HAL
open science

Expériences de terrain sur le site Arc-Isère pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses

B. Camenen, A. Buffet, Fabien Thollet, R. de Angelis, L. Pénard

To cite this version:

B. Camenen, A. Buffet, Fabien Thollet, R. de Angelis, L. Pénard. Expériences de terrain sur le site Arc-Isère pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses. [Rapport de recherche] irstea. 2019, pp.61. hal-02610012

HAL Id: hal-02610012

https://hal.inrae.fr/hal-02610012v1

Submitted on 16 May 2020

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.

Expériences de terrain sur le site Arc-Isère pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses

Benoît Camenen, Alexis Buffet, Fabien Thollet, Robin de Angelis et Lionel Pénard

Irstea Lyon-Villeurbanne

5 rue de la Doua, CS 70077, 69626 Villeurbanne cedex, FRANCE

Septembre 2019

Table des matières

1. Introduction....4
1.1. Site d'étude....4
1.1.1. Le site Arc Isère....4
1.1.2. Le banc de Fréterive....5
1.1.3. Le site de Ste-Marie-de-Cuines....6
1.2. Mesure de la suspension sableuse dans un chenal secondaire de l'Isère au niveau du banc de Fréterive....6
1.2.1. Mesures réalisées....6
1.2.2. Protocole de travail....8
1.3. Mesure de la dynamique des MES dans l'Arc au niveau de Ste-Marie-de-Cuines....8
1.3.1. Mesures réalisées....8
1.3.2. Protocole de travail....8
2. Test d'un système de prélèvement des sables par pompage....9
2.1. Pompes testées....9
2.2. Vitesse d'aspiration de pompe....10
2.3. Validation des mesures de concentration en sable par pompage....10
2.3.1. Iso-cinécité....10
2.3.2. Inter-comparaison des méthodes....10
2.3.3. Perspectives de mesures....10
3. Flux de Matière en Suspension (MES) dans l'Isère au pont de Grésy....11
3.1. Débits....11
3.2. Concentrations....11
3.3. Flux....11
4. Hydrodynamique et transport de sable dans le chenal secondaire....12
4.1. Évolution du niveau d'eau et de la pente de la surface libre....12
4.2. Hydrodynamique du chenal secondaire....13
4.2.1. Débit dans le chenal secondaire....13
4.2.2. Contraintes moyennes sur la section....14
4.3. Suspension graduée dans le chenal secondaire....14
4.3.1. Mesure des concentrations en sable....14
4.3.2. Mesure de la suspension graduée de sables....14
5. Morphodynamique du banc de galet....15
5.1. Evolution de la bathymétrie du banc....15
5.2. Evolution de l'état de surface du banc....16
6. Estimation des flux de sable sur l'Arc lors d'une chasse....18
6.1. Chasse de l'Arc du 18 juin 2019....18
6.2. Prélèvements réalisés....18
6.3. Estimation des flux de sable lors de la chasse....18
6.3.1. Courbe de tarage sédimentaire....18
6.3.2. Bilan pour la chasse de l'Arc du 18 juin 2019....18

7. Estimation de la dynamique des dépôts sur un banc de galet par analyse d'image.....19
7.1. Analyse d'image du banc de galet.....19
7.1.1. Système de prise de photo depuis la berge.....19
7.1.2. Analyse d'image réalisée.....19
7.2. Granulométrie de surface du banc avant et après la chasse.....19
7.3. Dynamique des dépôts de surface sur le banc.....19
8. Conclusions et perspectives.....20
8.1. Flux de sable sur l'Arc et l'Isère.....20
8.2. Dynamique des dépôts de fines sur un banc de galet.....20
8.3. Dynamique sédimentaire dans la Combe de Savoie.....20
9. Références.....21

1. Introduction

L'objectif de ces expériences de terrain est de mieux comprendre la dynamique sableuse dans le cas d'une rivière alpine anthropisée (endiguée, barrages hydro-électriques) avec une granulométrie étendue : l'Isère. Depuis son endiguement au 19ème siècle, l'Isère a développé des systèmes de bancs de galets alternés qui se sont fortement végétalisés ces dernières décennies. En particulier, sur la Combe-de-Savoie, cette végétation mature a fortement accru le risque d'inondation du fait de la réduction importante de la débitance. Ainsi, le Syndicat Mixte de l'Isère et de l'Arc en Combe de Savoie (SISARC) a proposé d'importants travaux de restauration de l'Isère consistant principalement en un arasement de bancs végétalisés, la mise en dépôt des matériaux sablo-limoneux, et le terrassement de bancs de galets (cf. Figure 1). Une crainte demeure sur la pérennité de tels systèmes, soit de leur dynamique en régime normal et en crue. En effet, le potentiel développement de la végétation en lien avec les dépôts sablo-limoneux pourrait fortement limiter la dynamique du système avec un retour inéluctable vers des bancs avec une végétation haute.

Figure 1 : Photos des travaux réalisés sur l'Isère en Combe de Savoie (photo SISARC) et d'un banc remodelé (photo Camenen)

Dans le cadre de nos expériences, nous allons nous focaliser sur la compréhension de la dynamique des matériaux fins (limons, sables) : flux, échanges avec le fond, sur la période printanière (de mars à juillet 2019) tout particulièrement sur les événements (chasse d'Aigueblanche).
Ce document décrit les moyens mis en œuvre, les méthodologies utilisées, ainsi que les résultats d'expériences réalisées sur cette période. Il inclut des travaux sur le banc de Fréterive dans la continuité des travaux réalisés en 2018 (Camenen et al., 2018a), ainsi que des mesures réalisées sur le site de Ste-Marie-de-Cuines sur l'Arc pendant la chasse du 18 juin, que nous étudions depuis plusieurs années.

1.1. Site d'étude

1.1.1. Le site Arc Isère

Les expériences ont été réalisées sur deux sites du site atelier Arc-Isère de la ZABR (Zone Atelier du Bassin du Rhône) :

- Tout d'abord sur le principal site d'étude du projet, soit sur un tronçon d'environ 5 km de l'Isère en Combe-de-Savoie en amont de la confluence avec l'Arc (Figure 2). Pour alimenter notre étude, nous avons ainsi bénéficié de données hydro-sédimentaires complémentaires provenant du réseau de mesure de la DREAL (stations de débit d'Albertville, Grignon et Pont-de-Grésy sur l'Isère, de Venthon sur l'Arly, et d'Aiguebelle sur l'Arc) . Le positionnement de ces stations est indiqué sur la Figure 2.
- Plusieurs tests ont de plus été réalisés sur notre site d'étude de l'Arc à Ste-Marie-Cuines (Figure 2), en particulier pour l'étude d'un banc de galet où sont disposées des appareils photos .

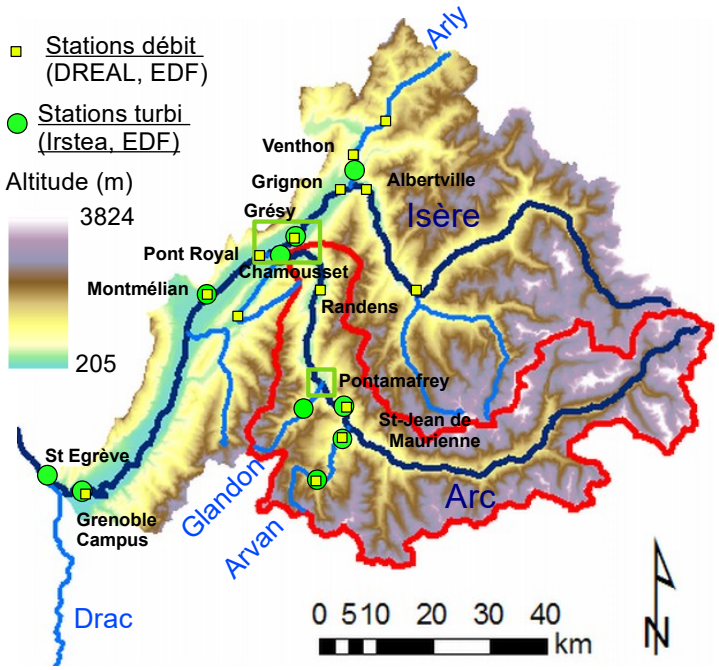


Figure 2 : Localisation des sites d'étude (encadrés en vert) sur le site Arc-Isère

1.1.2. Le banc de Fréterive

Le site étudié se focalise plus particulièrement sur le banc de Fréterive positionné en rive droite deux kilomètres en amont de la confluence avec l'Arc (Figure 3). Ce banc fait l'objet d'une étude plus complète réalisée par EDF (CIH et LNHE, sous-traitée en partie à Geopeka) incluant une étude in-situ de la morphodynamique du banc (mesures bathymétriques, chaîne d'érosion), et de la dynamique des dépôts (analyse de la granulométrie de surface du banc à différentes périodes, placettes colorée, mise en place d'un appareil photo en « time laps ») ainsi qu'une étude numérique (modélisation 2D Telemac) de la dynamique des matériaux fins (limons et sables).
Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes focalisés cette année sur les flux en MES et tout particulièrement les flux sableux au niveau du banc de Fréterive entrant dans le chenal secondaire du banc.

