



**HAL**  
open science

## Suivi du sable en suspension à Pyrimont pendant les opérations APAVER sur le Rhône en 2021

Guillaume Dramais, Benoît Camenen, Jérôme Le Coz, Fabien Thollet, Adrien Bonnefoy, Mickaël Lagouy, Jessica Laible, Blaise Calmel, Janna Stepanian

► **To cite this version:**

Guillaume Dramais, Benoît Camenen, Jérôme Le Coz, Fabien Thollet, Adrien Bonnefoy, et al.. Suivi du sable en suspension à Pyrimont pendant les opérations APAVER sur le Rhône en 2021. INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes. 2022. hal-04028098

**HAL Id: hal-04028098**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04028098>**

Submitted on 14 Mar 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.



## ➤ **Suivi du sable en suspension à Pyrimont pendant les opérations APAVER sur le Rhône en 2021**

**Guillaume Dramais, Benoît Camenen, Jérôme Le Coz, Fabien Thollet, Adrien Bonnefoy, Mickaël Lagouy, Jessica Laible, Blaise Calmel, Janna Stepanian**

**Février 2022**

## Avertissement

Toute utilisation de noms commerciaux, d'entreprises ou de produits commercialisés l'est uniquement à des fins descriptives et n'implique aucunement l'approbation des auteurs ou de leurs établissements.

## Remerciements

Les auteurs remercient toutes les personnes ayant pris part à la préparation des essais, aux mesures et aux analyses.

## Résumé

Ce rapport présente les essais réalisés dans le cadre de la convention de partenariat technique sur la mesure des flux sédimentaires sur le Rhône pendant les opérations d'abaissements partiels de la retenue de Verbois (APAVER), elle a été signée entre CNR et INRAE en janvier 2021. Ces essais s'inscrivent également dans l'action A1 du programme OSR6. Les opérations APAVER, réalisées tous les 3 à 4 ans, avec un abaissement partiel de la retenue de Génissiat, entraînent un accroissement du flux de sédiments sur l'ensemble du linéaire du Rhône et nécessitent de la part de CNR un accompagnement et un suivi sur ses ouvrages entre la frontière suisse et Lyon, l'objectif étant de garantir la sûreté hydraulique, la qualité de l'eau et plus largement la limitation des impacts environnementaux. La campagne de mesure présentée ici et réalisée en mai 2021 avait pour objectif de mesurer en détail les profils verticaux de matières en suspension (MES) et de sable sur une verticale au pont de Pyrimont pour constituer un jeu de données de référence pour la modélisation et l'inversion acoustique. Des prélèvements ont été effectués pour évaluer les flux de sable en suspension et les flux charriés par le Rhône. Cette étude apporte des éléments intéressants sur le suivi du sable mis en suspension par les manœuvres du barrage de Génissiat lors de l'APAVER.

---

\* Photo de couverture : Confluence de la Valserine et du Rhône pendant l'APAVER 2021

## Table des matières

Table des matières .....	3
1. Introduction.....	4
2 Méthodes .....	4
2.1 Dispositif de déploiement et matériel mis en œuvre .....	4
2.2 Prélèvements.....	5
2.3 Protocole de prélèvement sur la verticale .....	6
2.4 Mesures complémentaires.....	7
3 Dynamique de l'évènement .....	9
3.1 Débit du Rhône.....	9
3.2 Evolution des concentrations et flux en MES.....	9
4 Résultats et exploitation des données .....	12
4.1 Analyse des échantillons .....	12
4.2 Analyse des profils de vitesse.....	13
4.3 Mesures de charriage au Helley-Smith .....	16
4.4 Mesures du flux de sable en suspension avec la bouteille de Delft.....	17
4.5 Flux de sable en suspension .....	19
5 Conclusions et perspectives .....	24
5 Bibliographie.....	25

## 1. Introduction

L'opération d'accompagnement de l'abaissement partiel de Verbois (APAVER) entraîne un flux de sédiments important sur le Rhône, notamment à l'aval du barrage de Génissiat. L'un des points de contrôle stratégique pour le suivi sédimentaire de l'évènement se situe au niveau du pont de Pyrimont qui franchit le Rhône entre Surjoux (Ain) et Challonges (Haute-Savoie). Si les flux d'argile et limon restent les mieux suivis et les plus critiques quant à la survie de la faune piscicole, les flux de sable restent importants à comprendre car ces derniers ont un impact important sur la sédimentation des retenues et ouvrages du Rhône. Ces essais ont été réalisés afin de mieux comprendre la dynamique des flux sableux lors d'une opération de ce type. L'objectif des essais était de mesurer en détail les profils verticaux de matières en suspension (MES) et de sable sur la verticale centrale du pont de Pyrimont pour constituer un jeu de données de référence pour la modélisation et l'inversion acoustique. Ce rapport présente le suivi réalisé par INRAE en partenariat avec CNR sur la dynamique du sable, en complément de nombreuses autres mesures réalisées durant cet évènement par différentes équipes.

## 2 Méthodes

### 2.1 Dispositif de déploiement et matériel mis en œuvre

Les conditions hydrauliques en rivière lors des opérations d'abaissement des barrages deviennent très complexes pour déployer en toute sécurité des instruments de mesure. De nombreux objets flottants, des débris végétaux sur l'ensemble de la colonne d'eau, un transport solide important et des écoulements parfois violents rendent difficiles les interventions dans le cours d'eau en particulier en bateau. Le suivi de l'APAVER a été préparé pendant plusieurs mois et une potence équipée d'un treuil a ainsi été développée et installée par le Cacoh sur la travée centrale du pont de Pyrimont pour permettre le déploiement d'instruments de mesure sur câble. La verticale explorée était donc placée à l'aplomb du milieu du pont de Pyrimont côté aval. (cf. Figure 1).

L'objectif de ces mesures est de coupler des mesures par prélèvement direct et des mesures acoustiques depuis la surface.



Figure 1 : Dispositif de déploiement par treuil sur la verticale centrale du pont de Pymont

## 2.2 Prélèvements

Des prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une bouteille de Delft et d'un Helley-Smith (cf. Figure 2a). La bouteille de Delft est un préleveur décanteur intégratif isocinétique. Ce préleveur permet une mesure directe du flux de sable en suspension en un point en fonction de la masse de sable décantée dans le préleveur et de la durée d'exposition, les buses les plus fines ont été utilisées (Diamètre 1.55 cm), elles sont prévues pour une utilisation jusqu'à des vitesses de 2.5 m/s. La bouteille de Delft (cf. visible sur son support Figure 2c) a été déployée sur 5 points sur la verticale. Le préleveur Helley-Smith est un échantillonneur des sédiments charriés au fond par le cours d'eau. Il s'agit d'un préleveur que l'on place face au courant, au contact du lit du cours d'eau. Il est composé d'une entrée rectangulaire de 7.8 cm d'ouverture, d'un filet de prélèvement (maille de 50  $\mu\text{m}$ ) collectant l'échantillon de charriage ainsi que d'une structure hydrodynamique assurant sa stabilité dans l'eau et compensant la perte de charge lié à l'appareil (divergent). Ces deux préleveurs sont exposés pendant des temps d'exposition variant entre 5 et 10 minutes pour la bouteille de Delft et de 2 à 5 minutes pour le Helley-Smith, en



fonction de l'intensité du transport. Les mesures ont été réalisées du 19 au 21 mai 2021 puis les 25 et 26 mai 2021. Une centaine d'échantillons ont été prélevés puis analysés dans le laboratoire HHLab d'INRAE et au laboratoire de sédimentologie de l'ENTPE.



