



HAL
open science

Quantification de la charge sableuse en suspension : élaboration d'une méthode de mesure combinant prélèvements et jaugeages ADCP

Thibault Vassor

► **To cite this version:**

Thibault Vassor. Quantification de la charge sableuse en suspension : élaboration d'une méthode de mesure combinant prélèvements et jaugeages ADCP. Sciences de l'environnement. 2022. hal-04081091

HAL Id: hal-04081091

<https://hal.inrae.fr/hal-04081091v1>

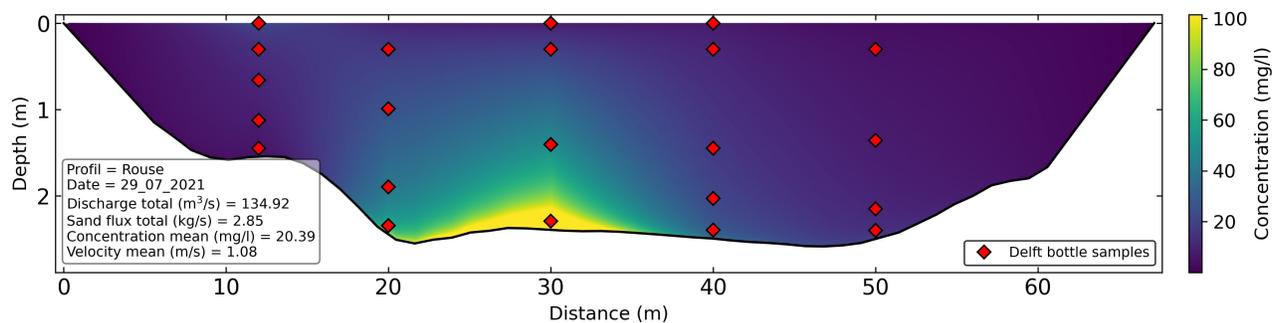
Submitted on 25 Apr 2023

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.

Public Domain

Quantification de la charge sableuse en suspension : élaboration d'une méthode de mesure combinant prélèvements et jaugeages ADCP



Thibault VASSOR

Tuteurs : Jessica LAIBLE
Guillaume DRAMAIS
Blaise CALMEL

Université Perpignan Via Domitia
Master 2 : Sciences de la Mer

Année : 2021 / 2022



Remerciements :

Merci à toute l'équipe RiverLy, pour votre accessibilité et l'ambiance qui règne au sein de INRAE. Plus particulièrement, merci à Benoit pour son aide sur les profils théoriques de concentration et à Bertrand pour sa relecture bienvenue. Merci également à toute l'équipe de stagiaire : Alexis, Floriane, Purnima, Bérengère, Margot, Amélie, Joséphine et Landry pour ne citer qu'eux. Merci à Felipe également.

Enfin un grand merci à Jessica, Guillaume et Blaise pour la qualité de leur encadrement et leur pédagogie, sincèrement, ce stage était tout aussi intéressant que plaisant à réaliser. Merci à eux également pour leur implication et leurs temps.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Contexte	4
3	Matériel et méthode	7
3.1	Zone d'étude	7
3.2	Prélevement et mesures in situ	7
3.2.1	Déroulement d'une campagne de mesure sur l'Isère à Grenoble Campus	7
3.2.2	Bouteille de Delft	9
3.2.3	US-P6	10
3.2.4	Seau	12
3.2.5	Capteur de pression autonome :	12
3.2.6	ADCP	12
3.3	Traitement et analyse en laboratoire	14
3.3.1	Masse sèche	14
3.3.2	Granulométrie	14
4	Structure et théorie du script	16
4.1	Exploitation brutes des données	16
4.1.1	Présentation générale	16
4.1.2	Initialisation des données	17
4.1.3	Traitement des données de pression	18
4.1.4	Traitement des données hydroacoustiques	19
4.1.5	Données granulométriques : différentes représentations	21
4.1.6	Calculs de concentration et de flux sableux	23
4.2	Méthodes de calcul de flux sableux	23
4.2.1	Méthode Nearest neighbour	24
4.2.2	Méthode Porterfield	25
4.2.3	Méthode Sand discharge computing	25
4.2.3.1	Présentation générale	25
4.2.3.2	Interpolation et extrapolation verticale	27
4.2.3.3	Interpolation et extrapolation latérale	28
5	Résultats	30
5.1	Nearest neighbour	30
5.2	Porterfield	30
5.3	Sand discharge computing	30
5.4	Comparaison des méthodes	32
6	Discussion	33
7	Conclusion	33

Bibliographie

36

8 Annexes

39

1 Introduction

Les processus d'érosion dans les bassins versant entraînent un transfert de sédiment vers l'aval. Les cours d'eau transportent effectivement des sédiments en suspension et par charriage. Les sédiments en suspension sont constitués de sable ($63 \mu\text{m} < d < 2\text{mm}$) et de particules fines ($d > 63\mu\text{m}$) [20]. La basse-Isère, localisée entre Grenoble et Bourg les Valence est aménagée par de nombreux barrages. Le flux sédimentaire important du fleuve implique d'effectuer des opérations de gestion pour libérer les sédiments bloqués par les barrages. Une mauvaise gestion des sédiments peut avoir des conséquences environnementales et financières dramatiques [5] [11], par exemple, lors de chasses des barrages en libérant trop de sédiments, pouvant entraîner une forte dégradation de la biodiversité fluviale, ou en étant obligé de gérer les sédiments par dragage [14], un processus très coûteux. Les gestionnaires de cours d'eau et de barrages s'intéressent donc aux flux de sédiments pour pouvoir anticiper d'éventuels problèmes liés à l'arrivée massive de sédiment et de sable en particulier. Quantifier les flux de sable de l'Isère est très complexe. En effet, caractériser sa distribution temporelle et spatiale constitue un enjeu de taille, notamment du fait de son transport par suspension graduée [8] qui va dépendre des conditions hydrodynamiques et de sa disponibilité dans le tronçon. De plus les campagnes de prélèvements sont particulièrement complexes et coûteuses à mettre en œuvre.

Un protocole a cependant été mis en place dans la thèse de Guillaume Dramais [6] pour mesurer et calculer le flux sableux à un instant donné. Ce calcul, appelé jaugeage solide, associe prélèvements in situ, mesures hydroacoustiques et ajustement par équations théoriques de concentration sableuse graduée. Les équations théoriques permettent d'obtenir un profil continu de concentration sur toute la hauteur d'eau par ajustement des points mesurés [7]. Les prélèvements se font par l'intermédiaire de préleveur, placé dans l'eau afin de récupérer des échantillons de sable. Les mesures hydroacoustiques s'obtiennent par l'intermédiaire d'Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), des appareils se basant sur le principe de l'effet Doppler, déterminant une vitesse locale de courant [15].

Le stage de master 2 s'insère dans ce cadre. Il s'est déroulé en deux parties, la première visant à faire l'acquisition sur le terrain et analyser en laboratoire les échantillons. La seconde, constituant la majorité du temps de travail, vise à coder un script Python pour calculer les jaugeages solides. Cette seconde partie peut se découper en deux sous-parties, la première axée sur l'exploitation brute des données terrain, la seconde sur l'interpolation et extrapolation des données afin d'obtenir un profil de concentration sur tout le cours d'eau.

Le plan du rapport va suivre cette dynamique, tout d'abord en présentant les matériels et méthodes, notamment la zone d'étude, les prélèvements in-situ, l'analyse et le traitement en laboratoire des échantillons. Une seconde va la structure et théorie du code, d'une part en traitant de l'exploitation brute des données et d'autre part en traitant des méthodes de calcul de flux sableux. Une dernière partie va présenter les résultats obtenus par les différentes méthodes de calcul et proposer des pistes d'amélioration pour le code Python.

2 Contexte

L'érosion, phénomène de dégradation et de modification des sols par l'action des pluies et du ruissellement entraîne une désagrégation des roches constituant le sable. Usuellement, la taille des particules de sable est comprise entre $63 \mu\text{m}$ (limon) et 2mm (gravier) [20]. Les particules inférieures au limon sont appelées particules fines. L'addition des particules fines et du sable est appelée matières en suspension (MES). Le sable va, sous l'action des précipitations, se retrouver entraîné dans les rivières puis, à terme, dans la mer. Ce transport de sédiments, appelé

transport solide ou débit solide s'effectue selon deux processus : le charriage et la suspension (cf. Figure 1). Le charriage correspond au déplacement par roulement ou petit saut (saltation) des particules les plus lourdes (sables, graviers) à proximité du sol. La suspension désigne les déplacements des particules sur de longues distances dans le cours d'eau. Lorsque les grosses particules se déplacent par suspension, un gradient de concentration croissant en direction du fond va se former, c'est la suspension graduée. En moyenne, 91 % du transport solide serait de la suspension [17].

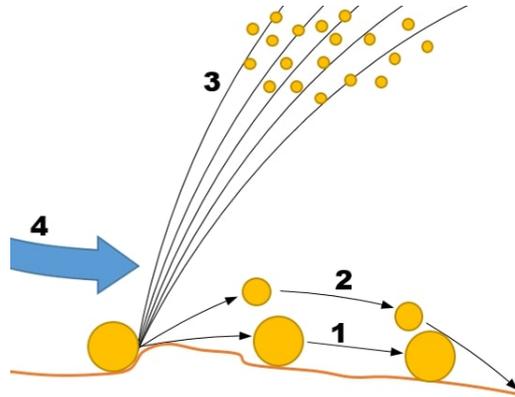


FIGURE 1 – Schéma des différents mode de transport des sables : 1-charriage, 2-saltation, 3-suspension, 4-sens du courant

La quantité de particules se déplaçant dans les cours d'eau, ou apport sédimentaire, se retrouve piégée et s'accumule en amont des barrages. Des ouvertures de barrage pour libérer les sédiments, appelées chasses, sont fréquemment réalisées. Lors de crues, des volumes important peuvent être déstockés : ce fut le cas en 2008, lors d'une crue décennale sur l'Isère, libérant plus de 4 Mt impliquant un coût financier important en dragage [14] [11]. De plus, le blocage du transit sédimentaire provoque des problèmes écologiques. Lors d'un équilibre sédimentaire, l'érosion provoquée par le courant est compensée par l'apport en sédiments. Lors d'un manque, les niches écologiques situées sur le lit du cours d'eau vont disparaître, entraînant un déséquilibre au sein des espèces fluviales. La directive cadre sur l'eau (DCE) vise à améliorer l'état écologique des cours d'eau en restaurant le transport sédimentaire. La gestion sédimentaire est donc primordiale pour réduire les impacts financiers et écologiques liés aux barrages hydroélectriques. Voilà pourquoi il est important d'obtenir des connaissances du flux sableux dans les rivières. Le calcul de flux sableux à un instant donnée, nommé jaugeage solide s'obtient par l'association de mesures de concentration, obtenues par traitement en laboratoire des échantillons, à un débit liquide, obtenu par données hydroacoustiques :

$$\Phi = C \times Q_w \quad (1)$$

avec Φ le flux sableux (kg/s), C la concentration de sédiments (g/l) et Q_w le débit liquide (m^3/s).

En 1940, plus de 60 échantillonneurs sont répertoriés [3]. Certains sont intégratifs, permettant un prélèvement continue sur toute la colonne d'eau, d'autres sont ponctuels, permettant d'échantillonner à un emplacement précis. C'est le cas de l'US-P6, dont une vanne permet d'ouvrir et fermer l'arrivée d'eau permettant le remplissage d'un flacon. D'autres préleveurs ont certaines spécificités, c'est le cas de la bouteille de Delft qui a la particularité de décanter l'échantillon pour obtenir directement une mesure du flux.

Les préleveurs sont pilotés depuis des câbles. La norme de référence [10] pour l'échantillonnage du flux sableux

préconise de fonctionner par échantillons distribués sur une même verticale (cf. Figure 2). Pour le positionnement sur ses verticales, les échantillons sont d'avantage distribués sur la moitié basse de la colonne d'eau afin d'obtenir une bonne caractérisation de cette zone.

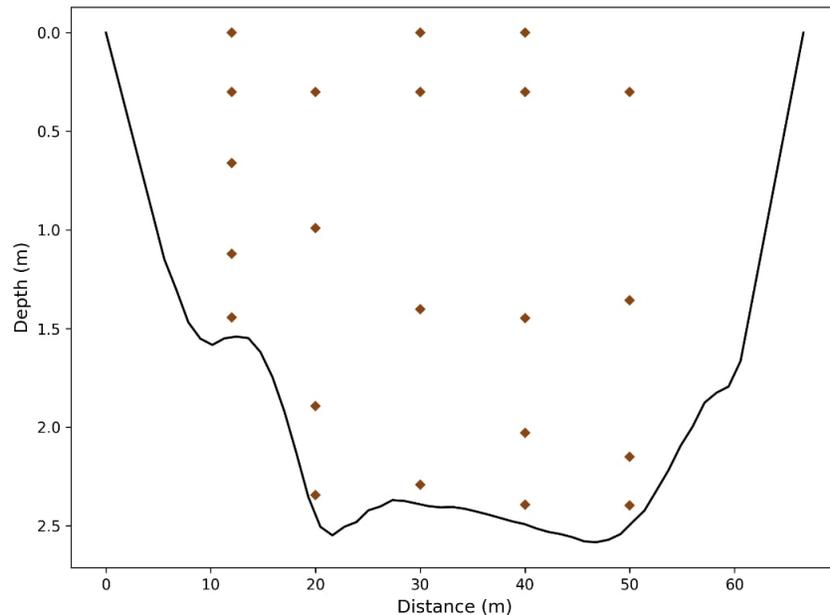


FIGURE 2 – Schéma de la distribution par verticale des échantillons

Une fois l'échantillon prélevé, il est classique de le tamiser pour séparer ou garder une fraction des grains, notamment en séparant les particules fines des sables. La plupart des échantillons actuels sont ensuite analysés pour connaître la concentration et la taille des grains. Concernant ce dernier point, l'une des techniques est d'utiliser la diffraction laser pour obtenir une représentation sous forme de table des tailles de grains, appelée distribution granulométrique. Ces données sont utilisées notamment pour obtenir la taille médiane des grains (D50).

Concernant les mesures de débit liquide, les profileurs acoustiques de vitesse par effet Doppler (ADCP) sont actuellement indispensables dans un contexte hydrométriques. Initialement utilisés dans les études océanographiques, ils prennent depuis les années 1990 une place importante dans le cadre fluvial [15] notamment en remplaçant les moulinets hydrométriques. Récemment, une méthode propose de placer l'ADCP sur un drone radiocommandé, l'idée est de réaliser des traversées perpendiculaires au sens du courant, ou transect. C'est une méthode efficace, fiable et rapide fournissant une couverture spatiale importante. Les données hydroacoustiques sont centrales dans la réalisation de jaugeages solides en fournissant une grande quantité de données comme la bathymétrie et les mesures de vitesses nécessaires pour obtenir le débit liquide. Le principe est de placer l'ADCP en subsurface pour mesurer la vitesse et la bathymétrie d'une section de cours d'eau. Des ultrasons sont envoyés depuis l'appareil et réfléchis par les particules et le lit du fleuve. La différence de fréquence permet d'obtenir une vitesse, en utilisant le principe de l'effet Doppler. Ce procédé se base sur l'hypothèse que les vitesses du courant et des particules sont identiques.

Actuellement, les protocoles de calcul de flux sableux sont variables. La concentration et le débit étant inhomogènes au sein d'une même section de cours d'eau [9], la quantification du flux de sable d'un fleuve passe par la connaissance de sa répartition spatiale. Nous allons donc présenter des méthodes de calcul de flux sableux qui ont en commun d'effectuer des prélèvements d'échantillons puis d'interpoler et d'extrapoler ces données sur toute la section de cours d'eau. L'interpolation et l'extrapolation permettent d'acquérir des données continues

respectivement entre et au-delà des points d'échantillonnage.

