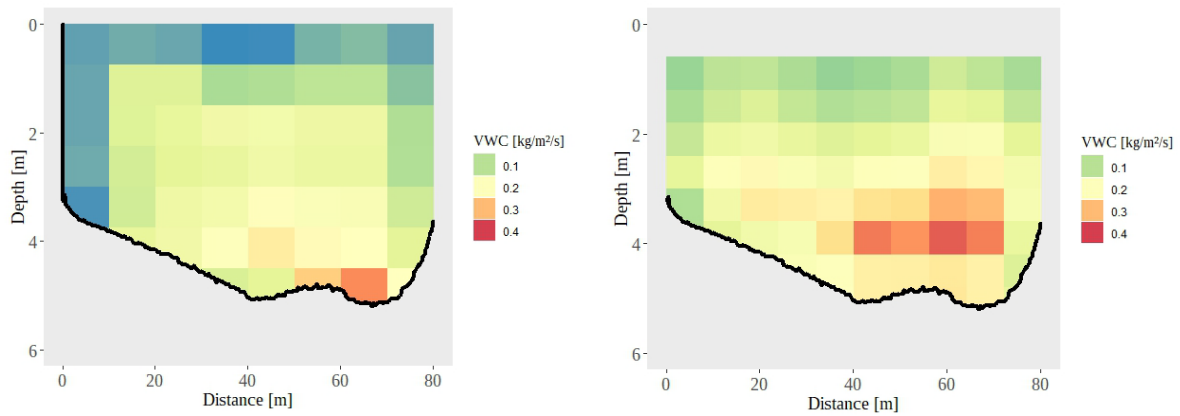


Figure 7 – Comparaison des résultats de flux solide pour un dépouillement d'un jaugeage sédimentaire sur le Colorado (RM31) avec une estimation du profil des concentrations sur une verticale selon la méthode du point le plus proche (a) et selon un ajustement de profil exponentiel sur la verticale (et avec une interpolation latérale selon la contrainte locale) (b).

## 2. MESURES DES FLUX DE SABLE PAR ANALYSE ACOUSTIQUE

Les développements méthodologiques présentés ici sont issus des résultats de la thèse d'Adrien Vergne (2015-2018).

### 2.1. Principes de l'analyse acoustique

Il s'agit de développer une méthode de mesure des flux de sédiments en suspension dans les grands fleuves, basée sur le principe du sonar – c'est-à-dire sur la rétrodiffusion acoustique par les particules en suspension. Ces techniques ont initialement été développées pour étudier les flux sédimentaires au fond de l'océan, et sont aujourd'hui relativement opérationnelles dans ce cadre. Les technologies hydroacoustiques présentent l'avantage d'une très bonne résolution spatiale et temporelle, tout en restant non-intrusives. Les jaugeages par ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) fournissent déjà des données de rétrodiffusion acoustique en quantité. En extraire des informations sur les flux sédimentaires constituerait une avancée scientifique et technique appréciable. C'est l'enjeu des recherches menées par Irstea Lyon-Villeurbanne dans ce domaine, avec les thèses de S. Moore (2011) et A. Vergne (2018) pour la mesure multi-fréquence (Aquascats).

Ces techniques commencent à donner de bons résultats (quantitatifs) pour mesurer la concentration des sédiments fins (argile, limon) – qui est généralement répartie de manière assez homogène dans la colonne d'eau. Ces techniques apportent aussi une information qualitative (information spatiale) intéressante sur les gradients de sable en suspension observés près du fond. L'obtention d'une information quantitative sur le sable est encore délicate ; les travaux actuellement menés à INRAE visent à mieux comprendre les processus physiques en œuvre et à développer une analyse plus fine du signal de rétrodiffusion en rivière afin de progresser vers une méthode quantitative.

Les travaux d'Adrien Vergne (2018) ont permis plusieurs avancées sur l'analyse acoustique. Une analyse de la performance des modèles acoustiques existants pour le cas de sédiments fins naturels ainsi que deux nouvelles méthodes d'inversion adaptées à ce type de sédiments. Ce travail a été réalisé à partir de données récoltées dans une cuve en laboratoire, dans laquelle des sédiments fins du Rhône ont été mis en suspension. Un exemple de résultat d'inversion du signal acoustique avec une des méthodes mise au point est présenté dans la Figure 8.

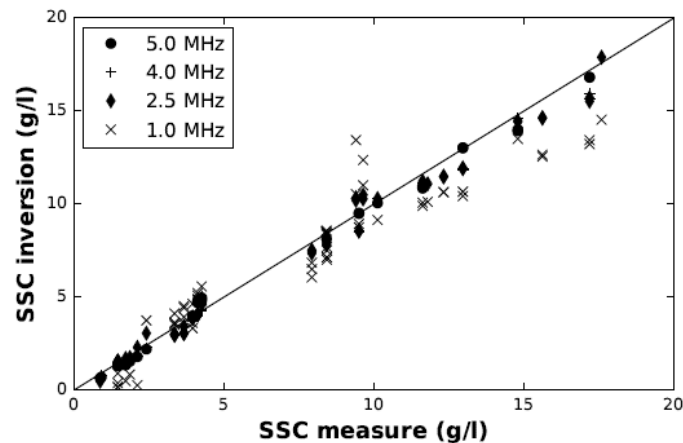


Figure 8 – Exemple de résultat d'inversion du signal acoustique (concentration mesurée vs. concentration estimée à partir du signal acoustique) obtenue avec une méthode d'inversion développée dans la thèse d'A. Vergne (2018)