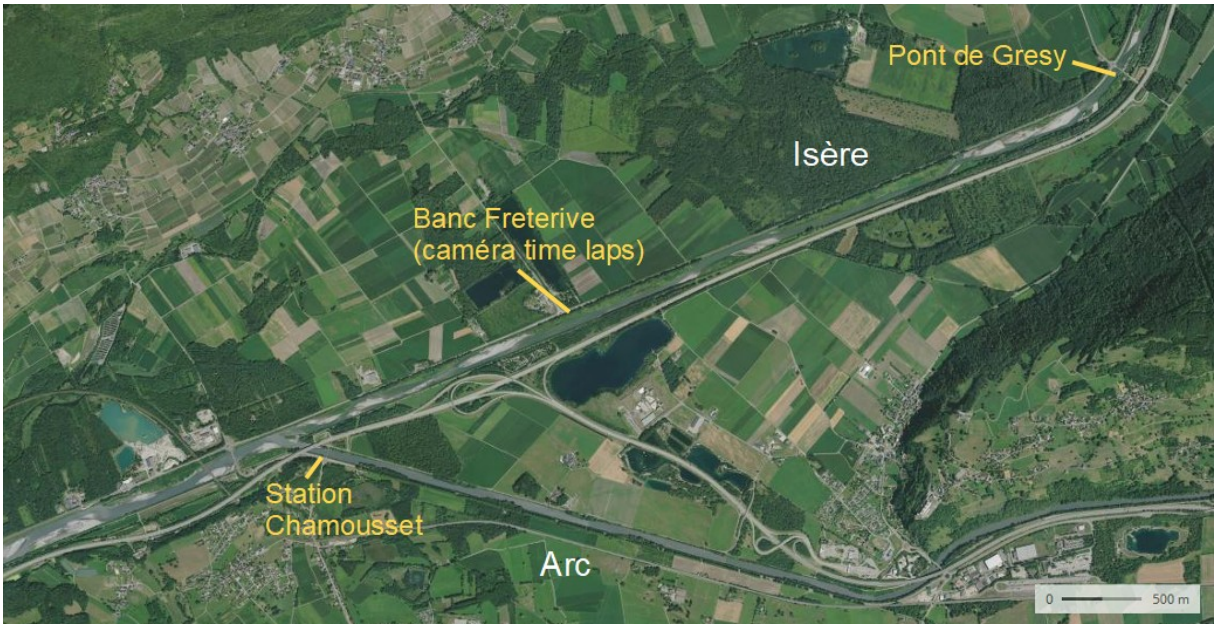


Figure 3 : Localisation des sites de mesure sur l'Isère : banc de Fréterive et pont de Grésy. Il est à noter que l'image aérienne ne donne pas une vision actuelle de la position et de l'état des bancs de galets de l'Isère.

1.1.3. Le site de Ste-Marie-de-Cuines

Afin de réaliser des tests plus méthodologiques, nous avons aussi fait des expériences de terrain encadrant la chasse de l'Arc (18 juin 2019) au niveau de Ste-Marie-de-Cuines sur un tronçon de l'Arc que nous étudions depuis plus d'une dizaine d'années (Jaballah et al., 2015). Dans le cadre d'un projet avec l'agence de l'eau AERMC (Pénard et al., 2019), nous avons aussi pu exploiter les résultats issus d'appareils photographiques installés en berge (caméra « time laps ») visant un banc de galets (Camenen et al., 2017).

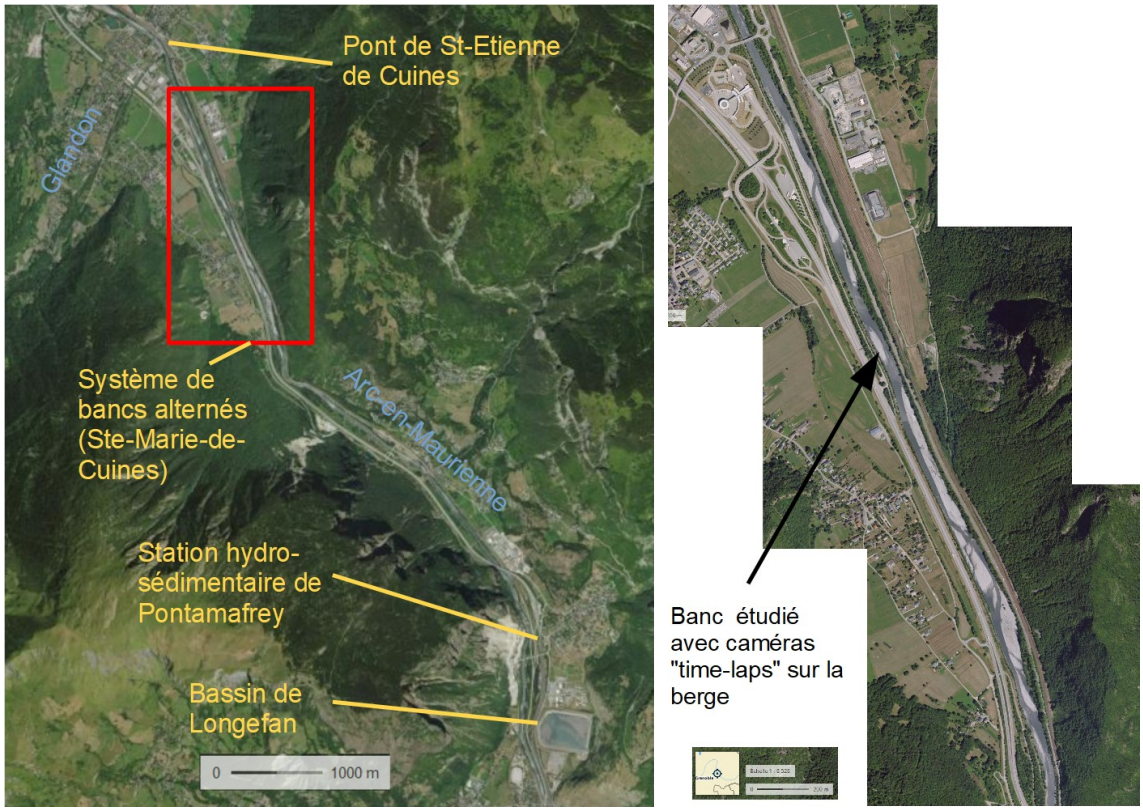


Figure 4 : Localisation des sites de mesure sur l'Arc : banc de Ste-Marie-de-Cuines et pont de St-Etienne-de-Cuines.

1.2. Mesure de la suspension sableuse dans un chenal secondaire de l'Isère au niveau du banc de Fréterive

Le banc de Fréterive est situé en rive droite deux kilomètres en amont de la confluence avec l'Arc (Figure 3). Comme présenté en Figure 5, un chenal secondaire s'est formé entre la berge végétalisée (constituée d'une marche d'environ 2 m) et le banc. Sur la partie amont du banc, la granulométrie médiane de la surface du banc est centimétrique ($d_{50} \approx 5$ cm , Figure 5b) alors que d'importants dépôts sablo-limoneux peuvent être observés en particulier en sa partie aval (Figure 5c) correspondant en grande partie aux dépôts développés suite aux événements de printemps 2018 (Camenen et al., 2018a). Dans le chenal secondaire, le fond reste relativement grossier sur quasi l'ensemble de son linéaire même si des dépôts de fines peuvent être observés dans une mouille sur la partie amont et à l'aval). Il est alimenté à débit faible par un chenal transverse à l'amont du banc (radier observable en Figure 5a au premier plan, l'écoulement se faisant de gauche à droite) mais l'alimentation se fait directement par l'amont pour les plus forts débits (lorsque le banc est submergé). Depuis l'année dernière, un petit dépôt s'est formé au milieu du chenal secondaire sur la partie aval de ce dernier (Figure 5d).