Figure 2 : Instrumentation utilisée au pont de Pymont lors de l'APAVER 2021 avec (a) le préleveur Helley-Smith lesté, (b) un exemple d'échantillon collecté avec le Helley-Smith et (c) la bouteille de Delft sur son support

### 2.3 Protocole de prélèvement sur la verticale

Les prélèvements à la bouteille de Delft ont été effectués à 5 profondeurs : un échantillon de sub-surface (~0.5 à 1 m en-dessous de la surface, un échantillon à mi-profondeur (~1.5 à 2 m) puis trois

échantillons à 0.1, 0.2 et 0.5 m du fond. Tous les échantillons ont été effectués dans la configuration préleveur accompagné de sa structure de type trépied (cf. Figure 2c). Les buses les plus fines ont été utilisées car plus adaptées pour les vitesses relativement élevées observées lors de l'évènement, soit la buse droite sur les trois échantillons les moins profonds et la buse courbée pour les deux échantillons les plus proches du fond. L'échantillonnage s'est bien déroulé avec très peu d'échec. La récupération des échantillons se fait par rinçage de la bouteille à l'aide d'un pulvérisateur de jardin rempli d'eau claire. L'eau de rinçage est réceptionnée dans un tamis de 50 µm de maille, et le transfert de l'échantillon s'effectue ensuite dans un sachet plastique identifié. Les prélèvements de charriage à l'aide du préleveur Helley-Smith ont été répétés 3 fois chacun avec quelques échecs liés à l'arrachement des sacs en nylon (maille de 50 µm). Les échantillons sont transférés dans des sacs plastiques identifiés. Les journées ont permis la réalisation de deux mesures complètes de profils verticaux avec la bouteille de Delft (~1h, 1h30 par séquence) et deux mesures du charriage (~30 min à 45 min par séquence) (cf. Tableau 1).

*Tableau 1 : Récapitulatif des séquences de prélèvement depuis la potence de Pyrimont*

Type de mesure	Date	Heure [TU+1]	Temps d'exposition par point [min]
Helley-Smith	19/05/2021	11:10	3
Bouteille de Delft	19/05/2021	11:20 - 13:00	10
Helley-Smith	19/05/2021	14:25 - 14:55	3
Bouteille de Delft	19/05/2021	15:05 - 16:30	10
Helley-Smith	20/05/2021	09:10 - 09:30	2
Bouteille de Delft	20/05/2021	10:30 - 11:50	5
Helley-Smith	20/05/2021	13:30 - 13:55	2
Bouteille de Delft	20/05/2021	14:45 - 15:57	5
Helley-Smith	21/05/2021	09:15-09:31	1.5 - 2
Bouteille de Delft	21/05/2021	10:00 - 10:56	5
Bouteille de Delft	21/05/2021	13:50 - 14:50	5
Bouteille de Delft	25/05/2021	09:45 - 10:31	5
Helley-Smith	25/05/2021	10:55 - 11:14	4
Bouteille de Delft	25/05/2021	13:00 - 13:51	5
Helley-Smith	25/05/2021	14:29 - 14:49	5
Bouteille de Delft	26/05/2021	09:17 - 10:10	5
Helley-Smith	26/05/2021	10:51 - 11:42	10
Bouteille de Delft	26/05/2021	13:19 - 14:11	5
Helley-Smith	26/05/2021	15:04 - 15:14	5

## 2.4 Mesures complémentaires

Des mesures acoustiques à l'aide d'un Aquascap (rétrodiffusion multifréquence) et d'un ADCP 600 kHz étaient prévues, par transects successifs et verticales fixes. Le drone aquatique (cf. Figure 3) sur lequel était installé le matériel a malheureusement eu une défaillance technique entraînant sa perte. Le



matériel a été retrouvé en grande partie détruit mais les mesures via ce support n'ont pas été possibles.

De nombreuses autres mesures et prélèvements ont été réalisées notamment par CNR et Ubertone avec un instrument UBSediFlow (rétrodiffusion multifréquence) sur planche CACOHboard (non motorisée), elles font l'objet d'autres rapports.



Figure 3 : Drone INRAE

Des mesures ADCP ont eu lieu au niveau du pont par ADCP tracté depuis une drisse, un aller-retour pour un jaugeage a été effectué par la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes à l'aide d'un ADCP RDI 1200 kHz le 19 mai à 12:02 TU+1 pour un débit de 334 m<sup>3</sup>/s (cf. Figure 4). Ensuite quelques séquences d'enregistrements ADCP sur la verticale centrale ont été effectuées les 21, 25 et 26 mai à l'aide d'un ADCP RDI 600 kHz.

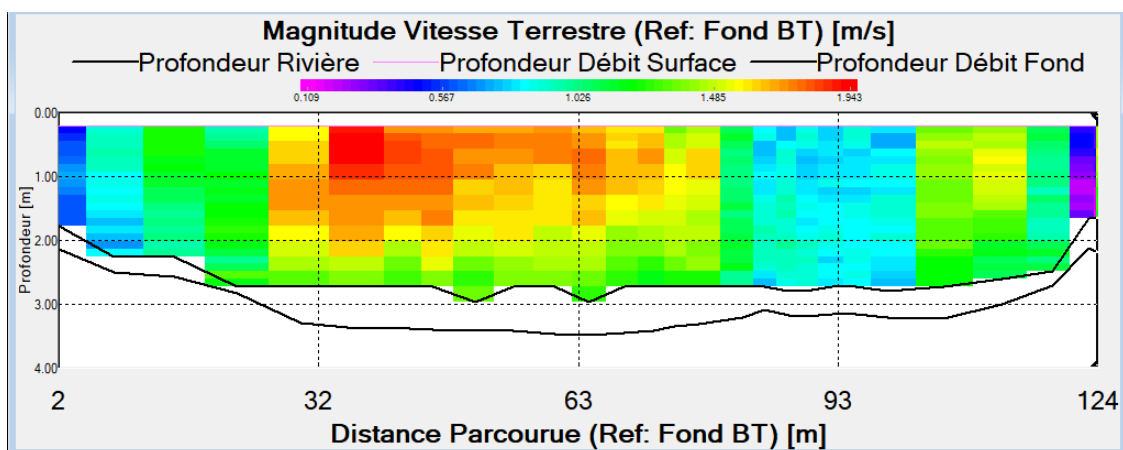


Figure 4 : Transect ADCP du 19 mai 2021 en aval du pont de Pyrimont (DREAL AURA)

### 3 Dynamique de l'évènement

#### 3.1 Débit du Rhône

Lors de l'APAVÉR les débits du Rhône à l'aval direct de Génissiat ont varié autour de 500 m<sup>3</sup>/s avec plusieurs baisses de débit de quelques heures correspondant à des manœuvres des organes du barrage, soit le plus souvent à une transition des débits entre la vanne de fond et la vanne de demi-fond (cf. Figure 5). On notera qu'entre le 19 et le 28 mai, une majeure partie du débit à Génissiat transite par la vanne de fond.

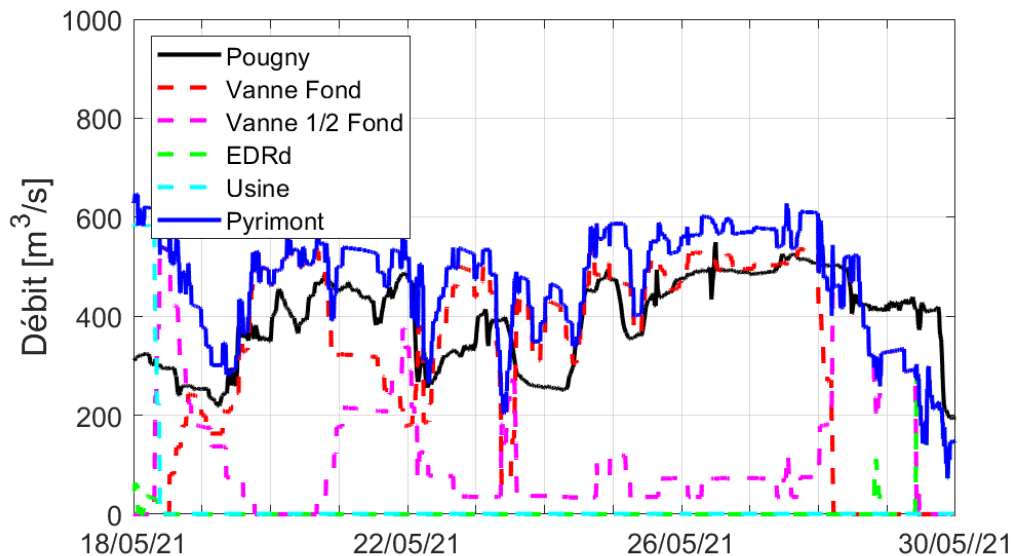


Figure 5 : Débit du Rhône en amont, en aval du barrage de Génissiat (CNR) ainsi que dans les différents organes du barrage, (EDRd signifie évacuateur de surface rive droite).