La méthode de mesure de flux sableux standard, attribuant une concentration unique à toute la colonne d'eau est limitée par le nombre d'échantillon de mesure et l'exclusion de la concentration de la zone proche du fond. Cette méthode utilisée par l'institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) est nommée « Porterfield » (PF) [19]. Une nouvelle méthode de calcul de charge sableuse, « Sand Discharge Computing » (SDC) a été proposée [6], se basant sur la combinaison des échantillonnages ponctuels ajustés par des profils théoriques de concentration et des mesures ADCP avec différentes options de calcul. Les profils théoriques permettent [7] d'obtenir une concentration continue sur une verticale d'échantillonnage à partir d'échantillons distribués.

L'utilisation d'un script Python (regroupement de programmes) est nécessaire pour automatiser les différents calcul et obtenir les graphiques de modélisation. Python est un langage de programmation créé en 1989 par Guido van Rossum, du fait de sa relative facilité d'utilisation, sa polyvalence, ses bibliothèques variées et de sa communauté nombreuse et active, Python est un langage extrêmement populaire. Un script a été développé durant ce stage dans le but de modéliser des méthodes de quantification du flux sableux. Cependant, pour les appliquer, il est nécessaire d'avoir obtenu, traité et mis en forme les données liées à leurs application. De ce fait, une première partie importante du code Python consiste à récupérer et traiter les données brutes de terrain.

Une seconde partie concerne les méthodes de calcul de flux sableux, en plus de la méthode PF et SDC, d'autres plus simples à mettre en œuvre mais néanmoins performantes ont été codées. C'est le cas de la méthode « Nearest Neighbour » (NN), utilisée dans le cadre de la thèse de Dramais (Dramais 2020) ayant pour principe d'appliquer la concentration de chaque échantillon à une zone proche spatialement du lieu de prélèvement ainsi que les méthodes « SDCV » servant de prémisses à la méthode « SDC » et « Pré-Porterfield » (pré-PF), une prémisse de la méthode PF.

3 Matériel et méthode

3.1 Zone d'étude

Affluent majeur du Rhône, l'Isère s'étend du massif des Alpes, sur la commune du Val-d'Isère à une altitude d'environ 2900 m puis passe par les massifs de la Chartreuse et du Vercors pour confluer avec le Rhône au Nord de Valence (cf. Figure 3) après avoir parcouru 286 km [12]. Son bassin versant couvre une zone de 11890 km² et son débit moyen est de 333 m³/s [16].

Notre zone d'étude se situe sur deux sections de l'Isère à Grenoble. L'une au niveau du pont reliant le parc de l'île d'amour au campus universitaire, l'autre sur la traille, un câble servant à transporter un préleveur, reliant les deux rives situé 130 m en aval (cf. Figure 4).

3.2 Prélèvement et mesures in situ

3.2.1 Déroulement d'une campagne de mesure sur l'Isère à Grenoble Campus

Le but d'une journée de prélèvement à Grenoble campus est d'effectuer des jaugeages solides au niveau du pont et de la traille. La différence entre ces deux sections est le support permettant de manipuler les préleveurs.

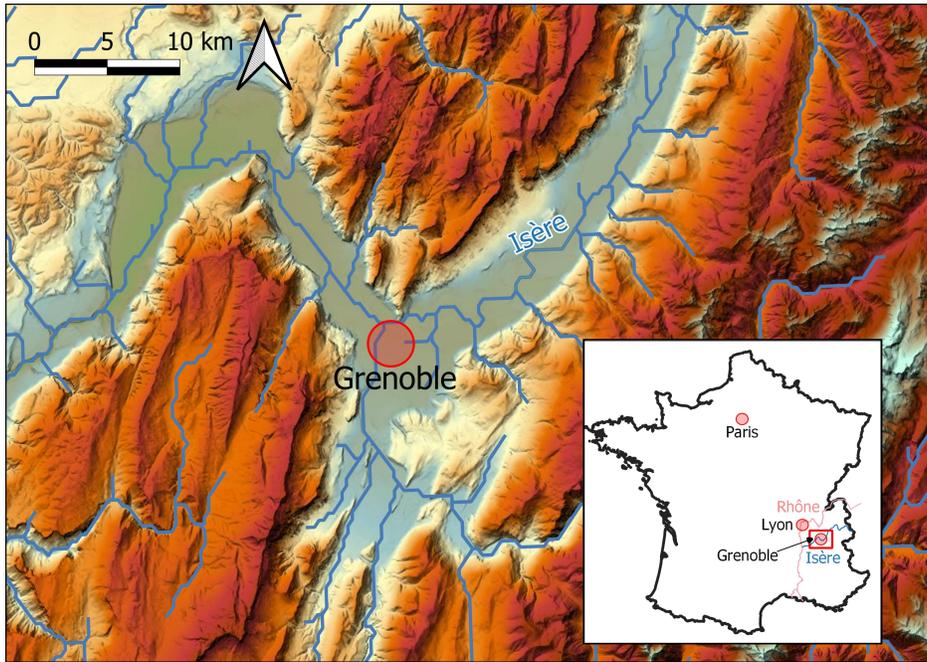


FIGURE 3 – Carte de la zone d'étude

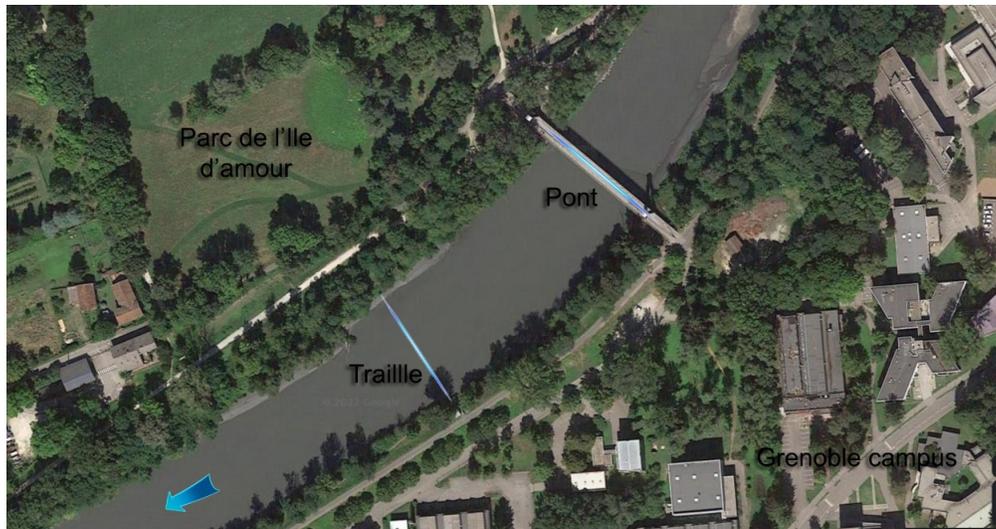


FIGURE 4 – Image de présentation des deux sections de la zone d'étude

Sur le pont, un camion grue est disposé afin de manipuler de lourdes charges, comme la bouteille de Delft (BD). En revanche, la traîle est un câble reliant les deux rives de l'Isère, seuls des préleveurs légers, comme l'US-P6 peuvent être accrochés et transportés aux positions souhaitées dans la section de cours d'eau. Le poids conséquent du matériel est nécessaire afin d'évoluer dans un environnement à fort débit sans être emporté par le courant. Les préleveurs, par leur capacité à se mouvoir dans la majorité de la colonne d'eau sont l'outil principal pour obtenir des échantillons qui seront ensuite analysés en laboratoire. Un capteur de pression peut servir de complément en étant fixé sur le préleveur afin de connaître avec précision sa profondeur, par le biais de mesures de pression. En parallèle des échantillonnages, des mesures hydroacoustiques ont été effectuées en utilisant un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP).

3.2.2 Bouteille de Delft

La BD est constituée d'une structure en métal (20 kg) comportant un embout (buse) permettant de faire entrer eau et MES [4] (cf. Figure 5). La structure interne, via un système de chambres multiples, va permettre le dépôt de MES à l'intérieur par effet venturi (cf. Figure 6). Une dérivation se situe à l'arrière du support pour diriger le préleveur dans le sens du courant. Il est recommandé d'accrocher un capteur de pression autonome pour mesurer la profondeur d'immersion du préleveur durant l'échantillonnage. Toute cette structure est accrochée à un support (66 kg) permettant de placer la BD à une hauteur spécifique.



FIGURE 5 – Photographie de la bouteille de Delft avant mise à l'eau

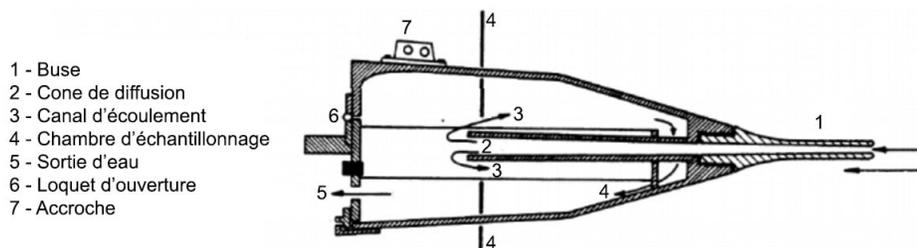


FIGURE 6 – Schéma de la structure interne de la bouteille de Delft

La BD permet de récupérer un volume de sable plus important que les autres préleveurs. Cependant les multiples chambres d'échantillonnage, ayant pour rôle de faire décanter les MES, ne piègent pas les particules fines (inférieures à 50 μm) car trop légères. Cette limite n'est pas un problème dans le cadre du stage car on cherche à quantifier le sable qui, par définition, est composé de grains d'un diamètre compris entre 63 μm et 2 mm. D'après Van Rijn [18], pour effectuer une mesure, il est nécessaire d'avoir une concentration supérieure à 10 mg/l et une vitesse inférieure à 2.5 m/s. Ces conditions conviennent à de nombreux cours d'eau, comme pour la Loire (Peters, 2002 [2]), le Mississippi (Beverage et Williams, 1989 [3]) ou le Danube (Dijkman et Milisic, 1982 [4]). Le manuel d'utilisation de la BD (ref) nous enseigne que l'air contenu dans le préleveur provoque une inclinaison permettant de ne pas prélever d'eau lors de la descente, qu'il faut laisser le préleveur échantillonner sur une durée de 5 à 10 minutes et qu'une remontée à une vitesse de 10 à 20 cm/s permet de ne pas récupérer de MES.

La BD est conçue pour obtenir un flux de sable surfacique. Pour cela nous utilisons la formule suivante :

$$\varphi = \alpha \times \frac{M}{S_{bu}T} \quad (2)$$

Avec φ le flux de sable surfacique ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), α le facteur de calibration variant entre 0.7 et 2.5, M la masse sèche de sédiment de l'échantillon (masse obtenue par retrait de l'eau contenue dans l'échantillon, en kg), S_{bu} la surface d'ouverture de la buse (m^2) et T la durée d'échantillonnage (s).

Il existe 4 buses, de diamètres et de formes différents, à adapter selon la vitesse du courant et la position du préleveur, la grande buse courbée est présentée avec la figure 4. Chaque buse possède ses propres valeurs de α , ce facteur de calibration est fourni par des abaques, il est fonction de la vitesse du courant (m/s) et du D50 du sable. Les abaques, sous format papier (cf. Annexe 39), ont été reproduite sur Python par ajustement de quelques points estimés graphiquement par l'équation :

$$y = ax^3 + bx^2 + c \quad (3)$$

3.2.3 US-P6

La P6 est constituée d'une structure métallique (45 kg) pouvant contenir un flacon. A l'avant du préleveur se trouve une buse ainsi qu'une électrovanne permettant de déclencher à distance l'arrivée d'eau dans le flacon (cf. Figures 9 et 8). Contrairement à la BD, les MES de toutes tailles sont récupérées par la P6. Pour effectuer des prélèvements, la vitesse du courant doit être comprise entre 0.46 m/s et 3 m/s et la profondeur entre 9 cm et 49 m. Si cette vitesse est trop importante, la force hydraulique trop importante entraîne une dérive vers l'aval du préleveur [2].

La P6 est conçue pour obtenir une concentration (g/l). Pour cela on utilise la formule suivante :

$$C = \frac{M}{V} \quad (4)$$

Avec C la concentration (g/l), M la masse sèche de sédiment de l'échantillon (g) et V le volume prélevé.

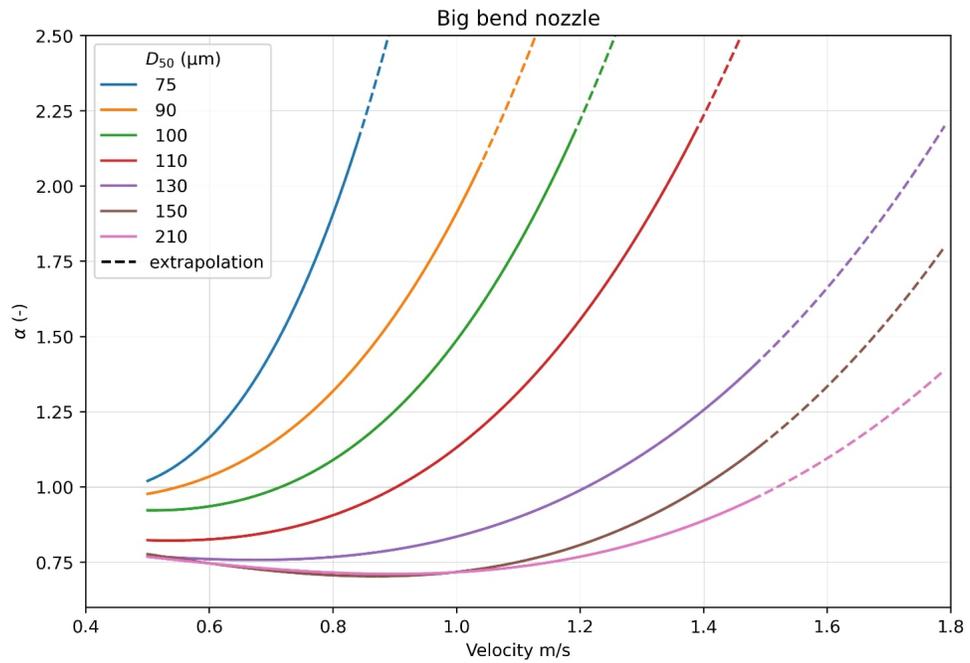


FIGURE 7 – Graphique tracé à partir de l’abaque de la grande buse courbée



FIGURE 8 – Photographie du préleveur US-P6 lors d’un prélèvement d’échantillon

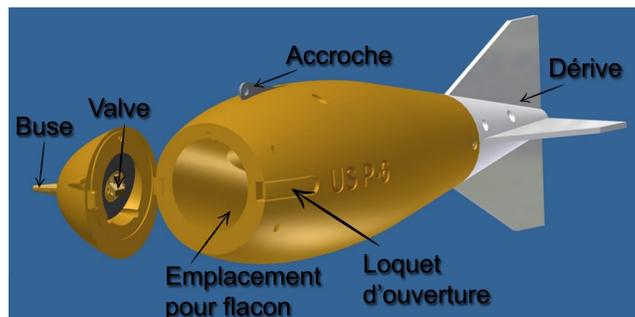


FIGURE 9 – Schéma de la structure du préleveur US-P6

3.2.4 Seau

Des échantillons de surface ont été prélevés en lançant un seau depuis le pont puis tamisé sur place à $63 \mu\text{m}$ pour ne conserver que les sables des MES. Ce procédé est facile à mettre en œuvre et complète les données obtenues par préleveur. Une concentration est obtenue en utilisant la formule 4

3.2.5 Capteur de pression autonome :

Un capteur de pression autonome est une sonde (11 cm par 2 cm) mesurant la pression avec un pas de temps prédéfini (2 s ou 10 s selon nos cas). Le capteur mesure une pression absolue P_{abs} , l'addition de la pression hydrostatique et atmosphérique P_{atm} . Ainsi, en retranchant la pression atmosphérique, il est possible d'obtenir la pression hydrostatique. Dans notre cas, l'hypothèse qu'1 m d'eau exerçant une force de 100 hPa est utilisée et P_{atm} est considérée constante pendant le temps de la campagne de mesure.