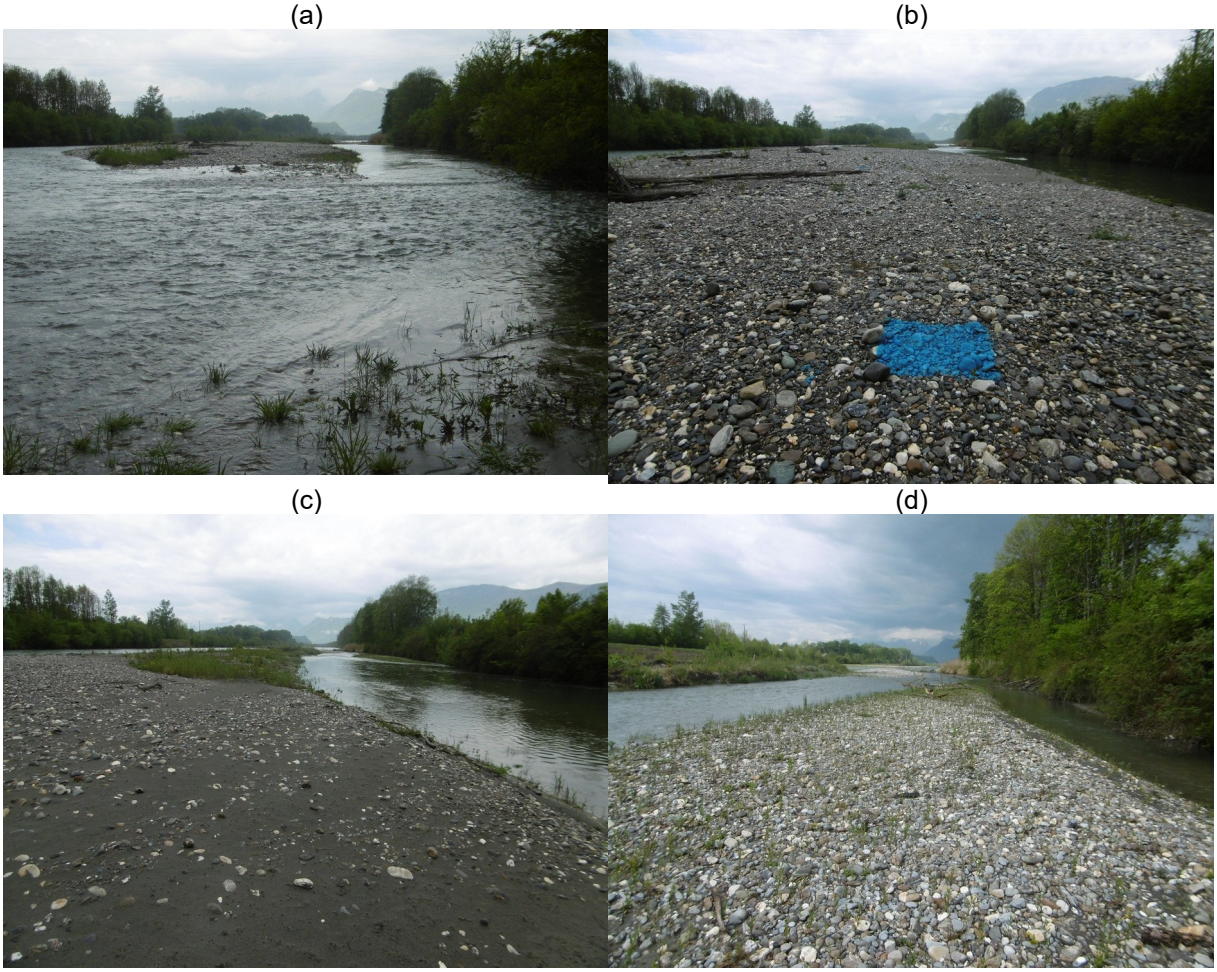


Figure 5 : Photos du chenal secondaire du banc de Fréterive (vues vers l'aval) du radier amont (a), de la partie amont du banc, la placette colorée bleue correspondant à des expériences réalisées par Geopeka (b), de la partie médiane (c), et de la partie aval sur le dépôt dans le chenal secondaire (d) (photos Camenen , 2 mai 2019).

L'objectif cette année était d'étudier la dynamique hydro-sédimentaire au niveau du banc en se focalisant tout particulièrement sur les flux de MES. Les mesures hydro-dynamiques ont donc été limitées à une mise en place de trois capteurs de pression pour mesurer le niveau d'eau dans le chenal secondaire (Figure 6).

Deux turbidimètres ont été placés en amont du banc (rive gauche du fait des difficultés d'accès pour la mise en place d'un appareil en river droite) et en aval du chenal secondaire, afin d'évaluer un possible différentiel de flux par rapport à la station de Pont-de-Grésy (possibles dépôts sur les bancs), voire d'observer un abattement au niveau du chenal secondaire (second turbidimètre). Malheureusement, les chroniques obtenues présentent de nombreuses lacunes du fait des nombreuses difficultés observées, en particulier du point de vue de l'alimentation éléctrique.

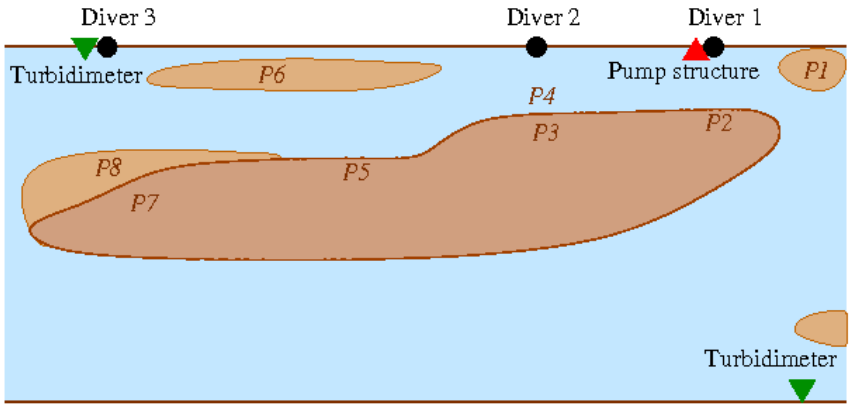


Figure 6 : Schématisation des différents instruments installés sur le site de Fréterive ainsi que les prélèvements de dépôts de surface réalisés le 2 mai 2019

La Figure 7 présente des photos de l'instrumentation mise en place avec en aval du chenal secondaire un turbidimètre Hach-Lange Solitax jusqu'à 50g/l alimentée par une batterie soutenue par un panneau solaire. En amont sur le chenal secondaire, nous avons fixé une sonde autonome Campbell OBS05+.

(a) (b)

Figure 7 : Photos de l'instrumentation mise en place sur le banc de Fréterive : (a) Turbidimètre et capteur de pression à l'aval dans le chenal secondaire, et (b) turbidimètre amont en rive gauche du chenal principal (photos Thollet, 19 mars 2019).

Comme nous pouvons nous en apercevoir sur la photo Figure 7b, cette sonde a été fixée juste en amont d'une confluence avec un ruisseau de turbidité très faible. Nous avons vérifié que la turbidité mesurée par le capteur correspondait bien à la turbidité de l'Isère (chenal principal) ; l'écoulement (d'eau claire) lié à l'affluent ne remontait pas jusqu'au capteur et n'impactait donc pas la mesure.

Des prélèvements ont aussi été réalisés sur des missions ponctuelles à différentes profondeurs d'eau dans le chenal secondaire (partie amont, cf. Figure 6 et Figure 8) à l'aide d'une structure posée dans le chenal. Il est à noter que la position de cette expérimentation est la même que pour les expérimentations de 2018. Si alors, la position correspondait au premier tiers du chenal secondaire, du fait de la mobilité du banc, elle correspond pour nos expériences du printemps 2019 à l'amont du chenal secondaire, en aval immédiat du radier amont (Figure 5a).

Figure 8 : Photos du système de prélèvement par pompage (photos Camenen, mai 2019).

A la différence de l'année dernière, la structure était posée en rive droite du chenal secondaire, proche de la berge dans la zone plus profonde du chenal. Lors de ces expériences, les principales mesures réalisées ont été :

- des prélèvements par pompage à différentes positions au dessus du fond pour permettre de mieux caractériser la suspension graduée de sable en fonction de l'écoulement (Camenen et al., 2017 ; Camenen et al., 2018a) ;
- des mesures de vitesses au niveau de la structure à l'aide d'un courantomètre électromagnétique ;
- des mesures de concentrations et granulométrie avec le LISST100X ;

et lorsque le banc était accessible, quelques prélèvements et photographies pour une analyse de l'état de surface du banc.

Quatre campagnes de mesures ont été réalisées sur la période d'étude (printemps 2019) ; les principales caractéristiques hydro-sédimentaires sont synthétisées dans le Tableau 1. On peut s'apercevoir d'une certaine cohérence entre les résultats mesurés indépendamment, soit une concentration moyenne en sable qui augmente avec la vitesse d'écoulement local dans le chenal, qui elle-même augmente avec le débit de l'Isère. On note toutefois une très forte variabilité des débits le 12 juin 2019 avec un débit chutant de 160 m³/s à 105 m³/s entre 10h et 12h (TU+1). Il se peut donc que certaines mesures de concentration (la mesure de vitesse ayant été effectuée avant les mesures de concentrations) ait été réalisées pour des débits plus faibles car l'expérimentation s'est terminée à 10h45 (TU+1).