#### 3.2 Evolution des concentrations et flux en MES

La concentration en matières en suspension (MES) à l'amont et à l'aval du barrage, ainsi que dans les différents organes du barrage a été suivie par différents dispositifs de mesure (Figure 6). Il est à noter que si les concentrations de MES correspondent a priori à des concentrations totales incluant la fraction sableuse au niveau des vannes de demi-fond et vanne de fond, ces concentrations n'incluent pas les sables pour les autres stations (Pougny, Bellegarde, Pyrimont) car les appareils de mesure (turbidimètres, préleveurs) sont situés en berge et/ou en surface alors qu'il existe a priori une forte variabilité spatiale des concentrations en sable sur ces sections de mesure (Guertault, 2015). Il apparaît une première phase entre le 18 et 20 mai où une érosion de la retenue de Génissiat est constatée alors que les barrages de Verbois et Chancy-Pougny ne sont pas encore ouverts. Du 21 au 29 mai, on observe alors une seconde phase où le barrage de Génissiat est géré afin de maintenir un équilibre sédimentaire dans la retenue (ni dépôt ni érosion). En effet, les concentrations sont globalement équivalentes entre Pougny et Pyrimont. On notera trois pics de concentration très importants (de plusieurs dizaines de g/L) les 20 mai après-midi (suite à une érosion directement liée à la gestion de la vanne de fond), le 23 mai au matin (suite a priori à une manœuvre des ouvrages suisses), et le 27 mai

tôt le matin (suite à une érosion directement liée à la gestion de la vanne de fond). Les pics liés à la gestion de la vanne de fond sont a priori ceux qui peuvent faire transiter une quantité importante de sable.

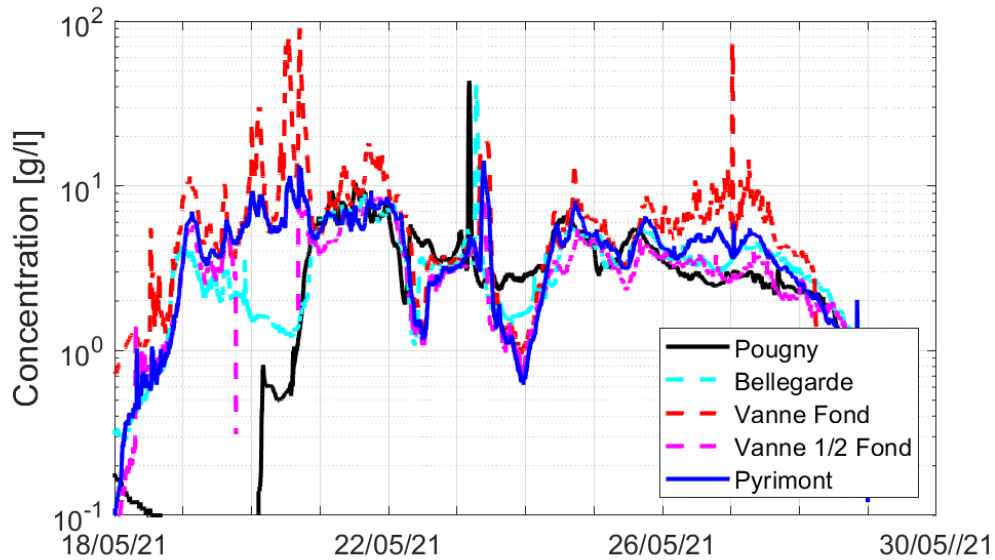


Figure 6 : Evolution de la concentration en MES sur le Haut-Rhône en amont et en aval du barrage de Génissiat (mesures CNR)

A partir des données des Figure 5 et Figure 6 , il est possible d'évaluer le flux instantané de MES en faisant simplement le produit des concentrations et du débit. On retrouve Figure 7 les trois pics de concentration qui induisent des pics de flux instantanés supérieurs à 10 t/s. Sinon, à l'exception des deux périodes où la vanne de fond a été quasi fermée (22 mai matin et 24 mai après-midi) et où les

flux sont inférieurs à 1 t/s, les flux fluctuent globalement autour de 3 t/s au niveau de Pylimont.

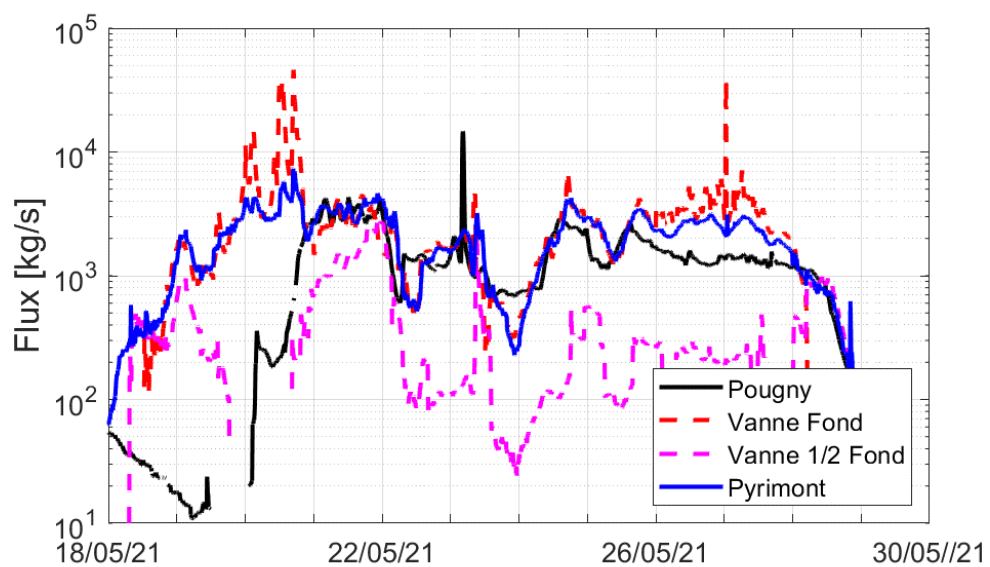


Figure 7 : Evolution des flux en MES sur le Haut-Rhône en amont et en aval du barrage de Génissiat (mesures CNR)

## 4 Résultats et exploitation des données

### 4.1 Analyse des échantillons

Les masses sèches des échantillons prélevés au pont de Pyrimont ont été mesurées au laboratoire HHlab d'INRAE à Villeurbanne, après passage à l'étuve (83 échantillons ont été analysés). Les distributions granulométriques d'une partie des échantillons ont été mesurées sur le granulomètre Malvern Mastersizer 3000 de l'ENTPE à Vaulx en Velin. Sur 38 mesures de la distribution granulométrique effectuées sur les échantillons de la bouteille de Delft, le  $d_{50}$  se situe autour de 113  $\mu\text{m}$  sans évolution marquée pendant les jours du suivi. Deux échantillons de sable en suspension photographiés au microscope sont montrés Figure 8. Un gradient de granulométrie peu marqué sur la verticale est observé, comme présenté sur la Figure 9 où les deux échantillons les plus proches du fond ont des  $d_{50}$  plus élevés que les autres échantillons de cette verticale (144 et 163  $\mu\text{m}$ ). Sur les 5 échantillons Helley Smith analysés en granulométrie, le  $d_{50}$  se situe autour de 130  $\mu\text{m}$ , ce qui est en accord avec la granulométrie observée avec la bouteille de Delft près du fond bien que légèrement plus fin.