La profondeur du préleveur peut être retrouvée avec les formules suivantes :

$$z = \frac{P_{abs} - P_{atm}}{100} \quad (5)$$

avec z la profondeur (m), P_{abs} et P_{atm} respectivement les pressions absolues et atmosphérique (hPa).

3.2.6 ADCP

Un ADCP permet de mesurer la vitesse et la bathymétrie puis de calculer le débit de la section de cours d'eau [15] (cf. Figure 10). L'appareil émet une onde initiale f_i , réfléchi par le lit de la rivière et les particules présentes dans l'eau ce qui modifie sa fréquence en une fréquence de retour f_r [1]. Une vitesse est calculée à partir du décalage des fréquences $f_r - f_i$ (effet Doppler). Cette mesure de vitesse couplée à divers instruments, dont un compas et un inclinomètre permettent d'obtenir le débit avec une incertitude de 5 % [6]. Le GPS et le suivi par le fond (bottom track) sont deux moyens permettant à l'instrument de se repérer dans l'espace.

Les données, visualisées par Qrev, un logiciel de traitement de données ADCP (<https://hydroacoustics.usgs.gov/movingboat/Qrev.shtml>), sont illustrées avec la figure 11 par un profil de vitesse de rivière.



FIGURE 10 – Photographie d'un ADCP avant sa mise à l'eau

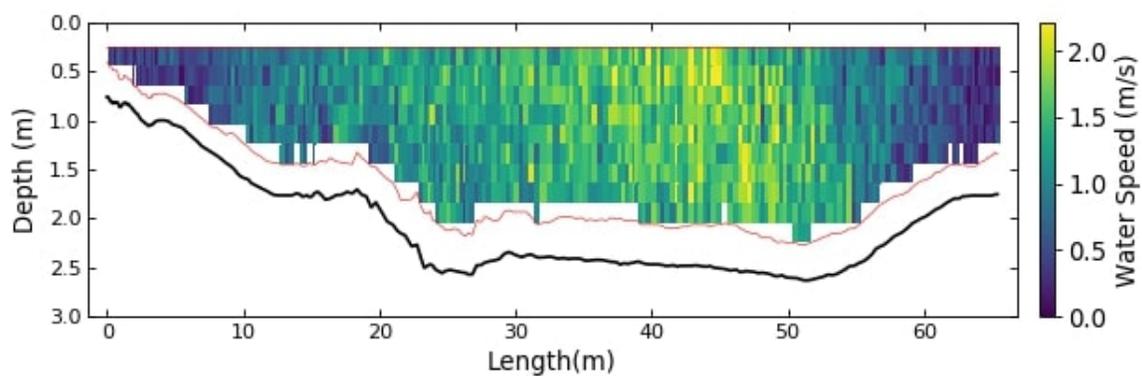


FIGURE 11 – Graphique de présentation des données hydroacoustiques sous forme de profil de vitesse par le logiciel Qrev

3.3 Traitement et analyse en laboratoire

Les échantillons prélevés sur le terrain sont analysés. Le but du travail en laboratoire est d'obtenir une masse sèche de sédiment. Les échantillons récupérés par la BD et le P6 étant différents, le traitement le sera aussi. Des analyses granulométriques ont également été réalisées sur certains échantillons dans le but d'obtenir le D50.

3.3.1 Masse sèche

Bouteille de Delft et seau : L'échantillon récupéré sur le terrain par la BD et le seau sont un mélange constitué de sable et d'une petite quantité d'eau. Les sables récupérés sont d'une taille supérieur à 50 μm , concernant la limite supérieur de la taille du sable, les échantillons sont filtrés à 2 mm par un tamis. Pour obtenir la masse sèche, l'échantillon doit être placé dans une étuve pour évaporer l'eau puis refroidit dans un dessiccateur avant d'être pesé.

US-P6 : Les échantillons récupérés par la P6 sont sous forme de flacon contenant des MES et de l'eau. Une mesure du volume est effectuée, puis une séparation des sables et particules fines par tamisage à 63 μm . Les deux fractions sont ensuite filtrées sur des filtres en fibre de verre puis placés dans l'étuve puis dans le dessiccateur pour obtenir une masse sèche (cf. Figure 12).



FIGURE 12 – Photographie de la de masse sèche d'un échantillon

3.3.2 Granulométrie

La granulométrie, par définition, permet d'obtenir la taille des grains d'un échantillon. Un granulomètre laser prêté par l'école nationale des travaux publics de l'état (ENTPE) a permis de mesurer, par diffraction de la lumière, des tailles de grains de 0,01 μm à 3500 μm (cf. Figure 13). L'idée générale est de disperser un échantillon dans une cuve contenant de l'eau à l'aide d'un agitateur et d'ondes ultrasons. Une partie représentative de l'échantillon va ensuite être analysée à l'aide d'un laser qui va traverser le liquide et diffracter au contact des particules. L'angle de diffraction sera différent en fonction des particules rencontrées, permettant d'en mesurer la taille. D'un point de vue pratique, une masse suffisante est nécessaire pour pouvoir effectuer une analyse au granulomètre laser (environ 1 g), ce qui n'était pas le cas de tous nos échantillons.



FIGURE 13 – Photographie d'un granulomètre-laser

Un tableau de distribution est délivré, représentant la proportion de chaque tailles des grains dans un échantillon. Le D10/D50/D90 correspondant respectivement à la taille granulométrique de 10 %, 50 % et 90 % des grains de l'échantillon sont obtenus par la distribution (cf. Figure 14).

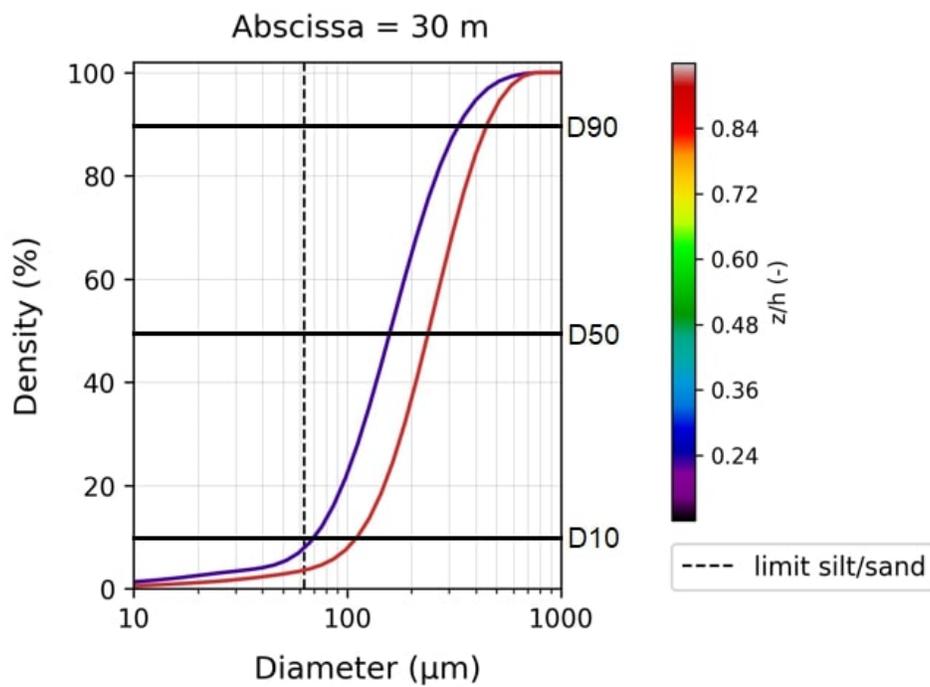


FIGURE 14 – Graphique de la distribution des grains d'un échantillon par densité cumulée.

4 Structure et théorie du script

4.1 Exploitation brutes des données

4.1.1 Présentation générale

L'exploitation des données brutes peut se représenter selon 3 axes présentés par la figure 15. Le premier concerne les données récupérées après l'échantillonnage et le traitement en laboratoire, ou données initiales. Cet axe sert de base en initialisant et présentant toutes les données nécessaires à la suite du travail. Se trouvent :

1. Les données récupérées sur le terrain, contenant les informations de base sur les échantillons dont la localisation (abscisse x et profondeur y en m), la masse sèche M_p (g) et le volume V_p (l) pour la P6 ainsi que la masse sèche M_b et le type de buse pour la BD.
2. Les données de pression (hPa) mesurées par le capteur autonome de pression.
3. Les données granulométriques, mesurées par le granulomètre laser, proposant une distribution ainsi que le diamètre moyen des grains (D50)
4. Les prélèvements de surface qui, à l'instar des données terrain, contiennent la localisation, la masse sèche M_s et le volume V_s des échantillons obtenues par le seau.
5. Les données hydroacoustiques auxquelles un pré-traitement est fait par le biais d'un script Python MAP, développé par Blaise Calmel (blaise.calmel@inrae.fr), le principe étant de moyenniser les différents transects ADCP effectués sur le terrain. Les données sont délivrées sous forme de cellules (appelées cellules MAP) de surface S_{map} (m²) couvrant toute la section du cours d'eau auxquelles une vitesse U (m/s) et un débit Q (m³/s) sont attribués, avec :

$$Q = U \times S_{map} \quad (6)$$

La bathymétrie de la section de cours d'eau est également retournée par le script MAP.

Dans un deuxième temps, plusieurs traitements sur les données initiales sont effectués. Les données de pression sont traitées pour obtenir la profondeur y et le temps de prélèvement T_p et T_b (s) de chaque échantillonnage. Une sélection s'effectue en appliquant des filtres pour détecter les échantillons caducs (prélèvement trop court et problème technique). Lors de l'utilisation d'un capteur autonome de pression, ce qui n'est pas toujours le cas, les données de profondeur et de temps de prélèvements estimés sur le terrain sont remplacées par celles, beaucoup plus précises obtenues par le capteur.

Concernant le traitement des données hydroacoustiques, une correspondance entre les positions des échantillons et des cellules MAP permet d'attribuer une valeur de vitesse et de débit Q_p et Q_b (m³/s) à chaque échantillon. Pour les échantillons obtenus par BD, le coefficient α est attribué en fonction de la vitesse U et du D50 de chaque échantillon en se référant aux abaques. De même, une surface (m²) en fonction du type de buse est également attribués.

Différentes représentations graphiques sont mises en place, notamment les données hydroacoustiques obtenues par

MAP, les données de pression, les abaques et les données granulométriques. Ces dernières font l'objet de différentes représentation concernant le D50 et la distribution granulométrique.

Un dernier axe présente les calculs pour l'obtention de la concentration et du flux sableux dans le cas d'échantillons obtenus par P6 et BD.

Partie 1 : Récupération et exploitation des données brutes

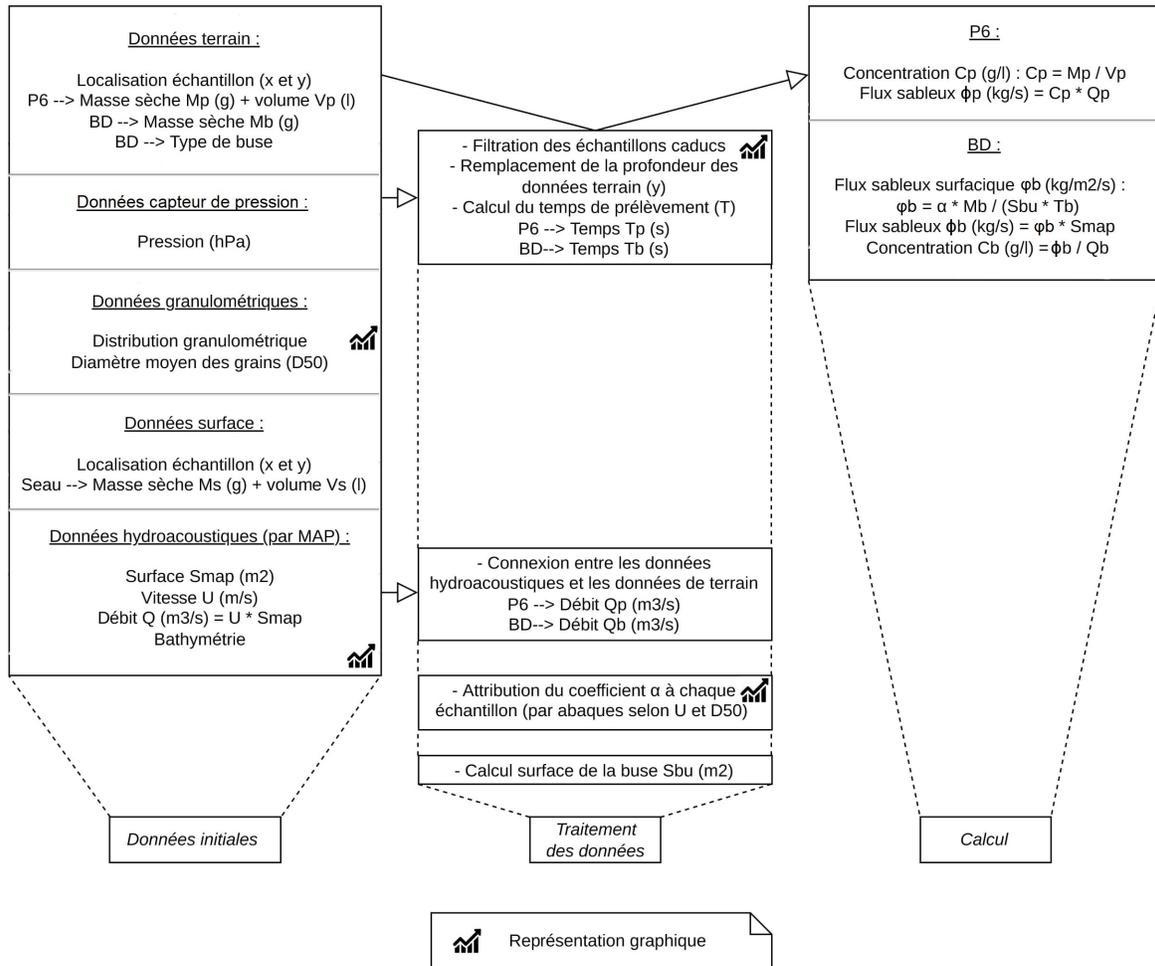


FIGURE 15 – Schéma récapitulatif de l'exploitation brute des données

4.1.2 Initialisation des données

Les données obtenues sur le terrain sont rendues sous forme de tableau (format CSV). Un maximum de 5 données d'entrée sont disponibles selon ce qui a été réalisé sur le terrain. Dans ce rapport, les résultats obtenus proviennent du jeu de donnée du 29-07-2021.

Un code Python est constitué d'un script principal faisant appel à d'autres scripts, appelées « fonctions » effectuant une action précise. Une fonction peut être appelée autant de fois que nécessaire.

En exécutant le script, la fonction « Choice » ouvre une interface utilisateur présentant les 5 données d'entrées (cf.

Figure 16). L'utilisateur doit alors valider les données dont il dispose. En fonction du résultat, le script appellera les fonctions nécessaires au traitement des données.

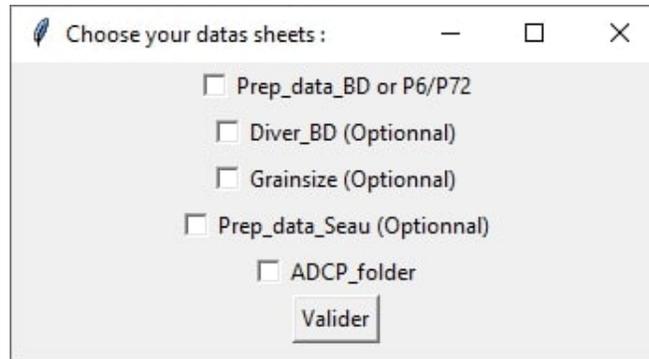


FIGURE 16 – Interface utilisateur des choix de données

Les données sont stockées au fur et à mesure dans un tableau récapitulatif (cf. Figure 17), chaque ligne correspondant à un échantillon. Respectivement, le type de préleveur (sampler), l'abscisse (abscissa), la hauteur (height et depth field), l'heure (time), les temps d'échantillonnage (down, up et filling time field), le type de buse (small nozzle) ainsi que la masse sèche (dry mass) sont représentés.