Tableau 1: Campagnes de mesure réalisées au niveau du chenal secondaire du banc de Fréterive au printemps 2019			
Date	Débit de l'Isère (m³/s) à Pont-de-Grésy	Vitesse d'écoulement (m/s) à 20 cm au dessus du fond	Concentration (mg/L) moyenne en sable
02/05/2019	≈ 55	0.15	20
22/05/2019	≈ 65	0.20	55
04/06/2019	≈ 105	0.40	100
12/06/2019	≈ 160	0.70	150

1.3. Mesure de la dynamique des MES dans l'Arc au niveau de Ste-Marie-de-Cuines

La campagne à Ste-Marie-de-Cuines a été réalisée entre le 17 et 19 juin 2019, encadrant la chasse de l'Arc du 18 juin. Les expériences réalisées étaient focalisées sur la mesure des flux en MES et les échanges de sédiments fins sur un banc de galets lors de la chasse. Les principales mesures réalisées ont donc été :

- Mesures des flux de sable lors de l'événement de chasse à l'aide d'une bouteille de Delft et d'un système de prélèvement par pompage associées à des mesures de vitesses de surface ;
- Mesures de la topographie et granulométrie de surface avant et après la chasse et analyse de photographies prises de la berge.

Figure 9 : Photos de l'expérimentation au pont de St-Etienne-de-Cuines avec un zoom sur la structure de la bouteille de Delft avec le système de pompage adapté sur la bouteille (a) et de la manipe de topographie et granulométrie de surface sur la banc de Ste-Marie-de-Cuines (vue de rive droite ; à noter que les appareils photographiques sont positionnés en hauteur sur des arbres légèrement au-dessus de l'échelle).

2. Test d'un système de prélèvement des sables par pompage

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

2.1. Pompes testées

Les premiers essais réalisés avec des préleveurs de type ISCO en 2017 sur un chenal secondaire (Camenen et al., 2017 ; 2018b), puis en 2018 depuis le pont de Grésy (Camenen et al., 2018a). Les limites liées à leur puissance de pompage (problématique en cas de hauteur de charge de plusieurs mètres) et surtout liées à l'impossibilité de maîtriser la vitesse de pompage nous ont poussé à tester une pompe péristaltique plus puissante et avec variateur. Nous avons choisi une pompe péristaltique Albin Pump ALP17 (Figure 10a, au premier plan).

(a)

(b)

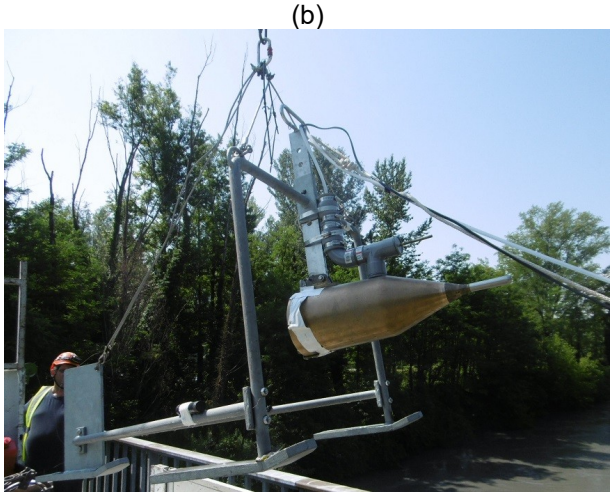


Figure 10 : Photos de la pompe péristaltique lors de la manipes sur l'Arc pendant la chasse du 18 juin 2019 (a) et du système de pompe de forage (adapté sur la bouteille de Delft) lors de la manipe sur l'Isère à Grenoble le 4 juillet 2019 (b) (photos Thollet et Camenen).

Il est à noter que l'équipe d'Irstea Grenoble travaille sur une problématique similaire en utilisant des pompes immergées utilisées pour le pompage de fluide dense en forage (Figure 10b). Ce type de pompe a l'avantage d'être beaucoup plus puissante et donc adaptable à tout type de rivière (en terme de vitesse et hauteur de charge) ; elles sont cependant plus fragiles que les pompes péristaltiques, nécessitant ainsi une grille de protection (voire même une chambre de décantation, cf.

photo Figure 10b, partie en appui sur la bouteille avant le coude) qui complexifie la méthodologie de mesure, i.e. comment intégrer dans les échantillons la partie sédimentée et/ou bloquée par la grille.

2.2. Vitesse d'aspiration de pompe

2.2.1. Théorie

La vitesse d'aspiration de la pompe est un paramètre qui doit être maîtrisé puisque le but est que cette vitesse d'aspiration soit la plus proche possible de la vitesse de l'écoulement afin de faire des mesures iso-cinétiques (cf. paragraphe 2.3.1). Cependant, les différentes pertes de charge le long du système (pertes de charge singulières au niveau des changements de section, coudes ; pertes de charge linéaires le long du tuyau…) impactent fortement la vitesse d'aspiration, tout comme la hauteur de charge (Carlier, 1986). Entre un point 1 et 2, on peut ainsi appliquer la formule de Bernouilli :

$$(p_2 - p_1) + \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2) + \rho g (z_2 - z_1) = -\Delta p \qquad \textit{Eq. 1}$$

avec p_i et V_i la pression et la vitesse au point i d'altitude z_i, ρ la masse volumique de l'eau, $g = 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}$ l'accélération de la pesanteur et Δp les pertes de charges. Les pertes de charge linéaire s'écrivent selon la formulation de Darcy (1857) :

$$\Delta p_{lin.} = \lambda \frac{\rho V^2}{2} \frac{L}{D} \qquad \textit{Eq. 2}$$

avec λ un coefficient de frottement, L la longueur de tuyau et D son diamètre. Dans le cas d'un régime turbulent, on applique la formule de Colebrook-White (1937) pour déterminer λ :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -\log_{10}\left(\frac{2{,}51}{\Re} \times \frac{1}{\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3{,}7\,D}\right) \qquad \textit{Eq. 3}$$

avec $\Re = V D / \nu$ le nombre de Reynolds et k la rugosité du matériau ($k = 1{,}5 \times 10^{-6}\,\mathrm{m}$ pour du PVC). L'application de l'Eq. 3 (abaque de Colebrook-White) donne donc ($D = 8 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}$) : $\lambda = 0{,}015$.

Les pertes de charge singulières s'écrivent de manière similaire :

$$\Delta p_{sing.} = K \frac{\rho V^2}{2} \qquad \textit{Eq. 4}$$

avec K un coefficient. Pour un coude arrondi, la formule de Weisbach donne :

$$K = \left[0{,}131 + 1{,}847\left(\frac{D}{2r}\right)^{3{,}5}\right]\frac{\theta}{90} \qquad \textit{Eq. 5}$$

où r est le rayon de courbure du coude en mètres et θ la déviation en degrés. Pour nos cas particuliers, on peut donc estimer $K = o(1)$

Pour un diamètre de tuyau donné, il est donc possible d'établir une relation directe de la vitesse d'aspiration avec la hauteur de charge $\Delta h = z_2 - z_1$ et la longueur du tuyau L. A partir des

équations 1, 2, et 4, en faisant l'hypothèse que $V_2 - V_1 \ll V_1 \approx V_2 = V$ (puisque l'on cherche à conserver la vitesse d'écoulement), on a :

$$V = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)/\rho + (V_1^2 - V_2^2) - 2g(z_2 - z_1)}{K + \lambda L/D}} \qquad \textit{Eq. 6}$$

L'Eq. 6 après simplification peut s'écrire :

$$V = \sqrt{\frac{A - 2g\Delta h}{B + CL}} \qquad \textit{Eq. 7}$$

avec A, B et C des coefficients. A correspond à la charge maximum que peut supporter la pompe, $B = K$ au coefficient de perte de charge singulière et $C = \lambda / D$ au coefficient de frottement. Pour notre cas particulier ($D = 8 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}$, $\lambda = 0{,}015$, $K \approx 0{,}5$), on a donc $B = o(1)$ et $C = \lambda / D \approx 2 = o(1)$.

2.2.2. Test de pompes

Après quelques tests préliminaires, l'efficacité de la pompe péristaltique Albin Pump ALP17 a été optimisée en prenant des tuyaux de diamètre 8 mm et en modifiant la position des galets. Le Tableau 2 présente l'ensemble des tests de sensibilité de la pompe à la hauteur d'aspiration et aux longueurs de tuyaux.