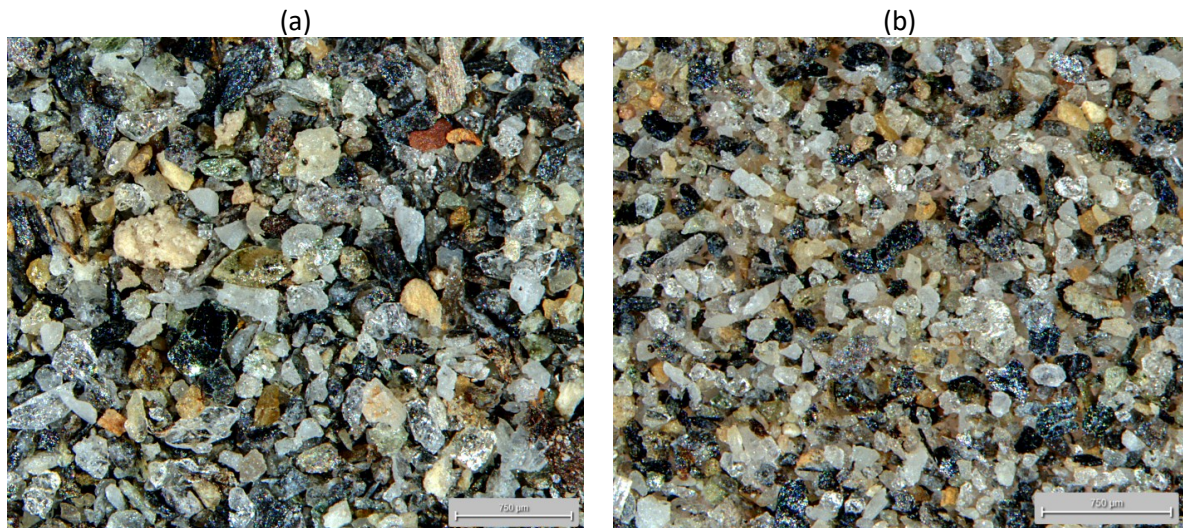


Figure 8 : Photographie au microscope d'échantillons de la Bouteille de Delft du 26 mai à 09h42 TU+1 en sub-surface (a) et du 20 mai à 11h05 TU+1 en sub-surface (0.62cm) (b)



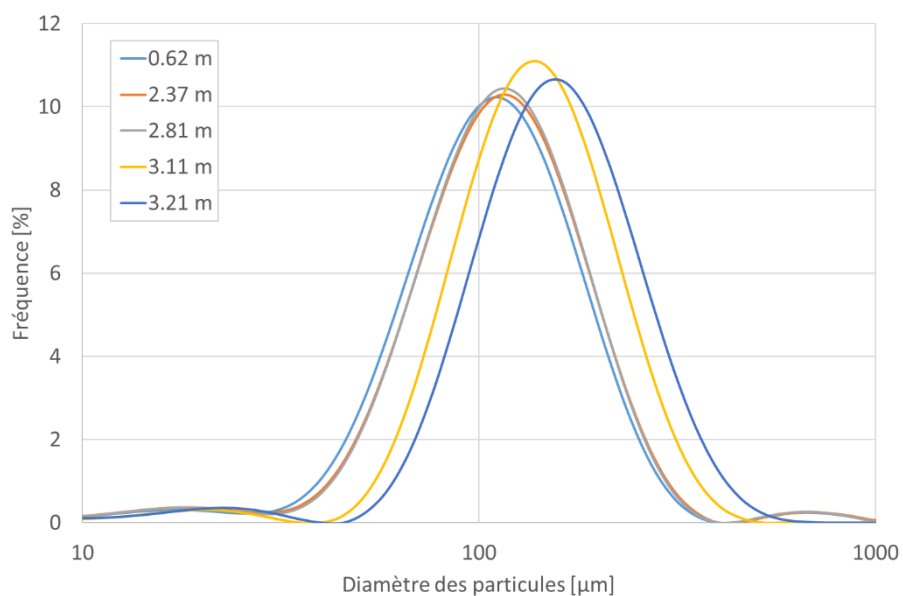


Figure 9 : Distribution granulométrique du sable en suspension à différentes profondeurs (depuis la surface) sur la verticale le 20 mai matin (profondeur totale 3.31m).

#### 4.2 Analyse des profils de vitesse

Les points fixes mesurés à l'ADCP pendant plusieurs séquences les 21, 25 et 26 mai sont moyennés dans le temps, de sorte que chaque courbe de la Figure 10 correspond à une séquence de mesure de 2 à 30 minutes durant ces trois journées. Un ADCP RDI 600 kHz est utilisé pour ces mesures. La forme des profils est assez stable avec de légères variations de vitesse (cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Récapitulatif des séquences ADCP sur la verticale centrale du pont de Pyrimont

Date	Transect	Nb. Ens.	Heure de Début [TU+1]	Heure de Fin [TU+1]	Durée [min]
25/05/2021	pyr_pont000	345	15:12:15	15:15:18	3
21/05/2021	pyr_pont1000	259	15:19:41	15:22:09	2
21/05/2021	pyr_pont1001	275	15:22:21	15:24:58	3
21/05/2021	pyr_pont2000	705	15:28:19	15:35:03	7
21/05/2021	pyr_pont2001	899	15:35:18	15:43:54	9
21/05/2021	pyr_pont2002	40	15:44:03	15:44:25	0
21/05/2021	pyr_pont2003	317	15:45:24	15:48:25	3
25/05/2021	Pyrimont 25 mai000	3368	10:04:30	10:36:45	32
25/05/2021	Pyrimont 25 mai001	2718	10:36:57	11:02:58	26
25/05/2021	Pyrimont 25 mai002	1019	11:12:57	11:22:41	10
25/05/2021	Pyrimont 25 mai003	6405	12:54:32	13:55:50	61
25/05/2021	Pyrimont 25 mai004	2440	13:55:58	14:19:19	23
25/05/2021	Pyrimont 25 mai005	2990	14:19:34	14:48:11	29
25/05/2021	Pyrimont 25 mai006	2152	14:48:16	15:08:52	21
26/05/2021	Station 1000	2354	08:58:59	09:21:30	23
26/05/2021	Station 1001	855	09:21:48	09:29:58	8
26/05/2021	Station 1002	214	09:31:22	09:33:24	2
26/05/2021	Station 1003	405	09:48:02	09:51:54	4
26/05/2021	Station 2000	333	09:55:22	09:58:33	3
26/05/2021	Station 2002	3710	10:05:21	10:40:51	36
26/05/2021	Station 2003	1489	10:40:59	10:55:14	14
26/05/2021	Station 2004	1795	10:55:24	11:12:35	17
26/05/2021	Station 2005	1949	11:12:45	11:31:24	19
26/05/2021	Station 2006	1290	11:33:41	11:46:01	12
26/05/2021	Station 2007	887	11:50:54	11:59:23	8
26/05/2021	Station 2008	00:00	13:13:03	13:18:23	5
26/05/2021	Station 2009	2811	13:19:23	13:46:17	27
26/05/2021	Station 2010	2566	13:46:25	14:10:59	25
26/05/2021	Station 2011	6668	14:11:15	15:15:05	64