	ID	Sampler	Abscissa	Height_field	Depth_field	Time	down_time_field	up_time_fiefl	Filling_time_field	Small_nozzle	Dry_mass
0	1	BD	12	0.20000	nan	10:10:00	1.00000	nan	720	1	0.88100
1	3	BD	12	0.10000	nan	10:33:00	nan	nan	600	1	0.52000
2	5	BD	12	0.50000	nan	10:52:00	nan	nan	660	1	0.77600
3	7	BD	12	0.30000	nan	11:12:00	nan	nan	600	0	1.34500
4	8	BD	20	0.20000	nan	11:28:00	5.00000	6.00000	600	0	12.09300
5	10	BD	20	0.50000	nan	11:47:00	nan	6.00000	600	0	13.46200
6	12	BD	20	1.00000	nan	12:09:00	nan	nan	600	0	7.15100
7	14	BD	20	1.50000	0.20000	12:26:00	1.00000	1.00000	615	0	4.61900
8	15	BD	30	0.50000	nan	12:59:00	nan	nan	625	0	49.56000
9	17	BD	30	1.00000	nan	13:18:00	10.00000	4.00000	600	0	12.11400
10	19	BD	30	1.50000	0.20000	13:36:00	1.00000	1.00000	600	0	3.75800
11	22	BD	40	0.20000	nan	14:12:00	7.00000	nan	600	0	9.73500
12	24	BD	40	0.50000	nan	14:31:00	7.00000	nan	600	0	6.18500
13	26	BD	40	1.00000	nan	14:50:00	11.00000	4.00000	600	0	4.94100
14	28	BD	40	1.50000	0.20000	15:08:00	1.00000	1.00000	600	0	2.72100
15	29	BD	50	0.50000	nan	15:25:00	7.00000	10.00000	600	0	2.52300
16	31	BD	50	1.00000	nan	15:44:00	14.00000	nan	600	0	1.97600
17	33	BD	50	1.50000	0.20000	16:03:00	1.00000	nan	600	0	1.22800
18	35	BD	50	0.20000	nan	16:23:00	8.00000	nan	600	0	2.65600

FIGURE 17 – Tableau récapitulatif des donnée traité, interne au script Python.

4.1.3 Traitement des données de pression

Sur le terrain, certains échantillons peuvent être jetés, cependant, le capteur de pression autonome récupère des données en continu. Une fonction « pressure analysis » va avoir pour but, dans un premier temps, de définir les heures d'échantillonnage potentielles par analyse des pics de pression. Dans un second temps, un filtre va être appliqué par comparaison avec les heures d'échantillonnage de la feuille de terrain pour supprimer les pics de pression des échantillons jetés. Dans un troisième temps, pour chaque pic, sera récupéré la profondeur de l'échantillonnage et le temps de stabilité, de remontée et de descente du préleveur (cf. Figure 18).

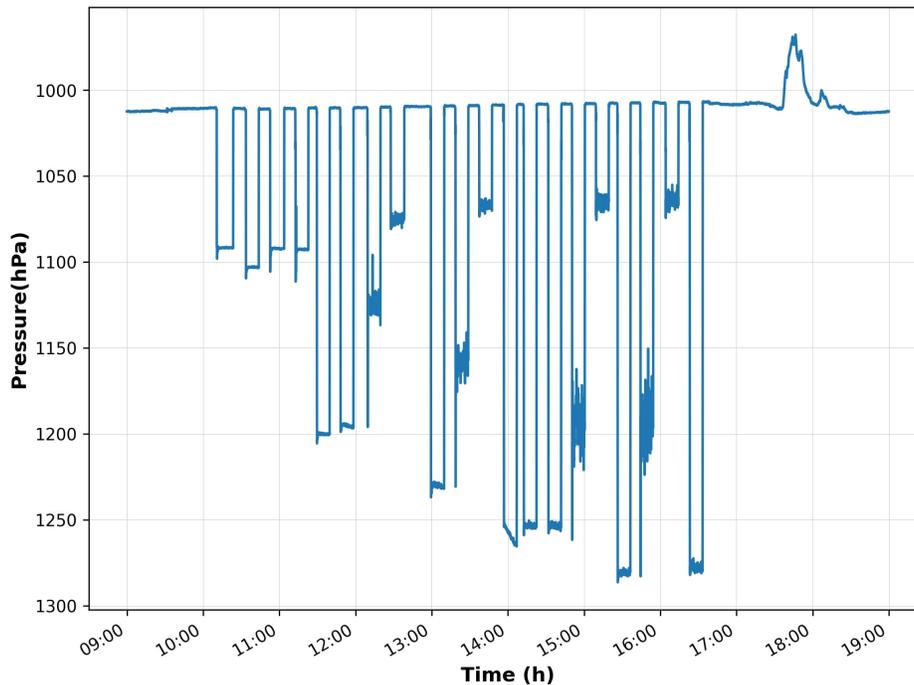


FIGURE 18 – Graphique des données de pression d'une journée de campagne de mesure

4.1.4 Traitement des données hydroacoustiques

MAP moyenne les transects effectués par drone sur le terrain et retourne un profil moyen de vitesse. Ce profil, délimité par la bathymétrie, est constitué de cellules avec une valeur unique de vitesse. Les scripts de MAP se basent sur ceux de Qrev, il est conseillé d'observer les données en amont sur ce logiciel afin d'utiliser efficacement MAP. Un certain nombre d'options s'offrent à l'utilisateur concernant la gestion des données ADCP (cf. Figure 19).

- Couramment, certains transects sont inutilisables, « Transect user » permet de choisir les transects à moyenner.
- L'ADCP peut se repérer dans l'espace de deux façons différentes. Par localisation GPS ou par tracking du fond de la rivière (BT).
- Les « nodes » correspondent à la taille des cellules retournées par MAP.
- Le dossier de sortie peut être nommé, couramment le nom comporte la date de la journée d'échantillonnage suivie des numéros de transects.

Le profil présenté par la figure 20 est un transect moyen (rouge) résultant d'une projection appliquée sur les différents transects effectués par drone sur le terrain (gris) (cf. Figure 21).

Les données ADCP sont sous forme d'un profil de vitesse représenté dans une coupe transversale de rivière. La vitesse primaire du courant, parallèle au sens du courant moyen, est représentée par un gradient de couleur tandis que la vitesse secondaire, perpendiculaire au sens du courant moyen, et sa direction par les flèches.

Sur le site d'étude de l'Isère, les vitesses les plus importantes (1.7 m/s) se situent dans la partie centrale haute de la section de cours d'eau avec une diminution progressive selon la profondeur (jusqu'à 0.7 m/s). La berge gauche, entre 0 m et 6 m et droite, entre 54 m et 67 m, ont des vitesses très faibles (< 0.3 m/s). C'est une tendance qui s'applique globalement à tous nos jeux de données.

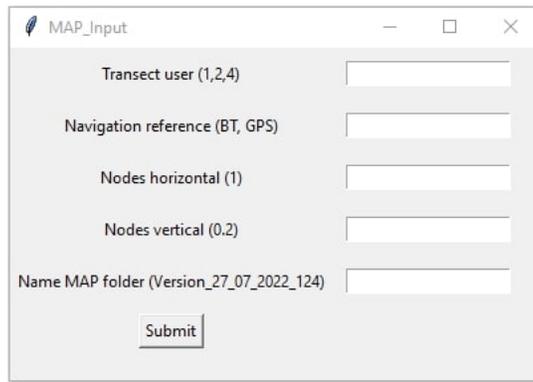


FIGURE 19 – Interface utilisateur pour traiter les options de MAP

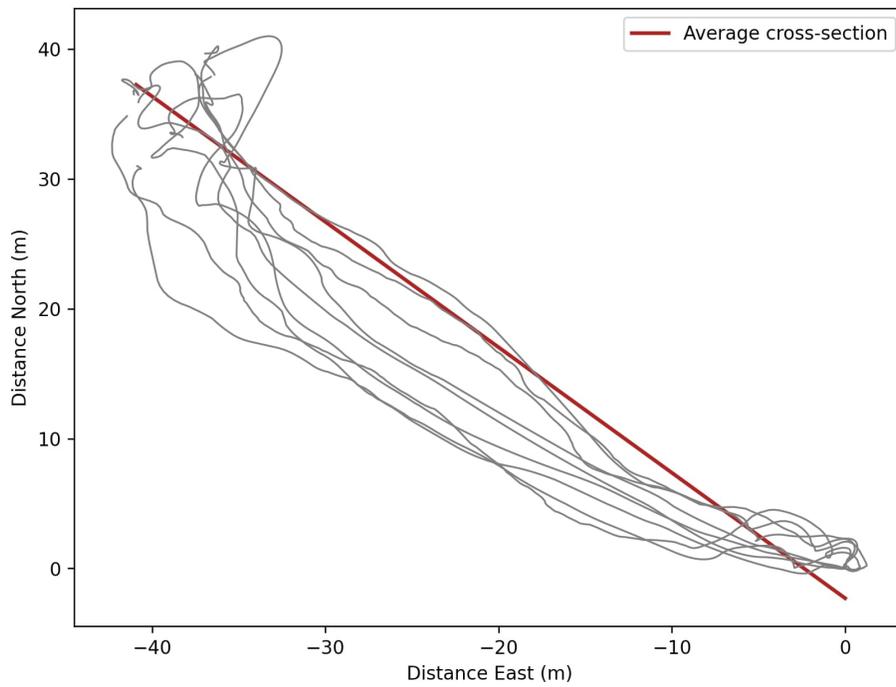


FIGURE 20 – Section moyenne transversale obtenue par MAP

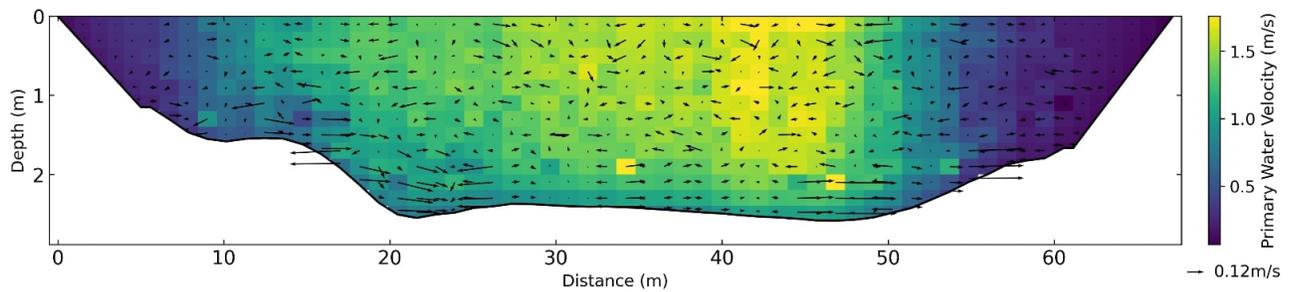


FIGURE 21 – Profil de vitesse obtenu par MAP

4.1.5 Données granulométriques : différentes représentations

Une fonction « grainsize analysis » calcule le D16 et D84 à partir du D10, D50 et D90 ainsi que certaines statistiques dont le coefficient d'asymétrie (skewness) et le kurtosis des courbes de densités granulométriques. Le diamètre moyen des grains (D50) est représenté par un gradient de couleur appliqué aux points d'échantillonnage. Deux représentations de la donnée sont proposées (cf. Figures 22 et 23), l'une avec les échantillons localisés à leur hauteur réelle et l'autre avec la hauteur normalisée par la hauteur de la colonne d'eau :

$$P_{nech} = \frac{z_{ech}}{h_{abs}} \quad (7)$$

avec P_{nech} la profondeur normalisée de l'échantillon, h_{abs} la hauteur d'eau de l'abscisse et z_{ech} la hauteur de l'échantillon.

Ces différentes représentations s'expliquent par la manière dont l'information a pour vocation d'être exprimée. Une vue réelle exprime une vision instantanée de l'état du fleuve tandis qu'une vue normalisée compare les données au sein des abscisses sans être influencée par sa profondeur maximale.

D'autres représentations sont fournies par le script, notamment une séparation par abscisse (cf. Annexes 40 et 41).

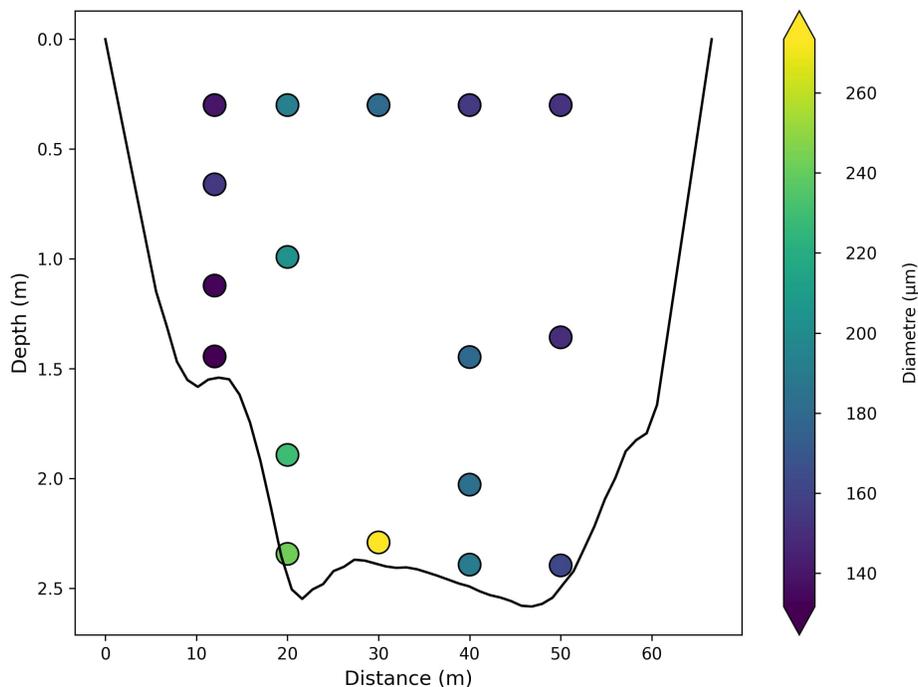


FIGURE 22 – Graphique du D50 au sein de la section de cours d'eau

Les distributions granulométriques sont représentées par des courbes de densités (cf. Figure 24). Un gradient de couleur exprime la profondeur normalisée de l'échantillon. La densité exprime la distribution de la taille des grains dans l'échantillon, la densité cumulée exprime la probabilité que la taille soit égale ou inférieure à une valeur. La limite (63 µm) entre le sable et le limon est représentée par un trait noir en pointillé.

Les informations entre les graphiques sont recoupables. Le point d'abscisse 30 m et de profondeur 2,3 m se démarque par son diamètre proche de 280 µm (en jaune figure 23). Sur la figure 24, le pic de sa courbe de densité pointe également vers 280 µm.