Tableau 2: Sensibilité de la mesure de vitesses aux deux paramètres : hauteur d'aspiration et longueur des tuyaux

Vitesse V (m/s)	Hauteur d'aspiration Δh (m)		
Longueur totale des tuyaux L (m)	0	2,0	3,8
2,6	3,7	x	x
7,1	2,7	2,4	2,1
8,1	2,1	2,0	1,7
13,6	1,5	1,5	1,2

La Figure 11a présente les résultats de vitesse de pompage en fonction de la longueur de tuyau et de la hauteur de charge pour la pompe péristaltique Albin Pump ALP17 avec un tuyau PVC de diamètre 8 mm. On s'aperçoit bien au regard des résultats expérimentaux de la forte sensibilité de la longueur de tuyau et de la hauteur de charge. A la vue des incertitudes, l'Eq. 7 donne une bonne représentation des résultats avec $A = 175\,\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$, $B = 2$ et $C = 4\,\mathrm{m}^{-1}$ (en cohérence avec les premières évaluations de ces coefficients). On observe ainsi que la limite maximal de hauteur d'aspiration serait d'environ 9 m.

Quelques mesures ont aussi été réalisées avec un préleveur de type ISCO (Figure 11b). Il apparaît que pour des longueurs de tuyau et/ou autre d'aspiration équivalentes, les vitesses d'aspiration de l'ISCO sont beaucoup plus faibles et restent inférieures à 1 m/s, ce qui peut être problématique pour une application en rivière où les vitesses peuvent être bien plus importantes. On s'aperçoit cependant

que la sensibilité à la hauteur de charge est très faible. L'application de l'Eq. 7 donne ainsi les coefficients $A=175\,\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$, $B=120$ et $C=25\,\mathrm{m}^{-1}$. Ceci est assez étonnant car on aurait imaginé au contraire une valeur plus faible de A et des valeurs à peu près similaires pour les pertes de charges linéaires et singulières…

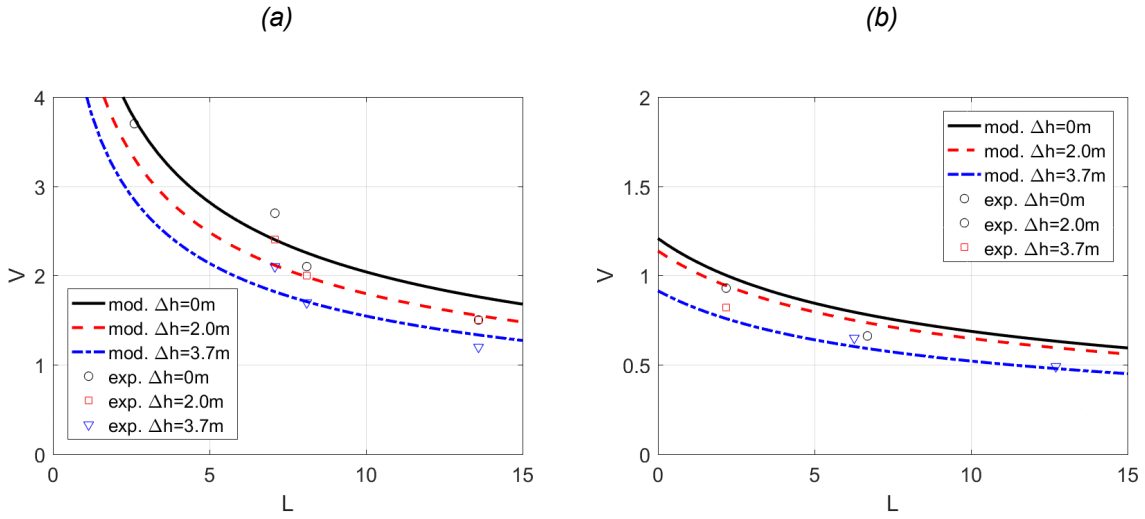


Figure 11 : Vitesse de pompage en fonction de la longueur de tuyau et de la hauteur de charge : (a) pompe péristaltique Albin Pump ALP17 ; (b) ISCO.

2.3. Validation des mesures de concentration en sable par pompage

2.3.1. Iso-cinécique

Même s'il existe que peu de mesure pour le valider, les équipes de l'USGS ont montré l'importance de l'iso-cinétique pour les mesures par prélèvement (Sabol et al., 2010). Sur la base de données recueillies entre 1999 et 2008 sur le Colorado dans le Grand Canyon, Sabol et al. (2010) ont cherché à évaluer les erreurs de concentrations en MES dans le cas de prélèvements non iso-cinétiques. Dans cette étude, une mesure iso-cinétique est définie par le coefficient d'efficacité d'entrée IE (Intake Efficiency) :

$$IE=\frac{V_n(z)}{V(z)} \qquad \textit{Eq. 8}$$

où $V_n(z)$ et $V(z)$ sont la vitesse de prélèvement et la vitesse de l'écoulement à la hauteur z. Il a ainsi été remarqué que si la vitesse de prélèvement $V_n(z)$ est supérieure à celle de l'écoulement $V(z)$, alors la concentration $C_n(z)$ de l'échantillon prélevé risque d'être inférieure à celle du cours d'eau $C(z)$. La Figure 12 illustre ce problème. En effet, si la vitesse de prélèvement est trop faible ($V_n(z)<V(z)$, Figure 12 cas 2) ou trop élevée ($V_n(z)<V(z)$, Figure 12 cas 3), les particules sableuses (particules rouges sur la Figure 12b) peuvent s'écarter des lignes de courant du fait de leur inertie, et vont respectivement impliquer un sur-échantillonnage (plus de particules seront collectées pour un même volume échantillonné) ou un sous-échantillonnage (moins de particules seront

collectées pour un même volume échantillonné). Le nom respect de l'iso-cinétique implique en effet des lignes de courant courbes.

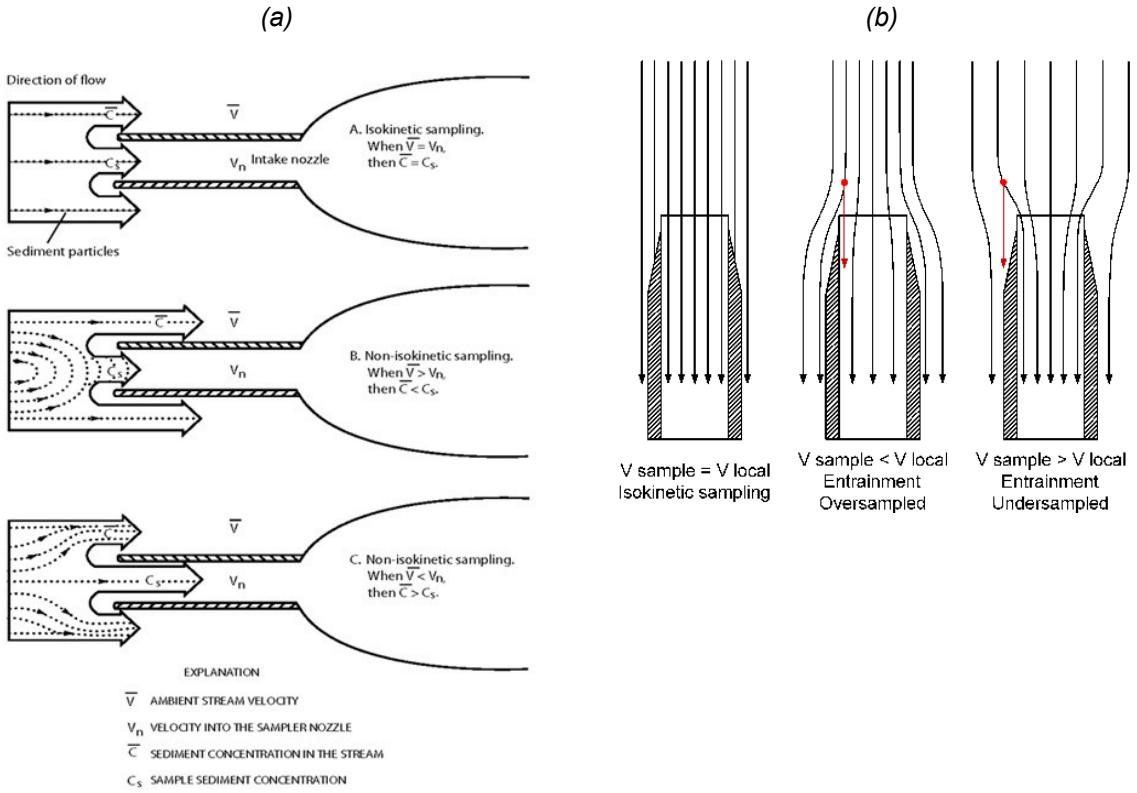


Figure 12 : Influence de la vitesse de prélèvement sur la concentration (a : Gray & Landers, 2014) et en se focalisant tout particulièrement sur les lignes de courant (b).