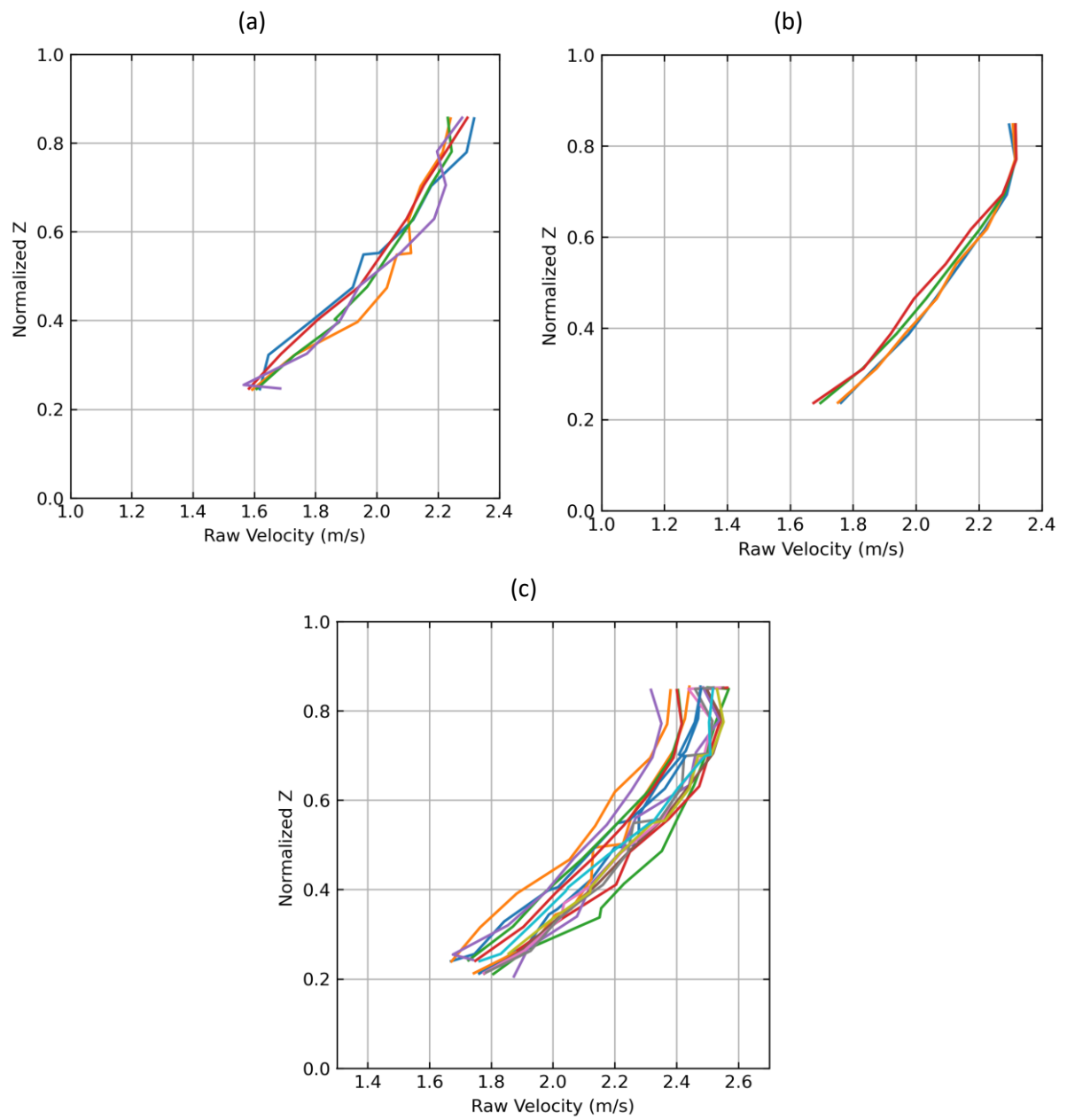


Figure 10 : Profils de vitesse ADCP moyennés issus d'enregistrements fixes sur la verticale de mesure le 21 mai (a), 25 mai (b) et 26 mai (c).

### 4.3 Mesures de charriage au Helley-Smith

Les calculs de flux charriés à partir des prélèvements Helley-Smith sont effectués à partir de la moyenne des mesures de masse sèche  $M$ , du temps d'exposition  $T$  et de l'ouverture du préleveur  $l$  :

$$q_{sb} = \frac{k_{HS} M}{l T} \quad (1)$$

avec  $k_{HS}$  le coefficient d'efficacité du Helley-Smith pris égal à 1 en première approximation et  $q_{sb}$  le flux charrié par unité de largeur.

Les mesures au Helley-Smith sont répétées 3 fois, les mesures successives indiquent une variabilité importante (cf. Figure 11) qui augmente avec la masse prélevée.

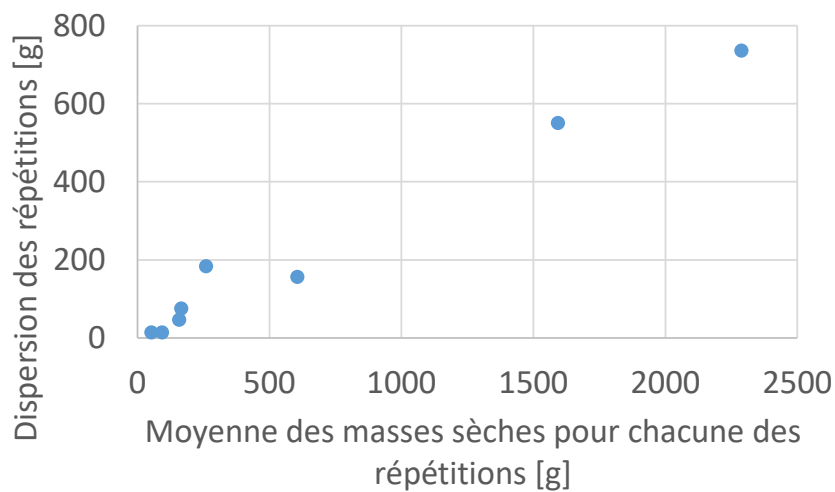


Figure 11 : Répétabilité des prélèvements Helley-Smith.

Des essais de pesée humide ont été réalisés pour étudier la possibilité d'interpréter les résultats sans passer les échantillons à l'étuve pour un calcul de masse sèche, ceci pourrait permettre de gagner du temps lors de prochaines campagne de mesure de ce type. Les résultats sont présentés sur la Figure 12. On observe ainsi une teneur en eau de près de 50%. L'utilisation de l'information de masse humide pour estimer le charriage amènerait cependant une incertitude supplémentaire sachant que le phénomène observé et les préleveurs amènent déjà de nombreuses incertitudes.

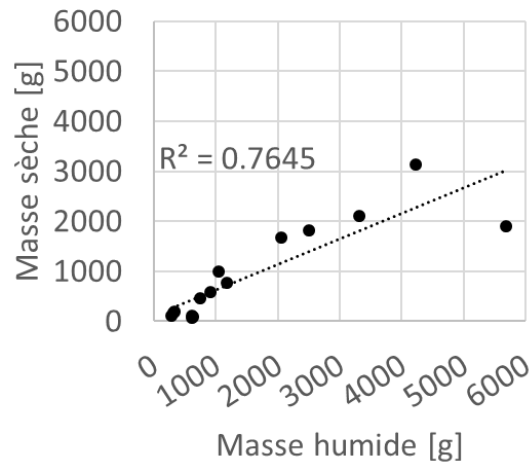


Figure 12 : Comparaison entre masse humide et masse sèche des échantillons charriés (la ligne pointillée est la courbe de tendance).

Le Tableau 3 présente une synthèse des mesures avec le préleveur Helley-Smith.