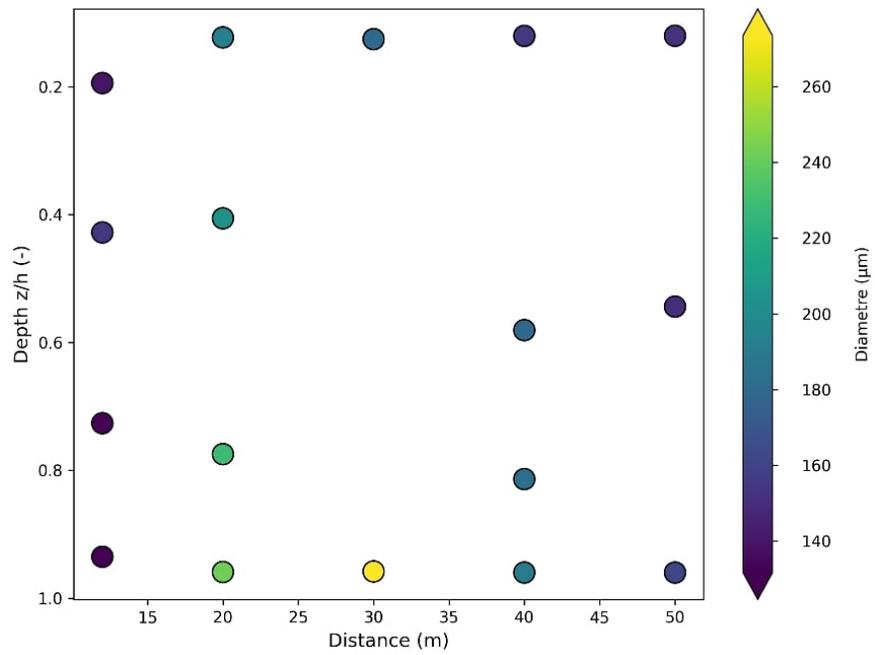


FIGURE 23 – Graphique du D50 selon une échelle de profondeur normalisée

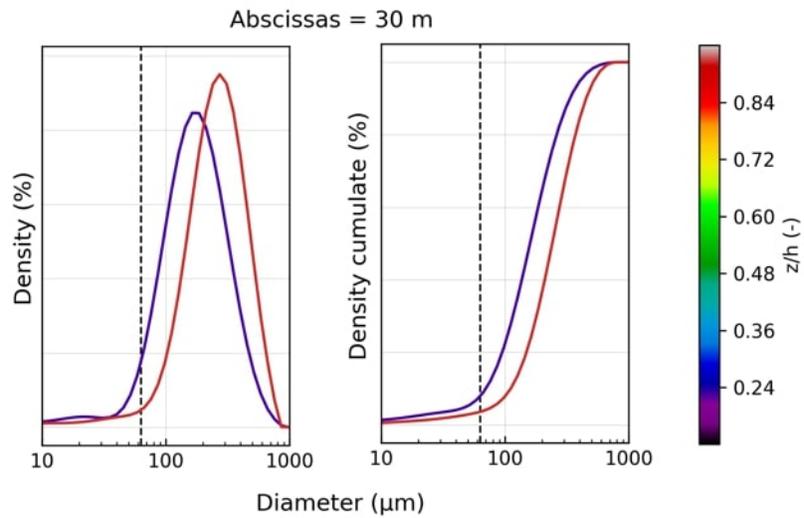


FIGURE 24 – Graphique de la distribution granulométrique en densité et densité cumulée de l’abscisse 30 m d’un échantillon

4.1.6 Calculs de concentration et de flux sableux

Pour les échantillons obtenus avec la P6, la concentration C_p (g/l) s'obtient par la formule suivante :

$$C_p = \frac{M_p}{V_p} \quad (8)$$

Le flux sableux Φ_p (kg/s) :

$$\Phi_p = C_p \times Q_p \quad (9)$$

Pour les échantillons obtenus avec la BD, la flux sableux Φ_b (kg/s) s'obtient à partir du flux sableux surfacique :

$$\Phi_b = \varphi_b \times S_{MAP} \quad (10)$$

La concentration C_b :

$$C_b = \frac{\Phi_b}{Q_p} \quad (11)$$

4.2 Méthodes de calcul de flux sableux

A partir de la première partie d'exploitation des données brutes, nous avons pu obtenir des données de concentration et de flux sur chaque échantillons distribués dans la section de cours d'eau. Les méthodes d'interpolation et extrapolation ont pour but d'obtenir, à partir de points, un profil continu de concentration. Pour cela le processus général utilisé est l'interpoler verticalement et latéralement.

Chacune des méthodes proposées dans cette partie vont suivre ce processus en se différenciant par leurs manières d'interpoler et extrapoler (cf. Figure 25).

La méthode NN interpole et extrapole verticalement et latéralement selon l'échantillon le plus proche où « voisins proches ».

Les méthodes pré-PF et PF pondèrent verticalement respectivement par la profondeur et la profondeur ainsi que la vitesse. Latéralement la concentration attribué est identique sur une distance x correspondant à la demi distance entre deux abscisses.

Les méthodes SDCV et SDC interpolent et extrapolent verticalement selon les équations théoriques exponentielles et de Rouse. Latéralement, la méthode SDCV utilise la demi distance, la méthode SDC une régression linéaire entre les verticales.

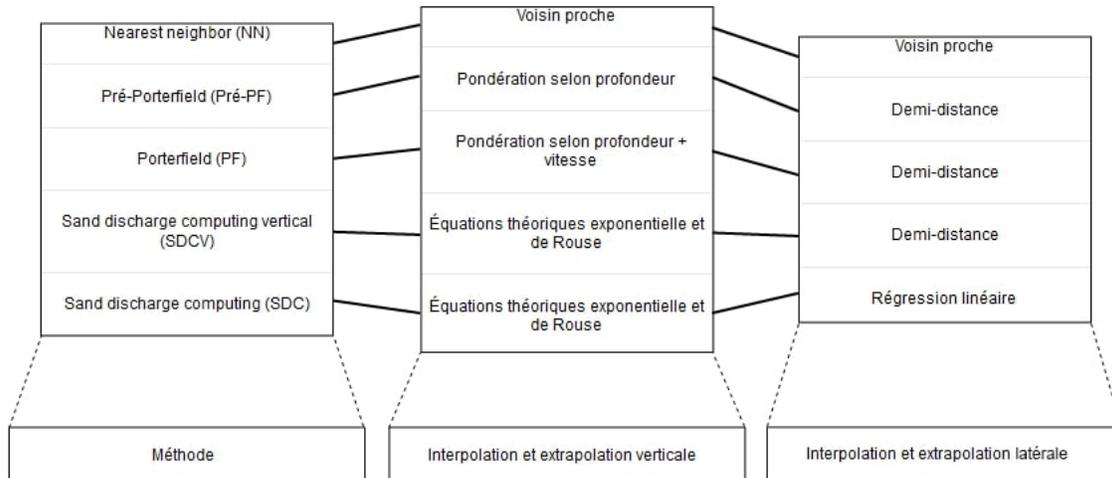


FIGURE 25 – Schéma récapitulatif des méthodes d'interpolation et d'extrapolation des méthodes de calculs du flux sableux

4.2.1 Méthode Nearest neighbour

Le principe de la méthode NN est d'appliquer à des sous-sections au sein du cours d'eau la concentration de l'échantillon le plus proche (cf. Figure 32). Le profil résultant se divise en cellules de concentration unique centrées sur un échantillon (cellules NN).

Lors d'un jaugeage solide, il est nécessaire de connaître la concentration et le débit. La méthode NN proposant des cellules de concentration, le débit sur cette surface doit être calculé. Pour cela, une superposition des cellules de concentration NN et de débit MAP permet de connaître les cellules MAP comprises dans les cellules NN (ces dernières ayant une superficie plus importante que les cellules MAP). Les débits des cellules MAP, dont le centre est situé dans la surface de la cellule NN, sont additionnés pour fournir une valeur de débit à chaque cellule NN (cf. Figure 26).

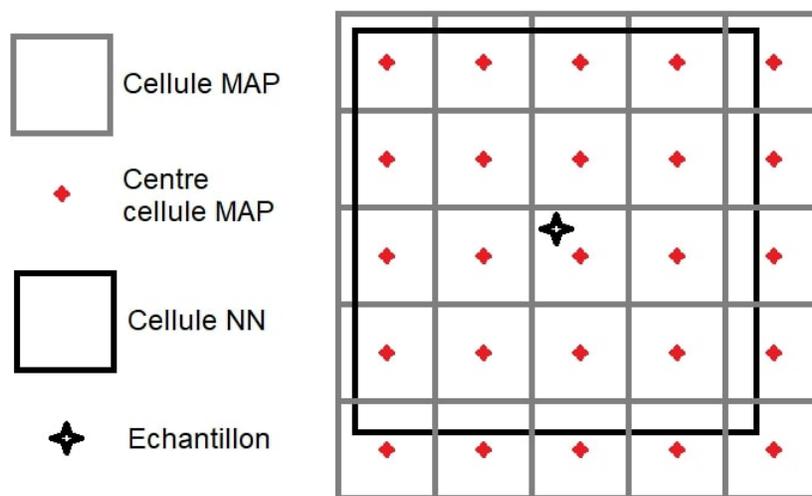


FIGURE 26 – Schéma récapitulatif de l'organisation des cellules NN et MAP

4.2.2 Méthode Porterfield

Ces méthodes ont pour but d'obtenir une concentration unique par pondération des échantillons d'une même abscisse [13].

La pondération par la profondeur se fait via la formule :

$$C_{pond} = (z_2 - z_1) \times \frac{C_1 + C_2}{2} \quad (12)$$

Avec z la profondeur, C la concentration des échantillons et C_{pond} la concentration pondérée par la profondeur. L'échantillon 1 étant au dessus de l'échantillon 2 sur la verticale.

Une concentration unique est obtenue par la moyenne des concentrations pondérées d'une verticale. Cette concentration est ensuite pondérée par la surface de la verticale. Une concentration unique de la section de cours d'eau est obtenue par la moyenne de ces concentration. La méthode Porterfield se distingue de la méthode pré-Porterfield par une pondération supplémentaire par la vitesse, obtenue par cette formule :

$$C_{pv} = C_p \times \frac{U_1 + U_2}{U_{moy}} \quad (13)$$

Avec C_{pv} la concentration pondérée par la profondeur et la vitesse, U la vitesse à l'emplacement de l'échantillon et U_{moy} la vitesse moyenne des échantillons de la section de cours d'eau.

4.2.3 Méthode Sand discharge computing

4.2.3.1 Présentation générale

Les nouvelles méthodes de calcul de charge sableuse SDCV et SDC se basent sur une combinaison de la concentration des échantillons distribués et du débit calculé par les mesures hydroacoustiques (cf. Figure 27) [6]. Des profils théoriques exponentiel [4] et de Rouse [7] permettent d'obtenir une concentration continue verticalement à partir des échantillons ponctuels. La méthode SDCV se distingue de la SDC par son mode d'interpolation et extrapolation latérale, respectivement par demi-distance et régression linéaire. Un jaugeage solide est obtenu en couplant les données de débit avec les valeurs de concentration, sur toute la section de cours d'eau.

Un jeu de donnée unique, daté du 29/07/2021, va être utilisé pour l'illustration dans ce rapport.

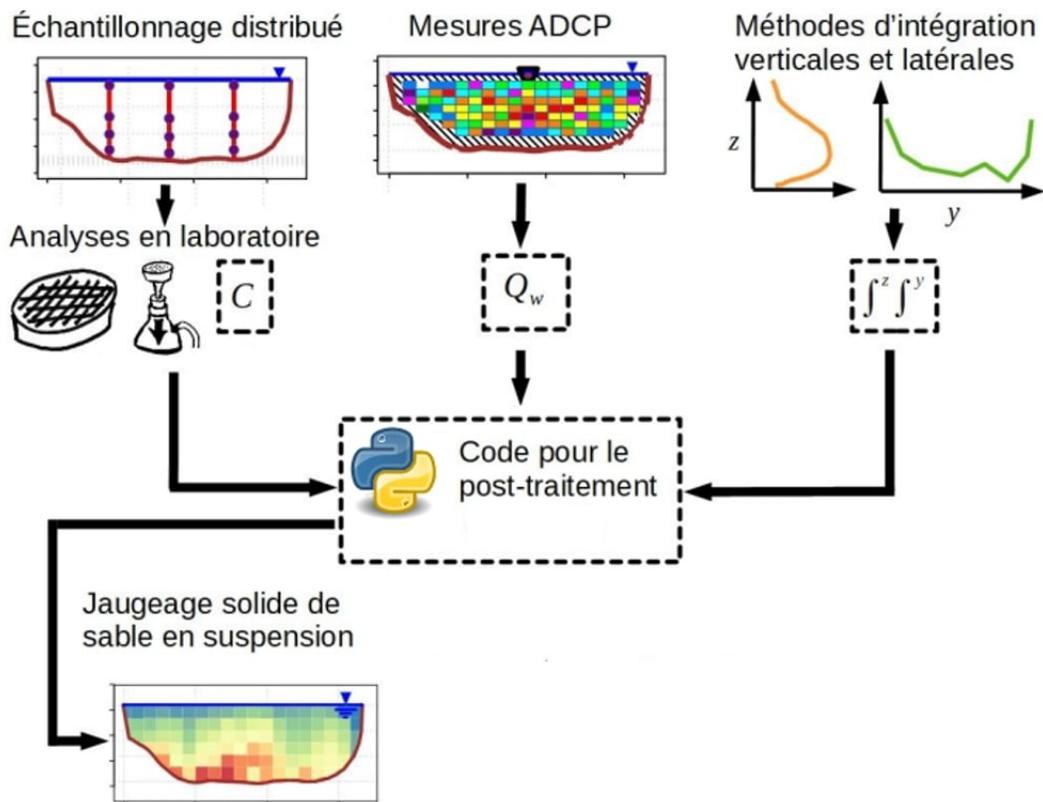


FIGURE 27 – Schéma récapitulatif du principe de fonctionnement de la méthode SDC

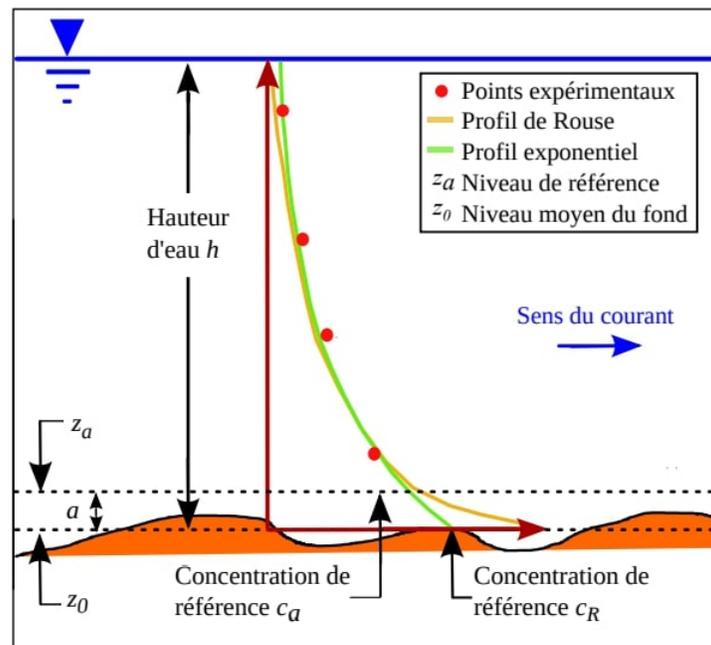


FIGURE 28 – Schéma des profils théoriques de concentration Rouse et exponentiel. La hauteur d'eau h correspond à la distance fond/surface. c_a est la concentration à l'altitude de référence z_a , incluse dans le profil de Rouse. c_r la concentration au point z_0 , incluse dans le profil exponentiel.

4.2.3.2 Interpolation et extrapolation verticale

Les profils théoriques permettent d'obtenir une concentration continue à partir d'échantillons distribués. La méthode de Rouse [7] est la plus répandue pour modéliser des profils théoriques sur une section de cours d'eau. Le profil exponentiel, utilisé par Camenen et Larson [4], est une alternative au profil de Rouse, les principales différences étant localisées en surface et au fond (cf. Figure 28).

Le profil de Rouse s'obtient par l'équation suivante (1) :

$$C(z) = C_a \left(\frac{z}{h-z} \frac{h-Z_a}{Z_a} \right)^\gamma \quad (14)$$

avec la concentration $C(z)$ à une hauteur donnée z , la hauteur d'eau h , l'altitude de référence $Z_a = 0.05 \times h$, C_a la concentration au point Z_a et γ le paramètre de Rouse.