2.3.2. Inter-comparaison des méthodes

Lors des manipes sur Fréterive, plusieurs tests sur la vitesse de pompage ont été réalisés afin d'identifier l'impact des sur et sous-vitesses sur la concentration prélevée. Les résultats sont présentés Figure 13. Quatre campagnes ont été réalisées sur deux journées distinctes avec une hydrologie différente, i.e. avec un débit sensiblement plus élevé le 12 juin par rapport au 4 juin (vitesse de l'écoulement à 20 cm au dessus du fond d'environ 40 cm/s le 4 juin et de 70 cm/s le 12 juin). Sur chacune de ces journées, deux tests ont été faits en matinée puis dans l'après-midi en jouant sur la vitesse de pompage. Le 4 juin, nous avons seulement testé les sur-vitesses en jouant approximativement avec un facteur 2. Le 12 juin ont été testé des sous-vitesses d'un facteur 2 et des sur-vitesses d'un facteur 1,5. Globalement, les résultats ne sont pas très concluants. En effet, pour certains tests, nous avons obtenus des concentrations plus faibles pour un échantillonnage en sur-vitesse et des concentrations plus élevées pour un échantillonnage en sous-vitesse comme indiqué par la théorie ; pour d'autres tests, nous avons observé l'inverse. Même si les incertitudes de mesure sont élevées, elles ne permettent pas d'expliquer ces différences. On peut toutefois remarquer que pour les sables, le gradient de concentration sur la verticale est généralement marqué alors que pour les fines, les concentrations sont globalement constantes sur la verticale.

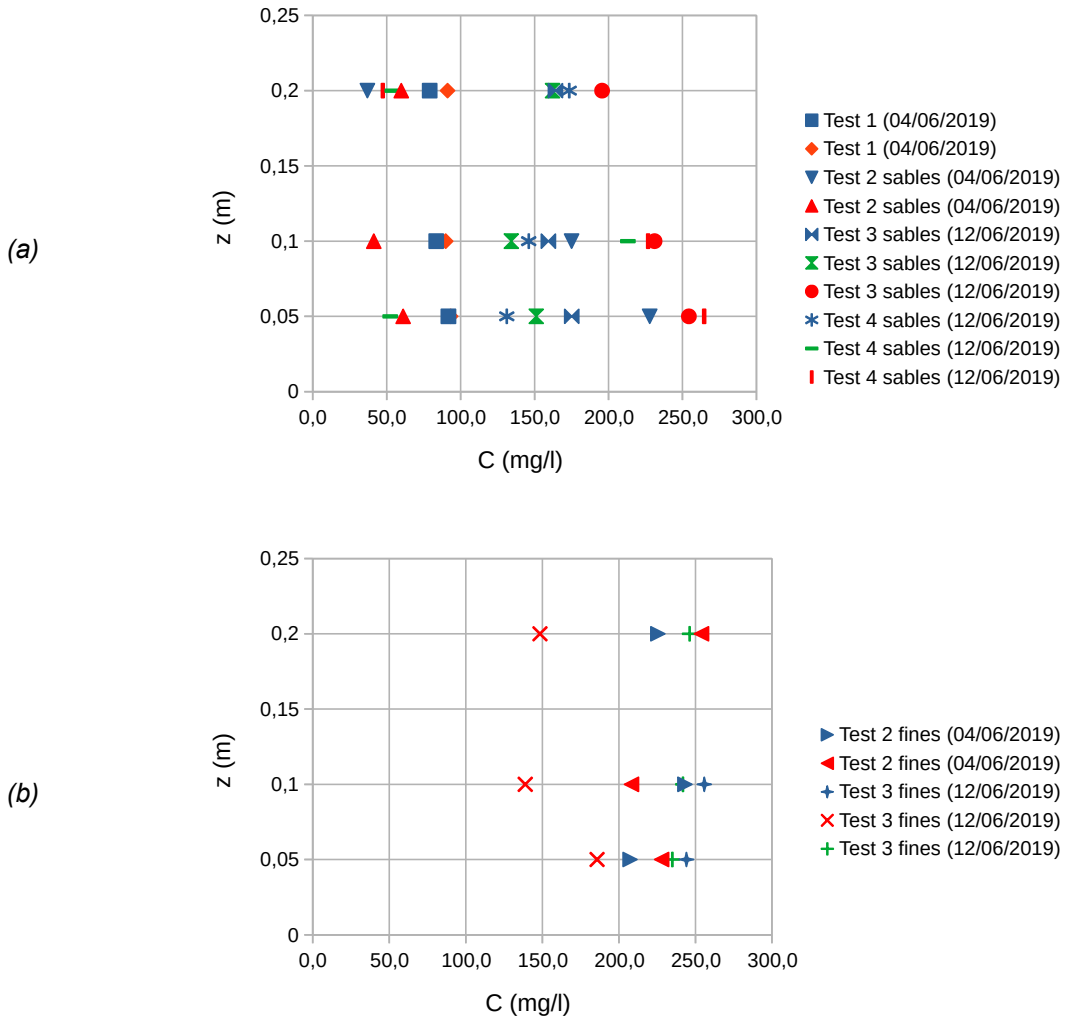


Figure 13 : Profils de concentration mesurés à Fréterive en fonction de la vitesse de pompage (bleu : iso-cinétique ; rouge : sur-vitesse, vert : sous-vitesse) pour les sables (a) et pour les fines (b).

A l'occasion de la chasse de l'Arc, des mesures de concentrations en sable ont été réalisées le 17 (veille de la chasse) et le 18 juin 2019 (cf. section 5) en utilisant conjointement la bouteille de Delft et le système de pompage. Pour cela, le tuyau de la pompe ALP17 a été directement fixé sur la bouteille de Delft à peu près à la même hauteur que l'embout (cf. Figure 8). Durant ces deux journées, des mesures de vitesses de surface à l'aide d'un radar et des mesures de flux à différentes profondeurs ont eu lieu. Sur la base d'un profil vertical théorique des vitesses (loi logarithmique), nous avons ainsi pu transformer les mesures de concentration (avec la pompe) en mesures de flux afin de les comparer. Du fait des conditions hydrauliques et sédimentaires (vitesses élevées et transport solide important), il n'a pas été possible de faire des mesures proches du fond. Les prélèvements ont été faits à vitesse maximale de la pompe, soit une vitesse d'aspiration de 0,8 m/s tandis que les vitesses d'écoulement étaient de l'ordre de 3 m/s. Contrairement à ce que nous souhaitons, les mesures n'ont

donc pas pu être iso-cinétiques. En effet, l'importante hauteur d'aspiration (6 m) ainsi que la longueur totale des tuyaux (12 m) ne permettaient pas d'avoir une vitesse de prélèvement élevée.
Les résultats obtenus sont présenté Figure 14. Du fait des sous-vitesses de pompage, on aurait imaginé, encore une fois en suivant la théorie, que les concentrations et flux estimées à partir du système de pompage seraient très sur-estimés. Comme l'indique la Figure 14, c'est loin d'être aussi net que pour les mesures réalisées en 2018 avec un ISCO et une bouteille de Delft sur le Pont-de-Grésy (Camenen et al., 2018). Même la méthode utilisée pour mesurer la granulométrie des échantillons était différente entre les deux systèmes (section 5.3), la granulométrie des échantillons était clairement plus grossière pour la bouteille de Delft indiquant une différence non-négligeable entre les deux systèmes.

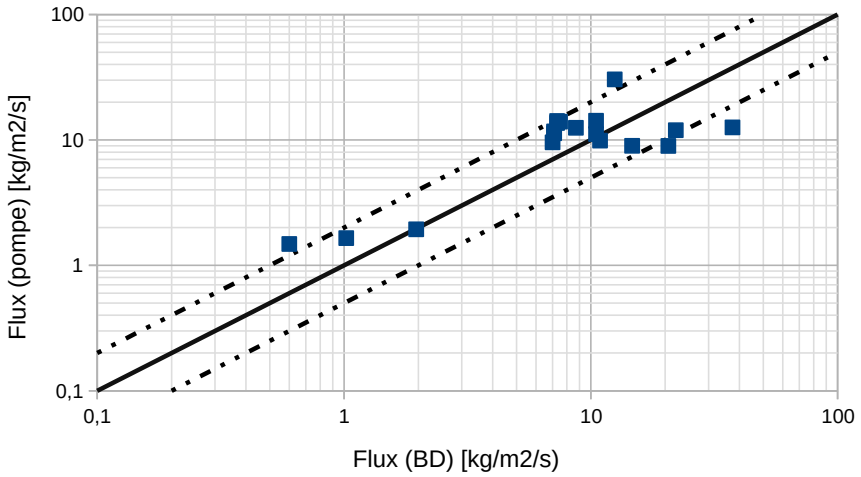


Figure 14 : Comparaison entre les flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft ou avec notre système de pompage lors de la chasse de l'Arc-en-Maurienne le 18 juin 2019.