Tableau 3 : Synthèse des mesures de charriage (Helley-Smith)

date jaugeage solide (TU+1)	Débit Pyrimont [m3/s]	Profondeur d'eau [m]	$q_{sb}$ [kg/s/m]
19/05 14h30-14h50	460	3.2	0.012
20/05 09h10-09h30	540	3.3	0.175
20/05 13h30-13h50	520	3.2	0.066
21/05 09h10-09h30	580	3.2	0.311
25/05 10h50-11h10	460	3.4	0.005
25/05 14h30-14h50	560	3.6	0.002
26/05 11h00-11h20	610	3.7	0.004
26/05 13h50-14h10	570	3.7	0.011

#### 4.4 Mesures du flux de sable en suspension avec la bouteille de Delft

Les prélèvements à la bouteille de Delft ont été effectués à 5 profondeurs. Ces profondeurs sont contrôlées par des capteurs autonomes de pression. Les deux préleveurs sont équipés de telles sondes et sont en bon accord avec le niveau du fond. On remarque dans les séries de hauteur d'eau mesurées par les capteurs que certaines positions sont plus instables que d'autres. En général les trois points les plus proches du fond sont les plus stables car la structure est posée sur le fond (cf. Figure 13). La variabilité de la hauteur d'eau observée pour le 5<sup>ème</sup> point de la Figure 13 pourrait être liée à des mouvements de la structure. On peut aussi noter que les mesures du niveau du fond via ses capteurs sont cohérentes entre Helley-Smith et bouteille de Delft pour les campagnes successives.



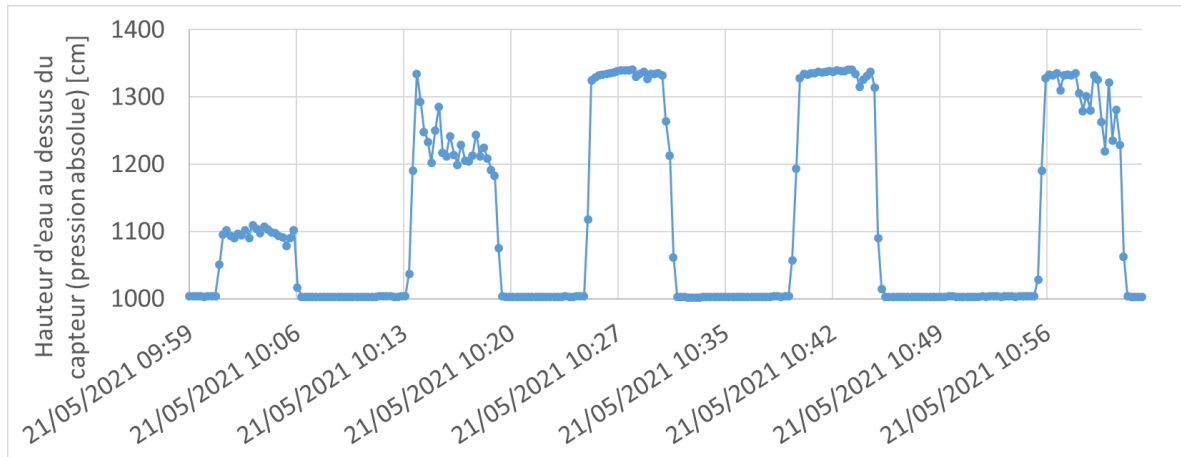


Figure 13 : Exemple d'enregistrement de la pression absolue (convertie en cm de colonne d'eau) sur le capteur autonome de pression installé sur la structure de la bouteille de Delft.

Chaque mesure à la bouteille de Delft permet de déterminer un flux de sable en suspension tel que :

$$q_{ss,i} = \frac{k_{BD} M}{\rho_s S_p T_p} \quad (2)$$

où  $q_{ss}$  est le débit solide en suspension exprimé en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$  à chaque point de prélèvement,  $k_{BD}$  est le coefficient d'efficacité de la bouteille de Delft,  $M$  la masse sèche prélevée (en kg),  $\rho_s$  est la masse volumique du sédiment,  $S_p$  est la surface de la section d'entrée du système de prélèvement et  $T_p$  le temps d'exposition du préleveur. Vu les vitesses observées à l'ADCP et la granulométrie médiane du sable prélevé, le coefficient d'efficacité  $k$  déterminé par les abaques fournis par le constructeur du préleveur serait très proche ou inférieur à 1. Nous avons pris  $k_{BD} = 1$  en première approximation (cf. Figure 14).

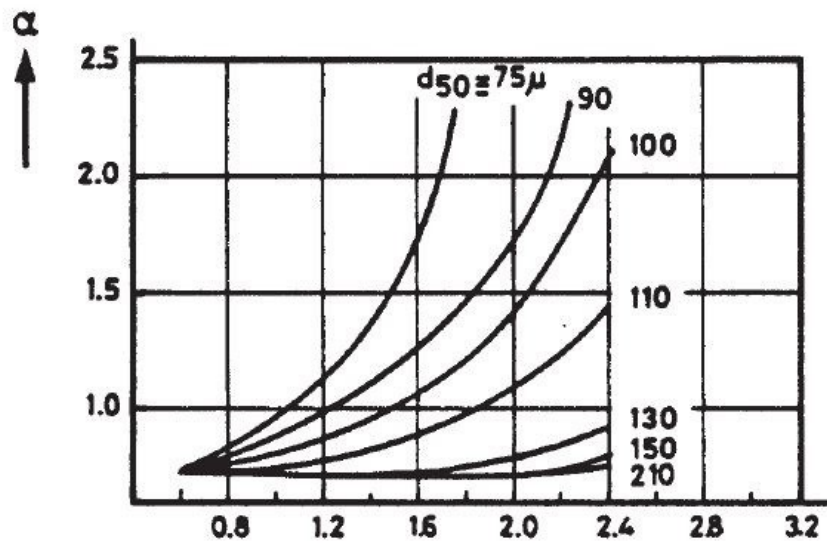


Figure 14 : Abaque pour déterminer le coefficient d'efficacité ( $k_{BD}$  ou  $\alpha$ ) à appliquer à la bouteille de Delft en fonction du  $d_{50}$  et de la vitesse d'approche de l'eau.

Ainsi la mesure du transport solide en suspension sur la verticale exprimé en  $m^3/s/m$  linéaire de section pourra être estimée en première approximation selon :

$$q_{ss} \approx \sum_{i=1}^n q_{ss,i} \Delta z_i \quad (3)$$

avec  $n$  le nombre de points de mesure sur la verticale  $q_{ss,i}$  la valeur du transport solide en suspension par unité de surface au niveau du point de mesure  $i$  à la hauteur  $z_i$  au-dessus du fond, avec  $\Delta z_i$  la hauteur associée à cette mesure sur la verticale.

#### 4.5 Flux de sable en suspension

Le flux unitaire de sable en suspension donné par la bouteille de Delft en chaque point exploré peut être représenté en fonction de la profondeur (cf. Figure 15). On observe les flux les plus importants le 20 mai, correspondant en effet à la période d'ouverture de la vanne de fond avec de très fortes concentrations (Figure 6). Le reste des mesures est plus homogène avec des flux légèrement plus importants en moyenne à proximité du fond.

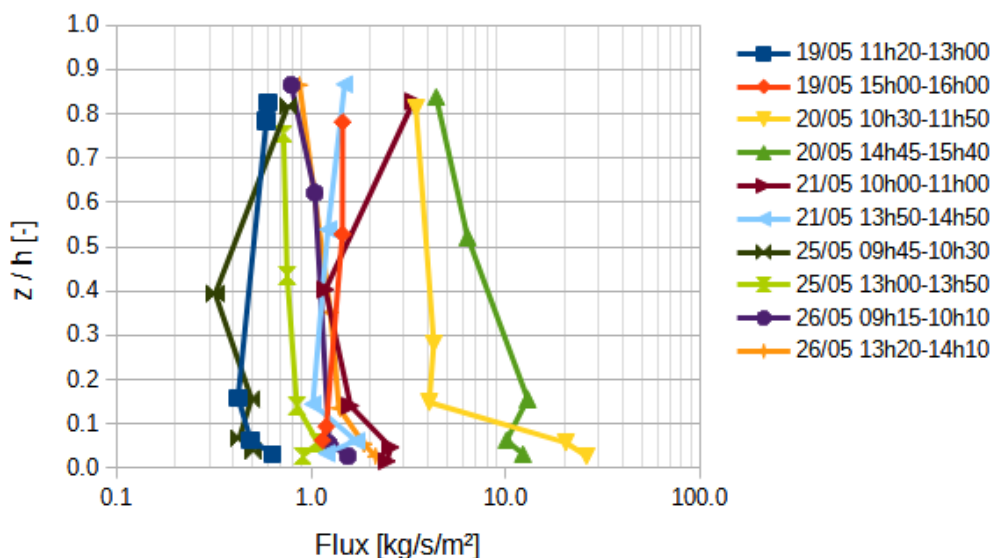


Figure 15 : Profils de flux de sable en suspension pour chacune des verticales

Les flux sur la verticale sont calculés pour chacune des séquences de mesure (Equations 2 et 3). Le Tableau 4 présente une synthèse des flux solide en suspension par unité de largeur estimés à l'aide de la bouteille de Delft.