C_a et γ sont obtenus à partir de l'équation 14, mise sous log 15 et en la considérant selon l'équation d'une droite $y = ax + b$ 16 :

$$\log C(z) = \log C_a + \gamma \log \left(\frac{z}{h-z} \right) + \gamma \log \left(\frac{h-Z_a}{Z_a} \right) \quad (15)$$

$$\log C(z) = \alpha_r \log \left(\frac{z}{h-z} \right) + \beta_r \quad (16)$$

Ainsi $\gamma = \alpha_r$ et $C_a = 10^{\beta_r - \gamma \log \left(\frac{h-Z_a}{Z_a} \right)}$

Le profil exponentiel s'obtient par l'équation suivante 17 :

$$C(z) = C_r \exp(-\theta z) \quad (17)$$

C_r et θ sont obtenues à partir l'équation 17, mise sous ln 18 et en la considérant selon l'équation d'une droite $y = ax + b$ 19 :

$$\ln C(z) = \ln C_r - \theta z \quad (18)$$

$$\ln C(z) = \alpha z + \beta \quad (19)$$

Ainsi $\theta = -\alpha$ et $C_r = \exp \beta$

Les coefficients α_r , β_r , α_e et β_e sont obtenues par régression linéaire de la concentration par la hauteur des échantillons d'une même abscisse sous log (cf. Figure 29).

Dans le cas d'une concentration inférieure en surface par rapport à la profondeur, α sera négatif et la courbe décroissante, c'est un cas assez rare qui s'explique par des échantillons très faiblement concentrés sur toute la verticale excepté en surface.

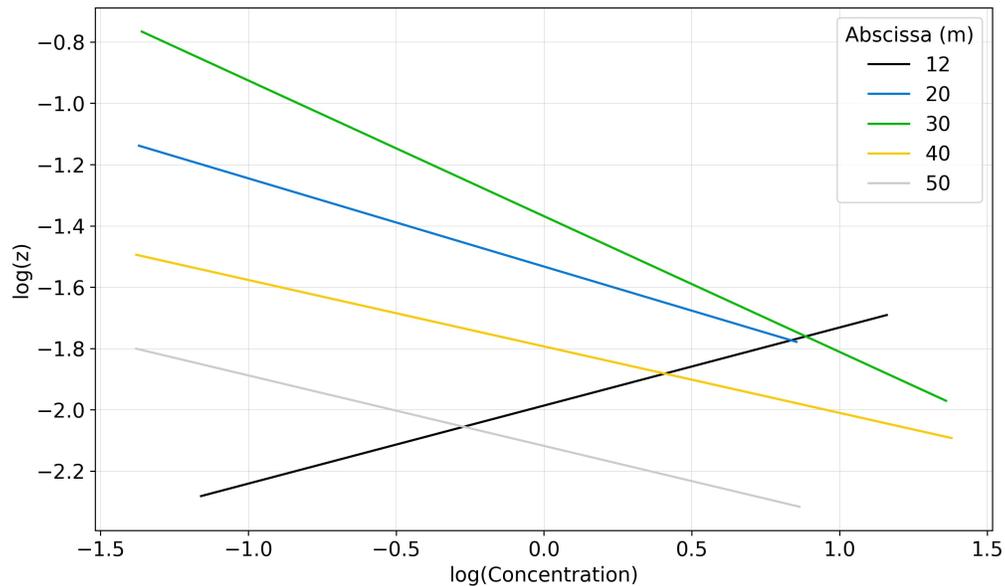


FIGURE 29 – Droite d'équation de type $y = ax + b$ obtenues par régression linéaires du log de la concentration par le log de la hauteur des échantillons d'une même abscisse.

Sur toute la hauteur de la colonne d'eau, une concentration continue est attribuée, représentée par les courbes noires, les points bleus représentant les échantillons. Les profils de Rouse semblent épouser les points d'échantillonnage de manière plus prononcée que les profils exponentiels (cf. Figure 30).

4.2.3.3 Interpolation et extrapolation latérale

Interpolation latérale : L'interpolation latérale (en bleu dans la figure 29) a pour but d'obtenir une concentration continue entre les abscisses d'échantillonnage (gris). Pour cela, une régression linéaire sur les coefficients α_r , β_r , α_e et β_e des profils exponentiels et de Rouse est effectuée afin d'obtenir des droites de valeurs continues des différents coefficients. Les méthodes de Rouse et Exponentielle sont ensuite appliquées à l'aide de ces valeurs interpolées pour obtenir une concentration.

Extrapolation latérale : L'extrapolation latérale (en rouge) suit le même principe que pour l'interpolation latérale. Cependant il n'existe pas de valeurs sur laquelle effectuer une régression linéaire, une hypothèse visant à attribuer une valeur de concentration nulle aux extrémités latérales (ou berges) est proposée.

La bathymétrie (en noir) est obtenue par les mesures hydroacoustiques.

Une fonction « interpolation SDC » calcule, pour chaque verticale, le coefficient α et β . La représentation des profils de concentration se fait par subdivision de chaque verticale par une grande quantité de cellules de hauteur différente. Les équations de Rouse et exponentielle sont ensuite appliquées pour chaque cellule. L'interpolation et extrapolation latérale suit le même principe, cependant en subdivisant chaque verticale par une grande quantité de verticale d'abscisse différente.

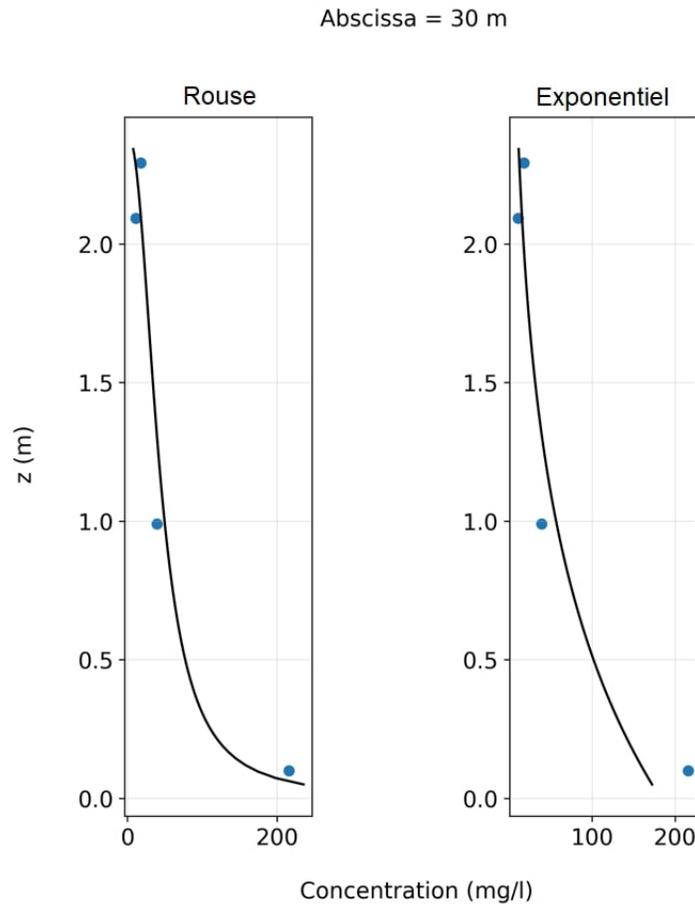


FIGURE 30 – Représentation des profils théoriques de concentration calculés pour la verticale 30 m par les méthodes de Rouse et exponentiel

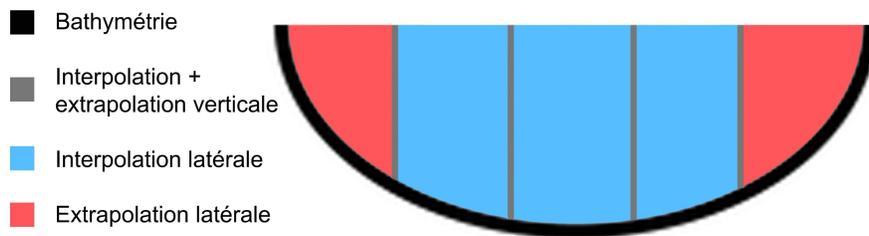


FIGURE 31 – Schéma récapitulatif de l'interpolation et extrapolation verticale et latérale

5 Résultats

5.1 Nearest neighbour

La méthode NN présente un profil de concentration divisé en cellules centrées sur les échantillons (cf. Figure 32). La concentration de la cellule du fond de l'abscisse 30 m est jusqu'à 10 fois supérieure par rapport aux cellules des berges. L'échantillon de surface en abscisse 12 m se distingue par une concentration qui semble être 2 à 3 fois supérieurs à celles des autres échantillons de la verticale. Cette méthode est visuellement pratique pour distinguer des points extrêmes pouvant être aberrants.

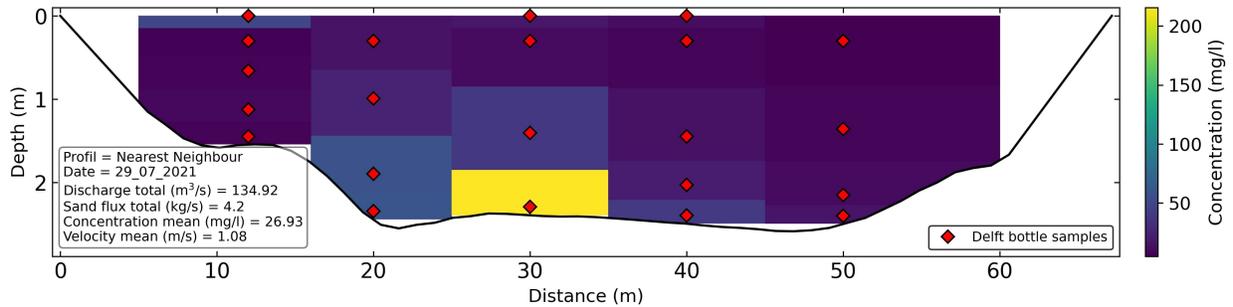


FIGURE 32 – Profil de concentration obtenu par la méthode NN

5.2 Porterfield

Les méthodes Porterfield et pré-Porterfield présentent des surfaces de concentration unique centrées sur les verticales de prélèvement, à l'exception des berges auxquelles la concentration s'applique jusqu'à l'extrémité de la section de cours d'eau (cf. Figures 33 et 34). La surface basée sur l'abscisse 30 m est fortement concentrée, avec un facteur 6 par rapport aux berges.

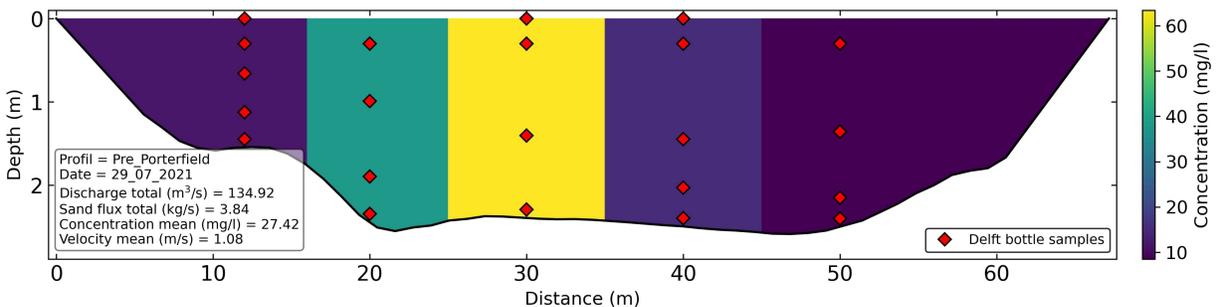


FIGURE 33 – Profil de concentration obtenu par la méthode pré-PF

5.3 Sand discharge computing

Interpolation et extrapolation verticale : la concentration obtenue par les profils théoriques de concentration est présentée par les figures 33 et 34. Elle est particulièrement importante sur le fond de la verticale 30 m en atteignant des concentrations de 150 mg/l et 130 mg/l respectivement pour le profil exponentiel et de Rouse.

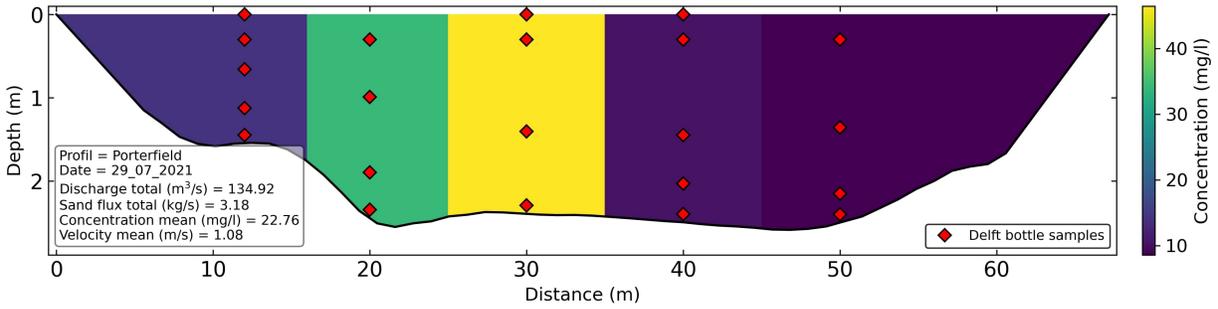


FIGURE 34 – Profil de concentration obtenu par la méthode PF

La concentration moyenne du profil exponentiel est supérieure de 6 % par rapport au profil de Rouse. Ce faible écart est généralisable à tous les jeux de données.

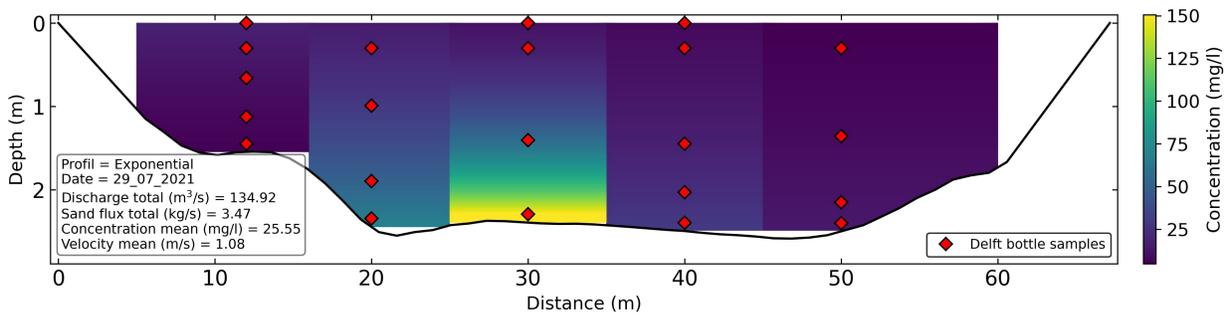


FIGURE 35 – Profil de concentration selon l'application du profil théorique exponentiel obtenue par la méthode SDCV

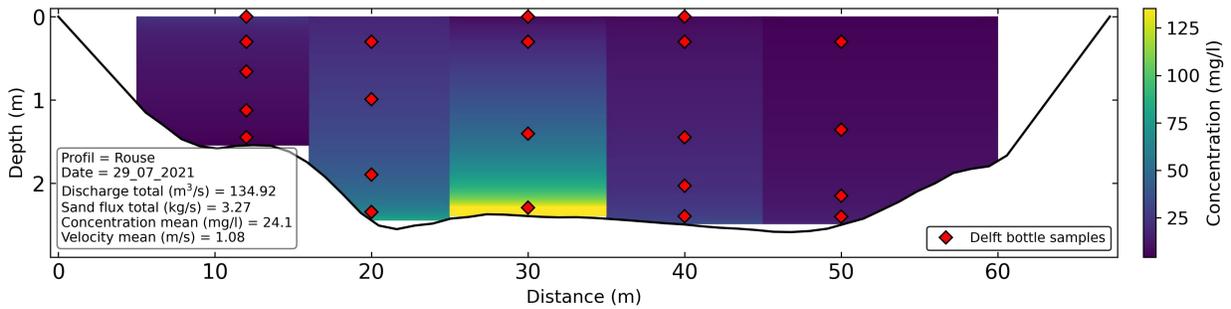


FIGURE 36 – Profil de concentration selon l'application du profil théorique de Rouse obtenue par la méthode SDCV

Interpolation et extrapolation latérale : à l'instar de la méthode SDCV, la concentration est particulièrement focalisée en profondeur au niveau de l'abscisse 30 m (cf. Figures 37 et 38). Elle est jusqu'à 10 fois plus importante qu'au niveau des berges. La concentration moyenne est plus faible de 20 % par rapport à l'interpolation verticale. Deux facteurs sont en cause, le premier étant l'ajout des concentrations au niveau des berges, le second la diminution de la taille de la forte zone de concentration du fond de la verticale d'abscisse 30 m par l'interpolation latérale.