2.3.3. Perspectives de mesures

Il semble donc nécessaire de faire de nouvelles mesures pour tester l'impact de la vitesse de prélèvement par pompage sur l'échantillon par rapport à une mesure iso-cinétique. Pour cela, il sera nécessaire d'être plus rigoureux sur les mesures de vitesse d'écoulement. De la même manière, les résultats actuels, même s'ils sont très encourageants en comparatif avec la bouteille de Delft, ne permettent pas encore de valider la mesure et surtout de proposer des coefficients de correction selon la granulométrie ou les différences de vitesse (entre la vitesse de pompage et la vitesse d'écoulement). Idéalement, ceci devrait se faire en conditions contrôlées, le banc d'essais de la CNR (mesure en conduite) étant sans doute la meilleure solution actuelle disponible en ce sens (De Angelis, 2019).

3. Flux de Matière en Suspension dans l'Isère au pont de Grésy et sur le banc de Fréterive

3.1. Flux de Matière en Suspension (MES) dans l'Isère au pont de Grésy

3.1.1. Débits

Une mesure de niveau d'eau existe à la station de grésy (données EDF) mais il n'y a pas de courbe de tarage. Le débit à Pont-de-Grésy peut cependant être évalué à partir des mesures de débits (stations gérées par la DREAL Rhône-Alpes) à Albertville (Isère) et Venthon (Arly). En prenant un décalage temporel d'environ une heure entre Albertville et Pont-de-Grésy, une courbe de tarage pour la station de Pont-de-Grésy a été proposée par Camenen et al., 2018 (Figure 15) :

$$Q=a\left(H-H_0\right)^b \qquad \textit{Eq. 9}$$

avec Q le débit (en m³/s), H la hauteur d'eau échelle, $a=110$, $b=1.85$ et $H_0=0.15$. En prenant les mêmes termes de calibration, on peut s'apercevoir que les résultats restent corrects (Figure 15). On note cependant que cette courbe de tarage très simplifiée induit des incertitudes assez élevées par rapport aux débits estimés $Q_{Arly}+Q_{Isère,Conflans}$, de l'ordre de 30 % pour les débits moyens observés. Les débits les plus faibles ($Q<100\ \mathrm{m^3/s}$) qui étaient très sous-estimés (jusqu'à 50%) en 2018 sont mieux estimés pour les données de 2019.

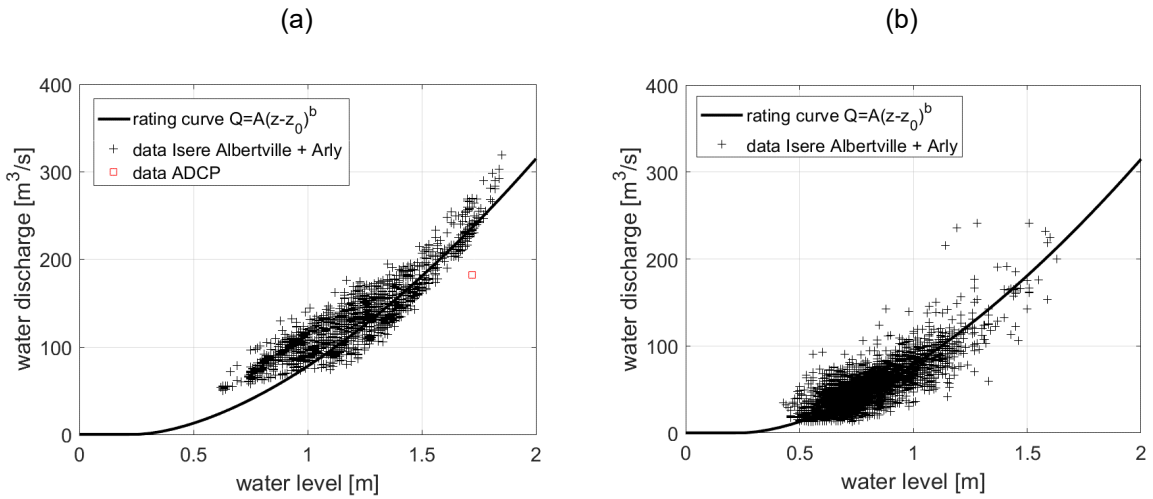


Figure 15 : Courbe de tarage de la station de Pont-de-Grésy avec les données de calage ($Q_{Arly}+Q_{Isère,Conflans}$) de 2018 (a) et 2019 (b).

La Figure 16 présente la chronique des débits estimés à Pont-de-Grésy à partir des mesures à Albertville (Isère) et Venthon (Arly) mais aussi à partir de la courbe de tarage (Eq. 9). On peut s'apercevoir que les résultats restent très proches selon les méthodes ; ce qui valide la courbe de tarage proposée si l'on admet des incertitudes de l'ordre de 25 %. On peut s'apercevoir de plus que

l'hydrologie au cours du premier semestre 2019 a été assez faible avec un unique pic au-delà de 200 m³/s (10 au 12 juin). Il est à noter qu'au printemps 2018, les 200 m³/s avaient été largement dépassés (pic à 320 m³/s) sur près de quatre jours lors de la chasse d'Aigueblanche. La période de fonte en mai-juin avait été aussi beaucoup plus active avec des débits supérieurs à 150 m³/s pendant une quinzaine de jours alors qu'en 2019, cette valeur n'a été dépassée que sur un événement de crue d'une dizaine d'heures.

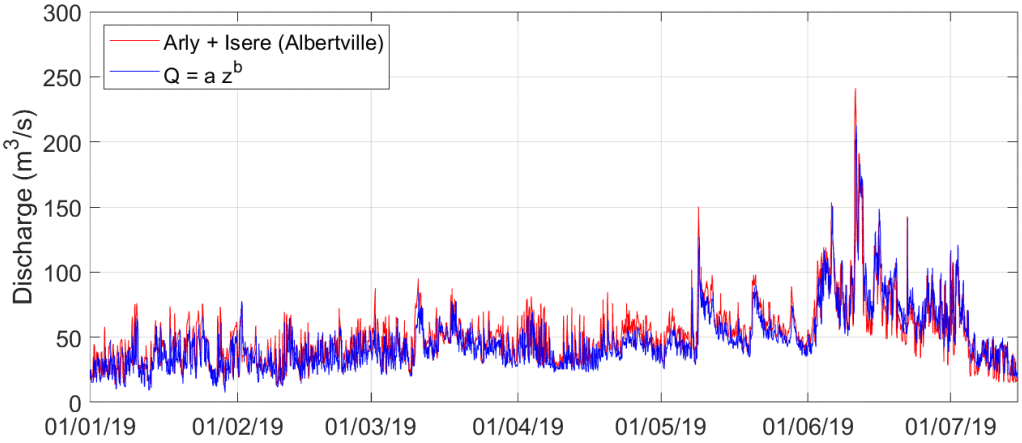


Figure 16 : C*hronique de débit à Pont-de-Grésy sur le premier semestre 2019.*

3.1.2. Concentrations

Les concentrations sont mesurées en continu à la station de Pont-de-Grésy avec un turbidimètre calé avec des mesures de concentrations issues d'un préleveur de type ISCO situé en berge. La chronique de concentration peut ainsi être présentée sur la même période que pour les débits (Figure 17). On peut s'apercevoir des relatives faibles concentrations qui n'excèdent que rarement le g/L.

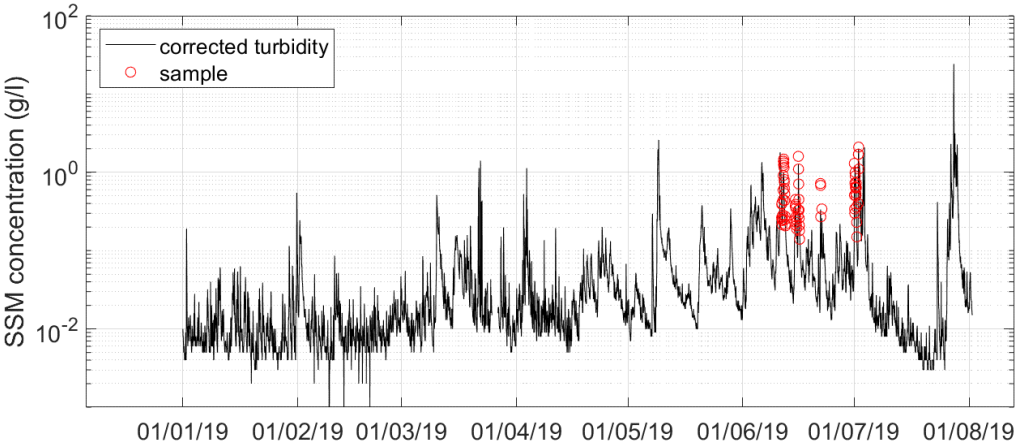


Figure 17 : Chronique de concentration à Pont-de-Grésy sur le premier semestre 2019.