Tableau 4 : Synthèse des jaugeages solide de sable en suspension intégré sur la verticale, issus de 4 à 5 prélèvements par verticale (Bouteille de Delft)

date jaugeage solide (TU+1)	Débit Pyrimont [m3/s]	Profondeur d'eau [m]	Qss [kg/s/m]
19/05 11h20-13h00	320	3.15	1.7
19/05 15h00-16h00	365	3.20	4.3
20/05 10h30-11h50	510	3.30	19.3
20/05 14h45-15h40	510	3.20	24.8
21/05 10h00-11h00	530	3.20	7.2
21/05 13h50-14h50	530	3.60	4.6
25/05 09h45-10h30	410	3.40	1.8
25/05 13h00-13h50	520	3.56	2.8
26/05 09h15-10h10	610	3.70	3.9
26/05 13h20-14h10	570	3.70	4.4

Le flux de sable en suspension est très supérieur au flux charrié (cf. Figure 16). Il manque cependant des mesures entre le 22 et 24 mai pour pouvoir étudier plus finement la dynamique du sable pendant l'évènement.

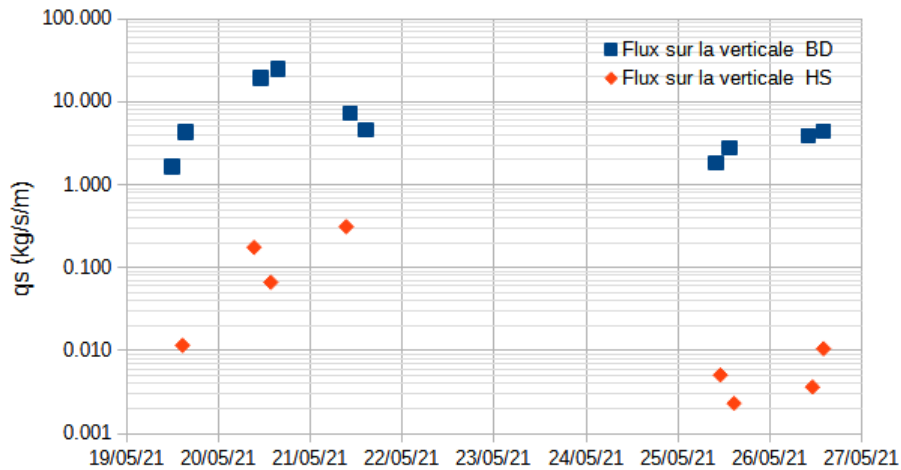


Figure 16 : Données de flux de sable calculées sur la verticale (axe des flux en échelle logarithmique).

En faisant l'hypothèse d'une bande active  $L_a = 60$  m (fixée arbitrairement et correspondant à la moitié de la largeur de la section), il est possible de faire une évaluation très incertaine des flux sableux par charriage et suspension lors de l'événement Apaver. La Figure 17 présente ces flux de sable en comparaison avec les flux de MES. Elle confirme que les flux charriés sont a priori négligeables. Par contre, les flux de sable en suspension semblent non négligeables, bien qu'inférieurs aux flux de MES, notamment lors des ouvertures de la vanne de fond.

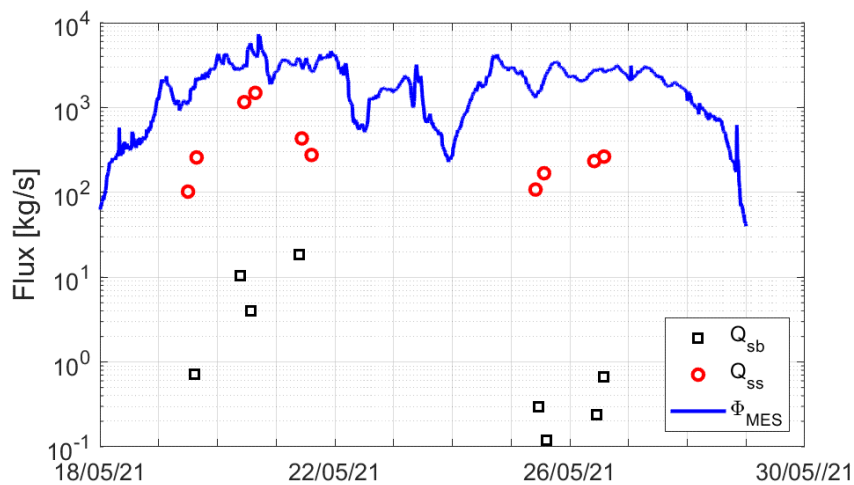


Figure 17 : Données de flux de sable estimées à Pyrimont en comparaison avec les flux de MES.

Durant les séquences pour lesquelles on a des mesures ADCP effectuées simultanément aux mesures à la bouteille de Delft, on peut, en faisant l'hypothèse d'un prélèvements isocinétique, calculer une concentration en sable équivalente  $C_s$ . En effet connaissant le section de la buse d'entrée  $S_p$ , la vitesse d'approche (ADCP) à la hauteur de prélèvement  $z_p$ ,  $U(z_p)$ , et le temps d'exposition du préleveur  $T_p$

on peut facilement calculer le volume  $V = S_p U(z_p) T_p V = SU$  passé dans l'échantillonneur et en déduire la concentration à partir de la masse sèche obtenue  $M$  (cf. Tableau 5) tel que :

$$C_s = \frac{M}{S_p U(z_p) T_p} \quad (4)$$

Ces données sont intéressantes car elles permettent de revenir à une concentration en sable mais il faudrait comparer ces valeurs à des mesures directes de concentration. Par exemple un prélèvement au seau ou issu d'un préleveur, analysé par séparation par tamisage, pourrait donner une information intéressante pour la validation du point de sub-surface effectué à la bouteille de Delft. En effet on a observé sur d'autres campagnes de mesure récentes une tendance probable à la sous-estimation du flux de sable par la bouteille de Delft (Camenen et al. 2022). On notera par ailleurs que les concentrations en sable estimées restent inférieures au g/l et sont donc d'un ordre de grandeur plus faible que les concentrations en MES mesurées (Figure 6).