Un état des lieux sur les processus physiques à l'origine du signal de rétrodiffusion acoustique mesuré en rivière. Jusqu'à présent, les études hydroacoustiques réalisées en rivière ont largement adopté une approche empirique, et il n'existe pas à l'heure actuelle d'étude précise détaillant les mécanismes à l'œuvre. Ces recherches ont notamment souligné l'importance de certains phénomènes généralement négligés : bulles d'air, cohérence du signal, etc. A faibles concentrations, de bons résultats ont été obtenus sauf près de la surface sans doute dû aux microbulles. A fortes concentrations, l'inversion du signal a pu être réalisées pour les limons et sables à l'exception de certaines zones proches du fond où l'atténuation était trop élevée

## 2.2. Application au Rhône à la confluence avec l'Isère

Une synthèse des informations qualitatives que l'on peut d'ores et déjà tirer des mesures de rétrodiffusion en rivière (Vergne et al, 2020 ; 2021a, soumis). Ces informations concernent par exemple la localisation des gradients de sable, et une première quantification des concentrations par inversion acoustique comme illustré sur la Figure 9.



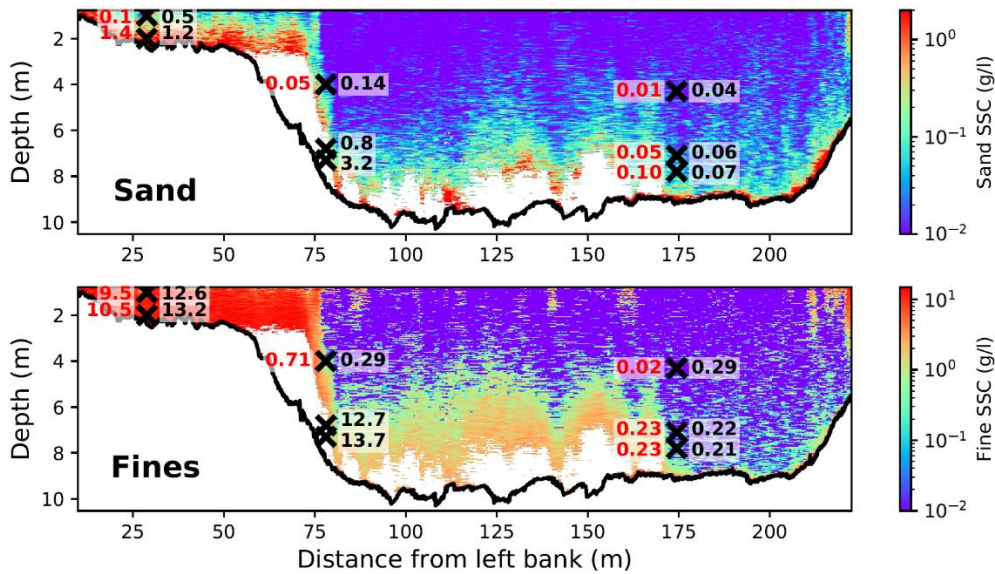


Figure 9 – Concentration en suspension de sédiments fins (haut) et de sables (bas) obtenue par analyse multi-fréquence avec l’Aquascats (données de retrodiffusion de 0.3 MHz à 1 MHz) à la confluence entre l’Isère et le Rhône lors des chasses de la basse Isère de janvier 2018. La localisation des points de mesure est figurée par une croix avec en rouge la concentration mesurée (en g/l) et en noir la concentration issue de l’inversion acoustique. Les zones blanches indiquent l’absence de données.

### 3. CONCLUSION

Les travaux d’Adrien Vergne (2018) sur les possibilités de l’acoustique pour la mesure des sables en suspension sont très prometteurs même s’ils indiquent aussi les nombreuses difficultés et limites de la méthodologie. Trois articles de journaux (2 accepté, 1 soumis) sont issus de ces travaux et seront essentiels quant à la poursuite des travaux.

Des améliorations du protocole de mesure d’un flux sableux par combinaison de prélèvements et mesure ADCP ont été réalisées dans la cadre de la thèse de G. Dramais et font l’objet d’un article de journal.

En lien avec les projets de mesure de la charge sableuse dans le cadre de l’OSR6, la thèse de Jessica Laible (2020-2023) a débuté fin 2020 sur un financement EDF-CNR. Elle porte sur la mesure des flux sableux et la compréhension de la dynamique sableuse sur la Basse-Isère avec pour objectif principale la mise en place d’une mesure acoustique en continue de la suspension sableuse. Une station hydro-acoustique a ainsi été montée à Grenoble ; les méthodologies proposées par Guillaume Dramais et Adrien vergne vont ainsi pouvoir être appliquées.