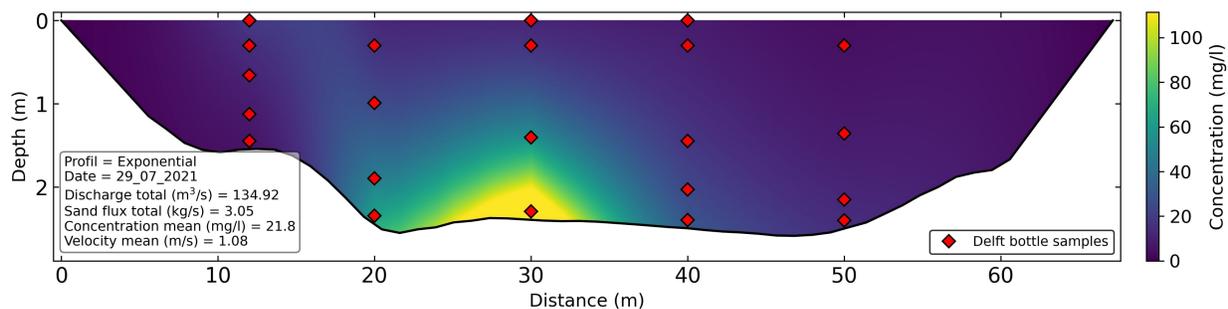


FIGURE 37 – Profil de concentration selon l’application du profil théorique exponentiel obtenue par la méthode SDC

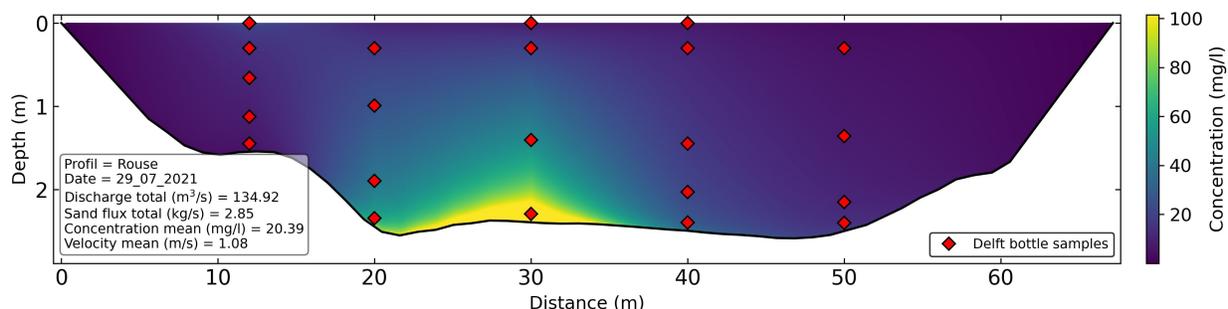


FIGURE 38 – Profil de concentration selon l’application du profil théorique de Rouse obtenue par la méthode SDC

5.4 Comparaison des méthodes

Une moyenne des écarts de concentration entre la méthode SDC (considérée comme la référence) et les autres a été calculé (cf. Annexe 42). 14 jeux de données étaient disponibles, 10 sur l’Isère dont la moitié avec l’échantillonneur P6 et l’autre avec la BD, ainsi que 4 sur le Rhone avec la P6. La moyenne des écarts est de 17 %, 21 % et 25 % respectivement pour les méthodes NN, PF et pré-PF.

Au vue des écarts, la méthode NN semble être l’alternative la plus proche de la méthode SDC. De plus sa représentation par cellule permet de distinguer graphiquement les points d’échantillonnage potentiellement aberrants. Couplée à sa simplicité de mise en œuvre, c’est une méthode particulièrement intéressante dans le cadre de calcul de flux sableux.

Les méthodes pré-PF et PF sont légèrement plus complexes à mettre en œuvre, du fait des pondérations à effectuer. Il s’agit cependant de méthodes fiables avec des écarts de concentration par rapport à la méthode de référence de l’ordre de grandeur de la méthode NN. La méthode SDC est une approche à base physique avec l’utilisation des profils théoriques verticaux de concentration. Il s’agit vraisemblablement de la méthode proposée la plus fiable pour les calculs de flux sableux notamment dû à l’application de profils verticaux théoriques de concentration, cette présomption serait à vérifier ultérieurement. Cette méthode se distingue par son maillage fin dans le but de tendre vers une représentation « réaliste ». Cependant cela implique une mise en place plus complexe des méthodes d’interpolation et extrapolation.

6 Discussion

Limites et perspectives de l'interpolation latérale : basé sur des observations, l'interpolation latérale ne suit pas de loi physique. L'hypothèse de la concentration nulle aux berges peut être discutée, notamment dans le cas de fortes concentrations sur des abscisses situées aux extrémités pouvant provenir d'un courant ou d'un changement de direction de la rivière par exemple. De même pour l'interpolation latérale, obtenir des valeurs de concentration par régression linéaire peut se discuter. Cependant cette solution était la plus simple à mettre en œuvre et semble fournir des résultats cohérents. Il serait néanmoins intéressant de tester différentes interpolations basées sur des paramètres physiques, la vitesse notamment.

Points forts, limites actuelles, erreurs et perspectives d'amélioration du code : Le code Python propose une automatisation de l'application de 5 méthodes de calculs de flux sableux, à partir de données de concentration et débit. Concrètement, à partir d'un fichier d'entrée contenant la concentration et la localisation d'échantillons ainsi que des données ADCP, le code applique 5 méthodes de calculs de flux et ressort une vingtaine de graphiques ainsi qu'une feuille contenant toutes les données utilisées et calculées. L'automatisation complète du script Python permet d'obtenir des résultats sur un grand nombre de jeux de données en très peu de temps. Mais, le code contient encore actuellement quelques pistes d'amélioration. Les données des échantillons de surface obtenues par la BD ne prennent pas encore en compte la profondeur délivrée par le capteur autonome de pression. Au niveau de la méthode NN, les valeurs de flux sableux de certains jeux de donnée paraissent aberrantes. La validation du code n'étant pas encore terminée, des comparaisons et ajustements devront être effectués avant qu'il soit opérationnel.

Concernant les limites, le code fonctionne actuellement de deux manières. Si la donnée de terrain d'entrée est la BD, alors les données de pression, granulométriques et hydroacoustique sont nécessaires et les données de surface sont optionnelles. Si la donnée de terrain d'entrée est la P6, seules les données ADCP sont nécessaires. Le script ne traitera pas les données de pression, granulo et de surface.

Cette manière de procéder fonctionne pour les différents jeux de données en notre possession, le script permet d'obtenir dans les deux cas les graphiques d'interpolation. Cependant il s'agit là d'une piste d'amélioration, notamment avoir le choix d'utiliser des données de pression et granulométrique afin de rendre le code plus souple.

Concernant l'avenir du code, actuellement le script est utilisé dans le cadre de la thèse de Jessica Laible (jessica.laible@inrae.fr) traitant de la quantification de la dynamique sableuse de la Basse-Isère jusqu'au Rhône. L'objectif est cependant de pouvoir le proposer à un plus grand nombre de personnes, notamment par le biais de plateformes de partage (Github par exemple), ou alors en proposant un exécutable du script. Dans tous les cas, il serait tout d'abord préférable d'explorer et d'améliorer les différentes perspectives d'amélioration évoquées.

7 Conclusion

Les cours d'eau contiennent en leurs sein les sédiments érodés des bassins versants. Les barrages bloquent le transport sédimentaire, entraînant des problématiques financières et écologiques importantes [11]. Des études impliquant le flux sableux sont nécessaires afin de trouver les meilleures solutions. Il s'obtient à partir de la concentration et du débit liquide. La concentration est dictée par le mode de transport du sable, notamment par la suspension graduée [8], obtenue lors de conditions hydrodynamiques spéciales, impliquant une concentration croissante avec la profondeur.

L'objectif du stage était de quantifier des valeurs de flux sableux à l'aide de méthodes de calcul automatisées par un programme Python. Pour cela, des prélèvements d'échantillons, pour obtenir une concentration ainsi que des mesures hydrométriques par ADCP pour obtenir un débit ont été faites.

L'échantillonnage s'est fait selon une distribution par verticale par deux préleveurs [10], la bouteille de Delft et l'US-P6. Ils ont ensuite été traités en laboratoire pour obtenir une masse sèche et le diamètre moyen des grains. Le débit est obtenu en effectuant des aller-retour perpendiculairement au courant avec un drone radiocommandé transportant l'ADCP.

Des données de pressions obtenues par capteur autonome accroché au préleveur permettent de calculer la profondeur et le temps de prélèvement des échantillons avec précision. Par le biais de ces différentes données, une concentration et un flux sableux ont pu être calculés pour chaque échantillon.

Les méthodes de calcul de flux sableux ont pour objectif d'interpoler et extrapoler ces données afin d'obtenir des profils de concentration et de déterminer le flux total. Elles vont se distinguer par les principes utilisés. La première, NN, est une méthode simple visant à attribuer les concentrations des échantillons à une zone proche spatialement. L'interpolation et extrapolation verticale comme latérale se fait par voisin-proche. La seconde se divise en deux sous méthodes, pré-PF et PF, le calcul de la concentration s'effectue pour chaque verticale d'échantillonnage par pondération par la profondeur (pré-PF et PF) et par la vitesse (uniquement PF). L'interpolation et extrapolation se fait verticalement par pondération et latéralement par demi-distance. La dernière méthode se divise également en deux sous méthodes, SDCV et SDC. L'interpolation et extrapolation verticale se fait par ajustement des échantillons selon les profils théoriques de Rouse [7] et exponentiel. Latéralement, par demi-distance (SDCV) et par régression linéaire (SDC). La moyenne des écarts de concentration de 14 jeux de données entre les méthodes NN, pré-PF et PF par rapport à la méthode SDC, prise comme référence car considérée comme la plus fiable, sont de 17 %, 21 % et 25 %. NN, couplée à sa simplicité de mise en place semble être un bon compromis dans le cas où la méthode SDC ne puisse pas être utilisée.

Concernant le code, il permet d'obtenir, par l'application des différentes méthodes et son automatisation, rapidement des profils de concentration et des données de flux sableux. Cependant la principale limite actuelle est la rigidité du code concernant les données d'entrées. En fonction des préleveurs, les données de pression et granulométriques ne seront pas forcément prises en compte dans les calculs du code. Il s'agit de la piste d'amélioration à prioriser dans l'optique d'une utilisation du code externe au cadre de la thèse de Jessica Laible sur la quantification de la dynamique sableuse de la Basse-Isère jusqu'au Rhône.

Références

- [1] *Acoustic Doppler current profiler Working principle et Processing methods*. URL : https://wiki.jp.org/wiki/Acoustic_Doppler_Current_Profiler (visité le 30/08/2022) (cf. p. 12).
- [2] Paul B ALLEN. « A study of the variability of suspended sediment measurements ». en. In : (), p. 10 (cf. p. 10).
- [3] Joseph P. BEVERAGE et David T. WILLIAMS. « Comparison. US P-61 and Delft sediment samplers ». In : *Journal of Hydraulic Engineering* 115.12 (1990), p. 1702-1706. URL : <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70015796> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 5, 10).
- [4] B CAMENEN et al. *Synthèse des mesures hydro-sédimentaires lors de la chasse de la Basse-Isère de janvier 2021*. Research Report. INRAE RiverLy ; EDF ; CNR, jan. 2022. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03559617> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 9, 10, 25, 27).
- [5] *Condamnation de la société EDF à verser une indemnité suite à des désagréments causés à une usine hydroélectrique*. fr. URL : <http://grenoble.tribunal-administratif.fr/A-savoir/Jurisprudence/Condamnation-de-la-societe-EDF-a-verser-une-indemnite-suite-a-des-desagregements-causes-a-une-usine-hydroelectrique> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 4).
- [6] Guillaume DRAMAIS. « Observation et modélisation des flux de sable dans les grands cours d'eau ». Theses. Université de Lyon, nov. 2020. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03188258> (cf. p. 4, 7, 12, 25).
- [7] Robert ETTEMA. « Hunter Rouse—His Work in Retrospect ». In : *Journal of Hydraulic Engineering-asce - J HYDRAUL ENG-ASCE* 132 (déc. 2006). DOI : [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:12\(1248\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:12(1248)) (cf. p. 4, 7, 25, 27, 34).
- [8] Walter Hans GRAF. *Hydraulics of Sediment Transport*. en. Water Resources Publication, 1984. ISBN : 978-0-918334-56-5 (cf. p. 4, 33).
- [9] Arthur J. HOROWITZ. « Determining annual suspended sediment and sediment-associated trace element and nutrient fluxes ». eng. In : *The Science of the Total Environment* 400.1-3 (août 2008), p. 315-343. ISSN : 0048-9697. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2008.04.022](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.04.022) (cf. p. 6).
- [10] *ISO 4363 :2002(en), Measurement of liquid flow in open channels — Methods for measurement of characteristics of suspended sediment*. URL : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:4363:ed-3:v1:en> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 5, 34).
- [11] M. LAUNAY et al. « Numerical modelling of the suspended particulate matter dynamics in a regulated river network ». In : *Science of the Total Environment* 665 (2019). Publisher : Elsevier, p. 591-605. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2019.02.015](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.015). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02553064> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 4, 5, 33).
- [12] *L'isère [W—0000] - Cours d'eau selon la version Carthage 2017 | Sandre - Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau*. URL : https://www.sandre.eaufrance.fr/geo/CoursEau_Carthage2017/W---0000 (visité le 30/08/2022) (cf. p. 7).
- [13] George PORTERFIELD. *Computation of fluvial-sediment discharge*. Rapp. tech. 03-C3. Publication Title : Techniques of Water-Resources Investigations. 1972. DOI : [10.3133/twri03C3](https://doi.org/10.3133/twri03C3). URL : <https://pubs.er.usgs.gov/publication/twri03C3> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 25).

- [14] *Rétrospective des dragages fluviaux en France*. fr. URL : <http://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/retrospective-dragages-fluviaux-france-0> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 4, 5).
- [15] Michael R. SIMPSON et Richard N. OLTMANN. *Discharge-measurement system using an acoustic Doppler current profiler with applications to large rivers and estuaries*. Rapp. tech. 2395. Publication Title : Water Supply Paper. U.S. G.P.O., 1993. DOI : [10.3133/wsp2395](https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp2395). URL : <https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp2395> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 4, 6, 12).
- [16] *Station hydrométrique - W354 0010 02 : L'Isère à Beaumont-Monteux - DREAL - Fiche de synthèse - Données hydrologiques de synthèse | SCHAPI - HydroPortail*. URL : <https://www.hydro.eaufrance.fr/stationhydro/W354001002/synthese> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 7).
- [17] James P. M. SYVITSKI et al. « Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean ». eng. In : *Science (New York, N.Y.)* 308.5720 (avr. 2005), p. 376-380. ISSN : 1095-9203. DOI : [10.1126/science.1109454](https://doi.org/10.1126/science.1109454) (cf. p. 5).
- [18] Leo C. van RIJN. « Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II : Suspended Transport ». en. In : *Journal of Hydraulic Engineering* 133.6 (juin 2007), p. 668-689. ISSN : 0733-9429, 1943-7900. DOI : [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:6\(668\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(668)). URL : <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282007%29133%3A6%28668%29> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 10).
- [19] D. E. WALLING et D. FANG. « Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers ». In : *Global and Planetary Change* 39 (oct. 2003). ADS Bibcode : 2003GPC....39..111W, p. 111-126. ISSN : 0921-8181. DOI : [10.1016/S0921-8181\(03\)00020-1](https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003GPC....39..111W). URL : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003GPC....39..111W> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 7).
- [20] Chester K. WENTWORTH. « A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments ». In : *The Journal of Geology* 30.5 (1922). Publisher : The University of Chicago Press, p. 377-392. ISSN : 0022-1376. URL : <https://www.jstor.org/stable/30063207> (visité le 30/08/2022) (cf. p. 4).