*Tableau 5 : Estimation des concentrations en sable issues de la bouteille de Delft pour les campagnes concomitantes avec des mesures de profils ADCP*

Date	Profondeur [m]	Vitesse ADCP [m/s]	Flux [kg/s/m <sup>2</sup> ]	Volume passé [l]	Concentration [g/l]
21/05/2021	0.5	2.2	1.49	125	0.68
21/05/2021	1.7	2	1.22	113	0.61
21/05/2021	3.1	1.6	1.02	91	0.64
25/05/2021	0.6	2.1	0.76	119	0.36
25/05/2021	2.1	1.9	0.32	108	0.17
25/05/2021	2.9	1.6	0.49	91	0.31
25/05/2021	0.9	2.4	0.72	136	0.30
25/05/2021	2.0	2.1	0.75	119	0.36
25/05/2021	3.1	1.7	0.85	96	0.50
26/05/2021	1.4	2.5	1.05	142	0.42
26/05/2021	3.5	2.4	1.24	136	0.52
26/05/2021	3.6	1.6	1.54	91	0.96
26/05/2021	0.5	2.3	0.87	130	0.38
26/05/2021	2.4	2	1.26	113	0.63
26/05/2021	3.2	1.5	1.39	85	0.93

Sur la base du modèle de transport solide par capacité pour la suspension de sable proposé par Camemen & Larson (2008), nous avons essayé de reproduire les profils de concentration et flux issus des prélèvements avec la bouteille de Delft pour lesquels des mesures ADCP étaient disponible. Le calage du profil des vitesses a été réalisé sur le terme rugosité (Figure 18 a) permettant ainsi d'évaluer une contrainte de forme. L'application directe du modèle de Camenen & Larson (2008) donne des concentrations trop élevées indiquant que le fond du lit n'était pas entièrement composé de sable mais d'une fraction de sable se propageant sur une matrice plus grossière. Un calage a ainsi été réalisé pour mieux reproduire les profils de concentration avec le modèle sur la base d'une simple teneur en sable au fond (variant ici de 18 à 35%). On peut s'apercevoir que pour certains profils, les points expérimentaux restent dispersés et ne suivent pas le profil exponentiel (Figure 18 b). En multipliant le



profil de vitesse (Figure 18 a) avec le profil de concentration (Figure 18 b), nous pouvons estimer un profil de flux (Figure 18 c). Contrairement à l'impression donnée par les points expérimentaux, le profil de flux théorique indique un maximum pour une valeur de  $z/h \approx 0,1$ .

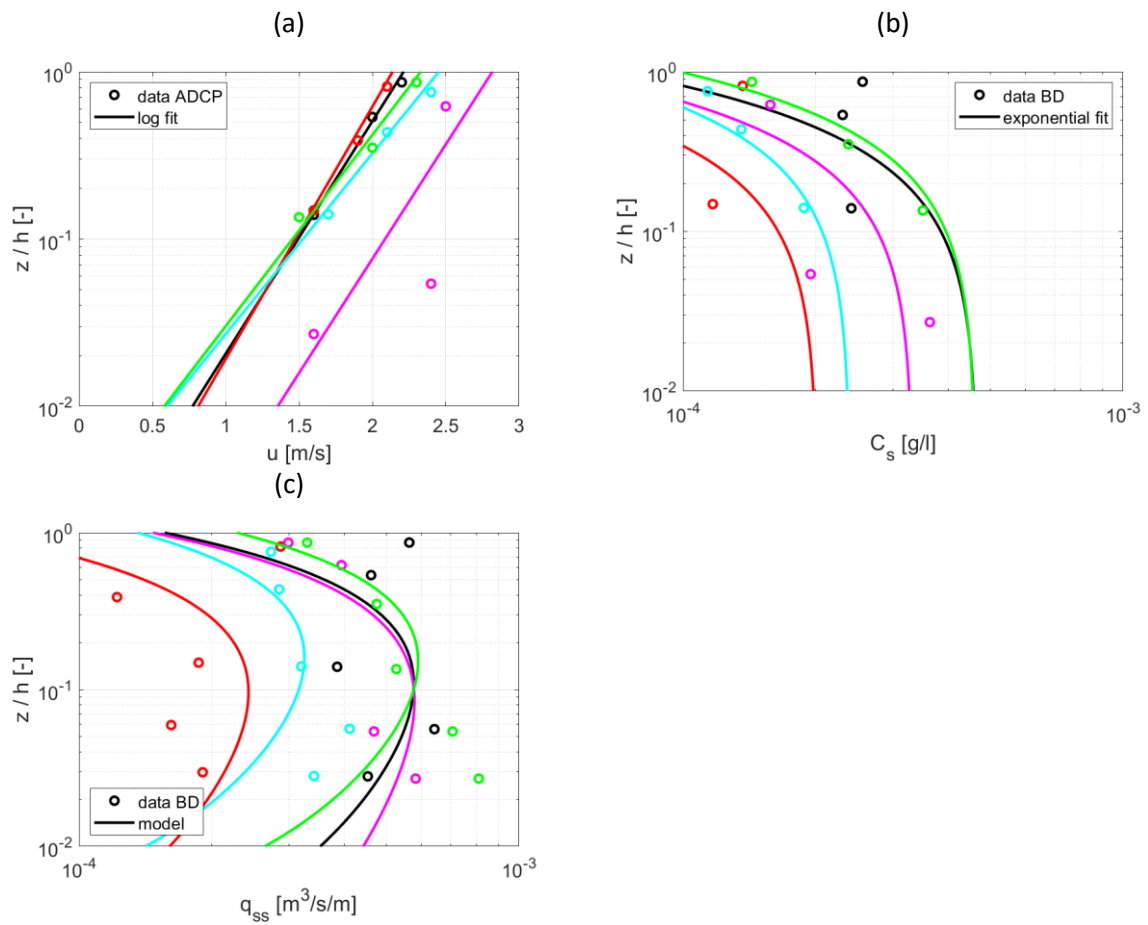


Figure 18 : Profils verticaux mesurés à Pyrimont et modélisés pour des vitesses d'écoulement (a) les concentrations en sable (b) et les flux de sable (c).

## 5 Conclusions et perspectives

Malgré la perte partielle du drone aquatique de INRAE qui a entraîné une réorganisation des essais et un jeu de données moins riche que prévu, plusieurs points ont été très positifs durant cette campagne de mesure :

- Le système de déploiement des préleveurs développé par le Cacoh est un outil très intéressant. Il ne remplacera malheureusement pas la traîle téléphérique de Bognes qui permettait des déploiements distribués dans la section et des mesures de flux total. Ce dispositif peut permettre des mesures intéressantes pour le suivi de la verticale centrale à Pyrimont où le flux est probablement plus homogène qu'à Bognes, mais ne permet pas facilement à court terme d'estimer un flux total sur la section. Pour cela, il serait nécessaire d'estimer une relation entre le flux sur la verticale et des jaugeages solides complets à Pyrimont, éventuellement par des traversées avec un capteur acoustique. Le dispositif de déploiement pourrait être amélioré avec l'utilisation d'un câble électroporteur permettant d'utiliser d'autres instruments et un compteur permettant de déterminer la profondeur d'immersion en direct.
- Au niveau temporel le suivi de la verticale est très intéressant, il permet de mettre en évidence l'arrivée de sable en suspension lors des manœuvres de la vanne de fond. Ce suivi aurait été d'autant plus intéressant si toutes les journées de l'opération APAVER avaient été suivies.
- Sur la verticale, les résultats obtenus avec la bouteille de Delft semblent cohérents et l'information de vitesse ADCP permet de recalculer des concentrations en sable. Ces résultats et le calage de profils verticaux de concentration et de flux seront d'une grande utilité pour la calibration/validation des mesures obtenues avec les technologies acoustiques (UBMES).
- Des mesures complémentaires avec d'autres préleveurs pourraient être envisagées lors des prochaines opérations d'APAVER, en vue de la validation de la bouteille de Delft pour estimer les flux de sable. Des mesures en crue « naturelle » pourraient également apporter des informations intéressantes.

## 5 Bibliographie

Camenen B. & Larson M. (2008). A suspended load sediment transport formula for the nearshore. *J. of Coastal Res.*, 24(3): 615-627.

Camenen et al. (2022) Synthèse des mesures hydro-sédimentaires lors de la chasse de la Basse-Isère de janvier 2021, Rapport, 91p.

Guertault, L. (2015). Évaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongé: application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard, Lyon 1.



**Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes**

5 rue de la Doua – CS 20244  
69625 Villeurbanne Cedex  
Tél. : +33 1 (0)4 72 20 87 87

Rejoignez-nous sur :



[site internet national](#) ou [site internet du centre](#)



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**INRAE**