## 4. REFERENCES

---

- 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.
- Camenen, B. (2018). Guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide. Rapport Technique Irstea-AFB, 190 p.
- 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. (2019). 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. (2021). 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., Naudet, G., Dramais, G. Le Coz, J & Paquier A. (2019). A multi-technique approach for evaluating sand dynamics in a complex engineered piedmont river system. *Science of the Total Environment*, 657:485-497.
- De Angelis, R. (2019). Validation d'une mesure de la suspension de sable par pompage. Rapport stage PFE, Irstea-ENSE3, 48 p.
- Deville-Cavellin, L. (2020). Validation d'une mesure de la suspension de sable par pompage. Rapport stage Master, INRAE-Université Toulouse, 28 p.
- 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.
- Dramais, G., Camenen, B., Le Coz, J., Pierrefeu, G., Peteuil, C., Tretaud, 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., 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.
- FISP, Federal Interagency Sedimentation Project (1941). Study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams: report n°5: laboratory investigations of suspended sediment samplers. USACE / USGS / USDA / Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa, 100 p.
- Gray, J.R. & Landers, M. (2014). Measuring suspended sediment. *Comprehensive water Quality and Purification*. 159-204.

Le Coz, J. Vergne, A., Berni, C. & Pierrefeu, G. (2019). Measuring sediment suspensions in rivers using bi-frequency acoustic inversion. Proc. RCEM conference. Auckland, New Zealand.

Vergne, A. (2018), Mesure acoustique des sédiments en suspension dans les rivières, Université de Grenoble, thèse de doctorat

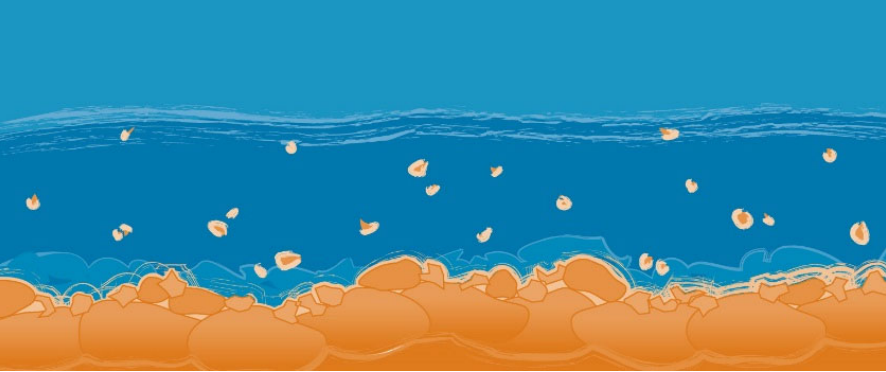
Vergne, A., Le Coz, J., Berni, C., Pierrefeu, G. (2020) Using a down-looking multi-frequency ABS for measuring suspended sediments in rivers, *Water Resources Research*, 56, e2019WR024877

Vergne, A., Berni, C., Le Coz, J. (2021a, submitted) Sound scattering by river suspended sediments: limitations of the solid particle theory, *Journal of Geophysical Research*

Vergne, A., Berni, C., Le Coz, J., Tencé, F. (2021b, submitted) Acoustic backscatter and attenuation due to river fine sediments: experimental evaluation of models and inversion methods, *Water Resources Research*.

Ward, J. R. and Harr, C. A. (1990). Methods for collection and processing of surface-water and bed-material samples for physical and chemical analyses. US Geological Survey.

Winterstein, T. A. & Stefan, H. G. (1983). Suspended sediment sampling in flowing water: laboratory study of the effects of nozzle orientation withdrawal rate and particle size. St Antony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota.



# Observatoire des Sédiments du Rhône

Plan  
Rhône  
Saône

RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

agence  
de l'eau  
RHÔNE MEDITERRANÉE  
CORSE  
établissement public de l'État

AVEC LE SOUTIEN DE L'UNION EUROPÉENNE

L'EUROPE S'ENGAGE  
pour le Rhône  
et la Saône  
avec le FEDER

UNION EUROPÉENNE

CAR

EDF

La Région  
Occitanie  
Pyrénées - Méditerranée

RÉGION  
SUD  
PROVENCE  
ALPES  
CÔTE D'AZUR

La Région  
Auvergne-Rhône-Alpes

cnrs

EVS  
Environnement  
Vie Société

cerege  
CENTRE EUROPÉEN  
DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT  
DES GÉOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

INRAE

ENTPE  
L'école de l'aménagement durable des territoires

IRSN  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Ifremer

mio  
Mediterranean Institute  
of Oceanography

ZA  
Zone  
Atelier  
LTER FRANCE BASSIN DU RHÔNE

ohm  
Observatoire Hommes-milieux - Vallée du Rhône

LabEx  
DRIHM

cnrs

INVESTISSEMENTS  
D'AVENIR

Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

[www.graie.org/osr/](http://www.graie.org/osr/)

Contact :

[bertrand.morandi@graie.org](mailto:bertrand.morandi@graie.org)