Table des figures

1	Schéma des différents mode de transport des sables : 1-charriage, 2-saltation, 3-suspension, 4-sens du courant	5
2	Schéma de la distribution par verticale des échantillons	6
3	Carte de la zone d'étude	8
4	Image de présentation des deux sections de la zone d'étude	8
5	Photographie de la bouteille de Delft avant mise à l'eau	9
6	Schéma de la structure interne de la bouteille de Delft	9
7	Graphique tracé à partir de l'abaque de la grande buse courbée	11
8	Photographie du préleveur US-P6 lors d'un prélèvement d'échantillon	11
9	Schéma de la structure du préleveur US-P6	12
10	Photographie d'un ADCP avant sa mise à l'eau	13
11	Graphique de présentation des données hydroacoustiques sous forme de profil de vitesse par le logiciel Qrev	13
12	Photographie de la de masse sèche d'un échantillon	14
13	Photographie d'un granulomètre-laser	15
14	Graphique de la distribution des grains d'un échantillon par densité cumulée.	15
15	Schéma récapitulatif de l'exploitation brute des données	17
16	Interface utilisateur des choix de données	18
17	Tableau récapitulatif des donnée traité, interne au script Python.	18
18	Graphique des données de pression d'une journée de campagne de mesure	19
19	Interface utilisateur pour traiter les options de MAP	20
20	Section moyenne transversale obtenue par MAP	20
21	Profil de vitesse obtenu par MAP	20
22	Graphique du D50 au sein de la section de cours d'eau	21
23	Graphique du D50 selon une échelle de profondeur normalisée	22
24	Graphique de la distribution granulométrique en densité et densité cumulée de l'abscisse 30 m d'un échantillon	22
25	Schéma récapitulatif des méthodes d'interpolation et extrapolation des méthodes de calculs du flux sableux	24
26	Schéma récapitulatif de l'organisation des cellules NN et MAP	24
27	Schéma récapitulatif du principe de fonctionnement de la méthode SDC	26
28	Schéma des profils théoriques de concentration Rouse et exponentiel. La hauteur d'eau h correspond à la distance fond/surface. Ca est la concentration à l'altitude de référence Za, incluse dans le profil de Rouse. Cr la concentration au point Z0, incluse dans le profil exponentiel.	26
29	Droite d'équation de type $y = ax + b$ obtenues par régression linéaires du log de la concentration par le log de la hauteur des échantillons d'une même abscisse.	28
30	Représentation des profils théoriques de concentration calculés pour la verticale 30 m par les méthodes de Rouse et exponentiel	29
31	Schéma récapitulatif de l'interpolation et extrapolation verticale et latérale	29
32	Profil de concentration obtenu par la méthode NN	30
33	Profil de concentration obtenu par la méthode pré-PF	30

34	Profil de concentration obtenu par la méthode PF	31
35	Profil de concentration selon l'application du profil théorique exponentiel obtenue par la méthode SDCV	31
36	Profil de concentration selon l'application du profil théorique de Rouse obtenue par la méthode SDCV	31
37	Profil de concentration selon l'application du profil théorique exponentiel obtenue par la méthode SDC	32
38	Profil de concentration selon l'application du profil théorique de Rouse obtenue par la méthode SDC	32
39	Abaque sous format papier du coefficient α de la grande buse courbée	39
40	Graphique 3D représentant les courbes de densité granulométriques (axe x et z) de tous les échantillons de la section de cours d'eau selon leurs profondeur (axe y)	39
41	Représentation du D50 de tous les échantillons de la section de cours d'eau séparés par abscisse en fonction de la profondeur normalisée	40
42	Tableau récapitulatif des écarts entre les différentes méthodes de calcul de flux sableux	40

8 Annexes

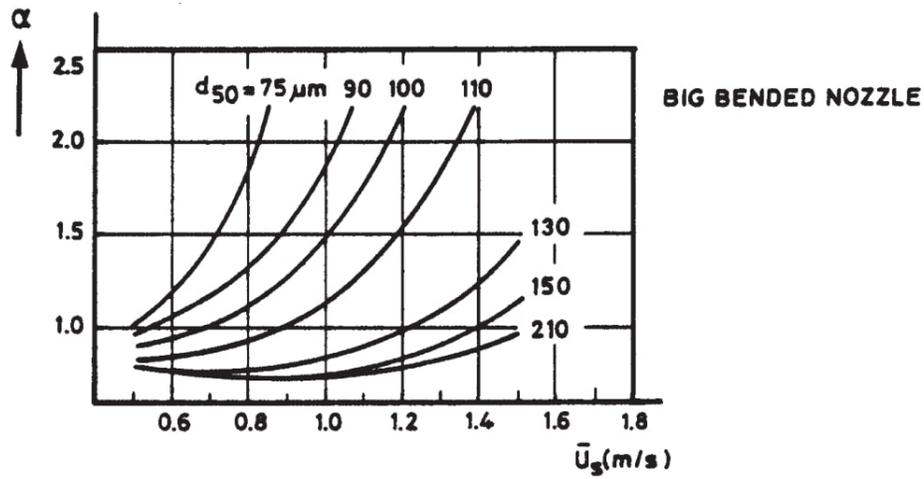


FIGURE 39 – Abaque sous format papier du coefficient α de la grande buse courbée

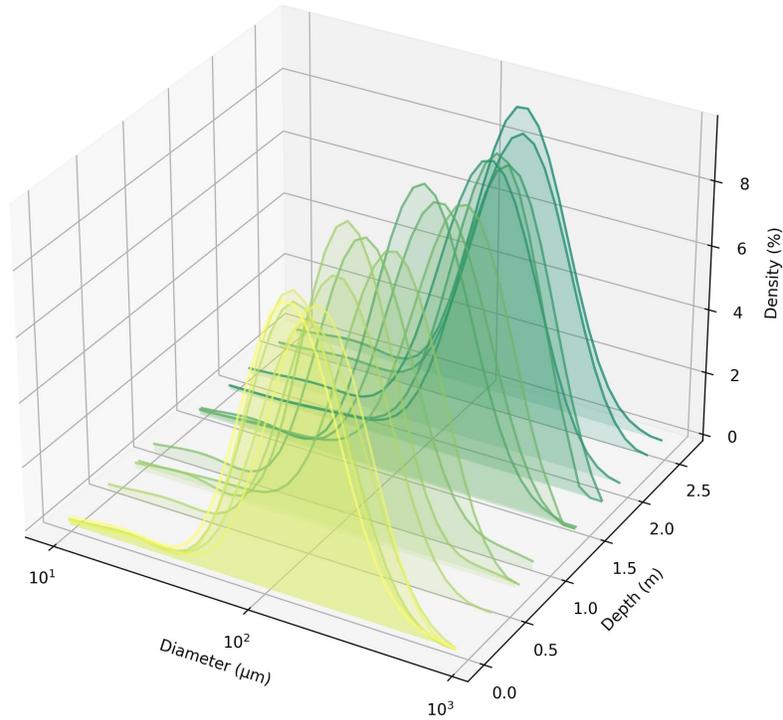


FIGURE 40 – Graphique 3D représentant les courbes de densité granulométriques (axe x et z) de tous les échantillons de la section de cours d'eau selon leur profondeur (axe y)

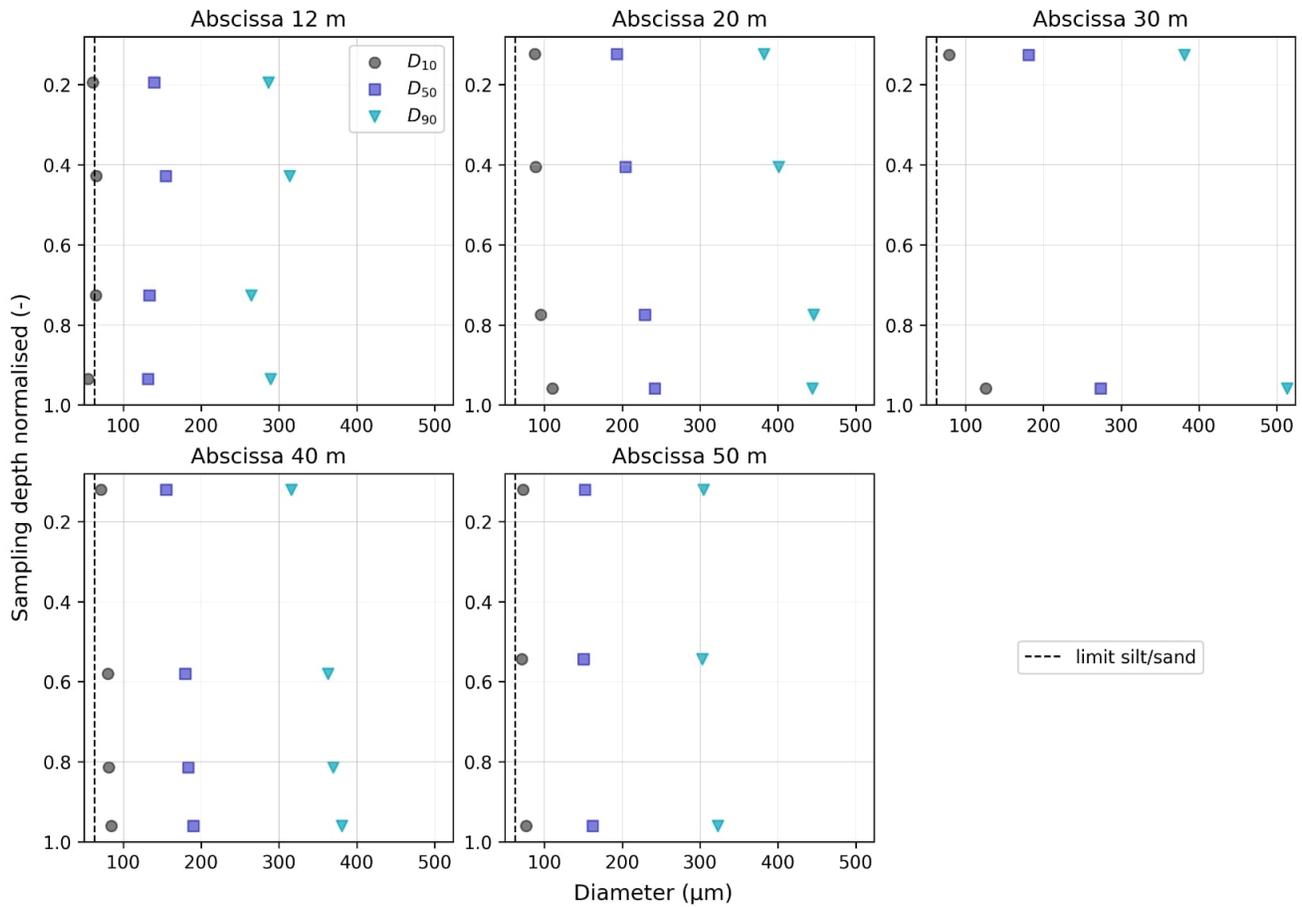


FIGURE 41 – Représentation du D50 de tous les échantillons de la section de cours d'eau séparés par abscisse en fonction de la profondeur normalisée

Date	Sampler	Sand_concentration_NN_mg_l	Sand_concentration_Pre_PF	Sand_concentration_PF	Sand_concentration_Rouse	Sand_concentration_Exponential
Isère						
06_04_2021	BD + seau	47,66310582	58,34586967	154,9792874	42,91633383	43,09078473
11_05_2021	BD + seau	350,4553714	378,0020731	235,5075357	306,6828258	312,2810967
16_06_2021	BD + seau	359,1044631	362,5687827	256,2514958	403,73367	396,862609
29_07_2021	BD + seau	26,93263684	27,42324127	22,75611361	20,37616097	21,40194347
12_10_2021	BD + seau	5,913282095	6,520575154	8,283490241	4,057921088	3,905022998
06_04_2022	P6	83,18176095	79,98349729	75,83185413	73,58203076	74,59890069
08_04_2022	P6	379,5338218	446,0439423	431,2689071	362,5049002	371,171918
13_05_2022	P6	240,0232005	282,921045	188,5887254	223,7566951	225,3682781
19_05_2022	P6	315,3113738	358,6206741	249,0116043	275,6251608	277,3273691
01_06_2022	P6	69,16553402	79,03219661	60,01772535	60,98273883	61,23448565
Rhone						
2018_01_22	P6	45,59512683	46,2037037	32,84525295	39,62490949	40,64691103
2018_01_23	P6	178,3703247	180,4027778	126,2195658	131,3256716	156,4938977
2018_01_24	P6	134,4868653	127,7	99,4386466	81,82248545	110,9615501
2018_01_25	P6	36,39955729	36,31818182	33,654824	28,03149942	30,37491878
Moyenne écart (%)		17,34240516	25,38141993	21,25792209	x	x

FIGURE 42 – Tableau récapitulatif des écarts entre les différentes méthodes de calcul de flux sableux

Abstract :

Watercourses transport sediments, the result of soil erosion, by suspension and transport. Basse-Isère, located between Grenoble and Bourg les Valence, is equipped with numerous dams. The important sediment flow of the river implies carrying out management operations to release the sediments blocked by the dams. Poor sediment management can have dramatic environmental and financial consequences. As a result, river and dam managers are interested in sediment flows. Quantifying the sand flows of the Isère is very complex. Indeed, characterizing its temporal and spatial distribution is a major challenge. However, a recent protocol makes it possible to measure and calculate the sand flow at a given time by combining in situ samples, hydroacoustic measurements and adjustment by theoretical equations of graduated sand concentration. This master 2 internship fits into this framework, the first part aims to acquire field data and analyze the samples in the laboratory, a second to code a Python script to calculate the sand flow using different methods. This second part can be divided into two sub-parts, the first focused on the raw exploitation of field data, the second on the interpolation and extrapolation of data.

Keywords : sand flow, calculation methods, interpolation

Résumé :

Les cours d'eau transportent des sédiments, fruit de l'érosion des sols, par suspension et charriage. La basse-Isère, localisée entre Grenoble et Bourg les Valence est aménagée par de nombreux barrages. Le flux sédimentaire important du fleuve implique d'effectuer des opérations de gestion pour libérer les sédiments bloqués par les barrages. Une mauvaise gestion des sédiments peut avoir des conséquences environnementales et financières dramatiques. De ce fait, les gestionnaires de cours d'eau et de barrages s'intéressent aux flux de sédiments. Quantifier les flux de sable de l'Isère est très complexe. En effet, caractériser sa distribution temporelle et spatiale constitue un enjeu de taille. Un protocole récent permet cependant de mesurer et calculer le flux sableux à un instant donné en associant prélèvements in situ, mesures hydroacoustiques et ajustement par équations théoriques de concentration sableuse graduée. Ce stage de master 2 s'insère dans ce cadre, une première partie a pour but d'acquérir des données de terrain et analyser en laboratoire les échantillons, une seconde de coder un script Python pour calculer le flux sableux à l'aide de différentes méthodes. Cette seconde partie peut se subdiviser en deux sous-partie, la première axée sur l'exploitation brute des données terrain, la seconde sur l'interpolation et extrapolation des données.

Mots-clés : flux sableux, méthodes de calcul, interpolation