3.1.3. Flux

A partir des mesures de débits et concentrations, il est aisé d'estimer les flux instantanés au niveau de Pont-de-Grésy (Figure 18). Les flux sont globalement faibles avec seulement quelques pics à plus de 100 kg/s. Pour rappel, lors de la chasse d'Aigueblanche de 2018, les flux de MES ont dépassé les 100 kg/s pendant près de 3 jours (Camenen et al., 2018). En intégrant sur l'ensemble de la période de mesure (6,5 mois), on trouve un flux total de $8{,}10\times10^{7}$ kg, soit $8{,}10\times10^{4}$ t. Cette valeur est bien inférieure à 2018 où le flux a été estimé à $3{,}4\times10^{5}$ t à la station de Pont-de-Gresy simplement lors de la chasse d'Aigueblanche. Le flux sur le premier semestre 2019 est de l'ordre de grandeur du flux lors de chasse de l'Arc (2 à 5 fois plus) mais sur une période 400 fois plus longue (Antoine et al., 2013).

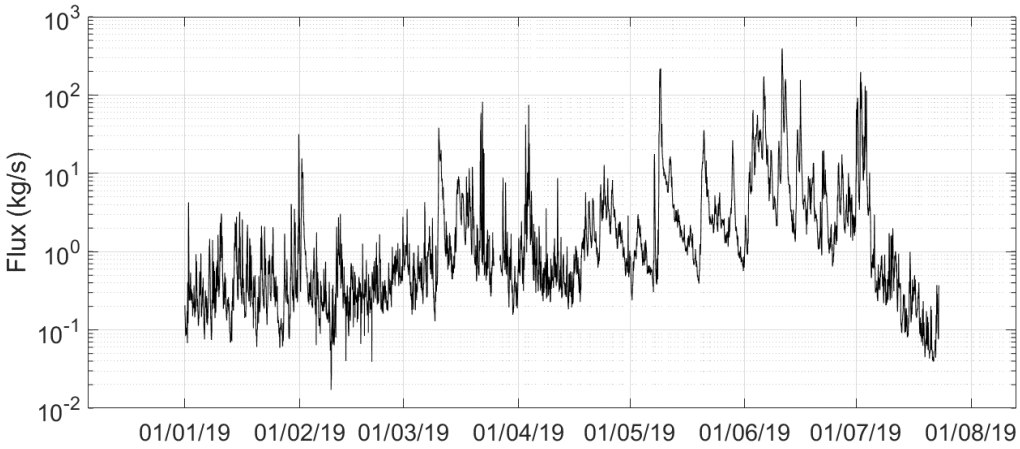


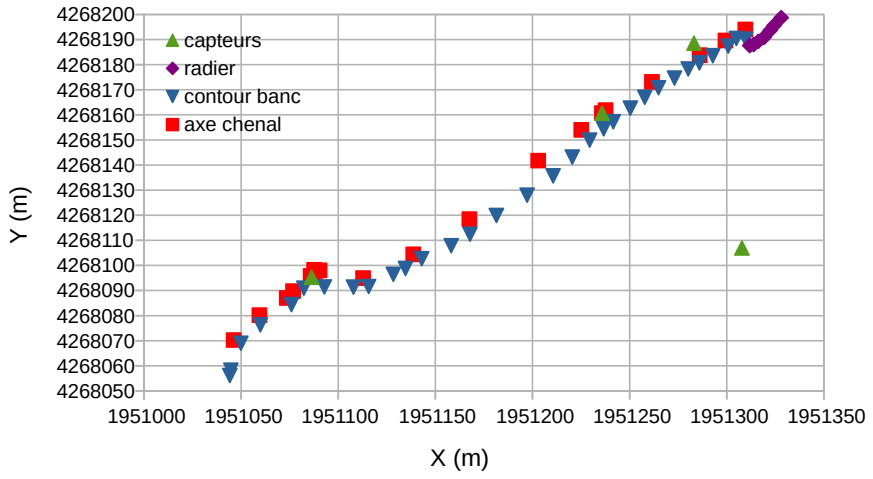
Figure 18 : Chronique de flux à Pont-de-Grésy sur le premier semestre 2019.

3.2. Hydrodynamique du chenal secondaire

3.2.1. Évolution du niveau d'eau et de la pente de la surface libre

Les mesures de niveau d'eau ont été obtenues à partir de trois capteurs de pression positionnés en berge rive droite du chenal secondaire en amont et en aval du site expérimental (cf. Figure 6). Les mesures des capteurs sont corrigées pour compenser les variations de la pression atmosphérique à l'aide d'un quatrième capteur utilisé comme baromètre et positionné dans le coffret du turbidimètre en rive droite. La Figure 19 présente les lignes d'eau mesurées le 20 mars 2019 sur le banc de Fréterive ainsi que la position des principaux instruments. On peut ainsi noter une très faible pente de la ligne d'eau du chenal secondaire sur la partie amont accompagné de profondeurs plus élevées, conséquence d'une contre-pente au niveau du second capteur de pression. On estime la pente sur cette zone d'au mieux $S\approx1‰$ en cette période de faibles débits. Sur la partie plus aval du chenal secondaire, la pente s'accroît et atteint approximativement $S\approx4‰$; ce qui correspond plus à la pente du chenal principal.

(a)



(b)

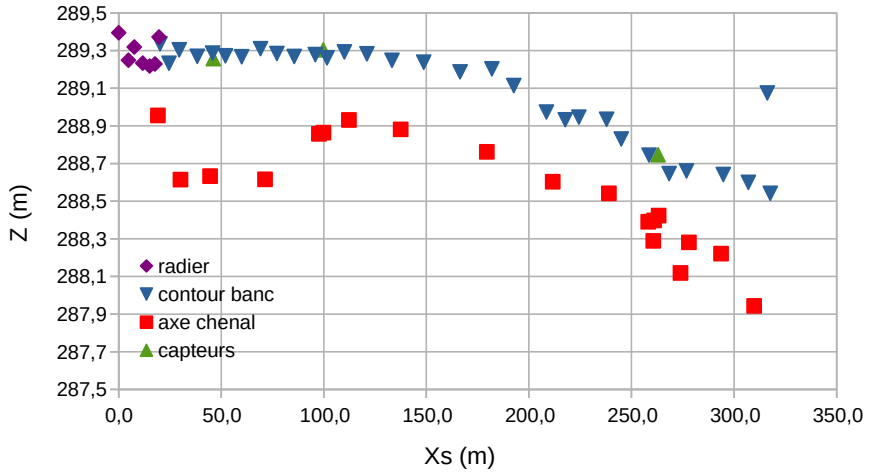
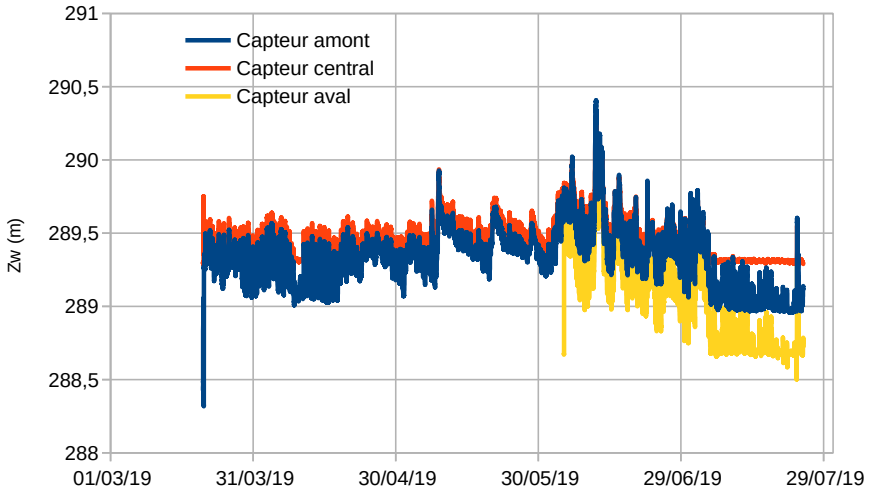


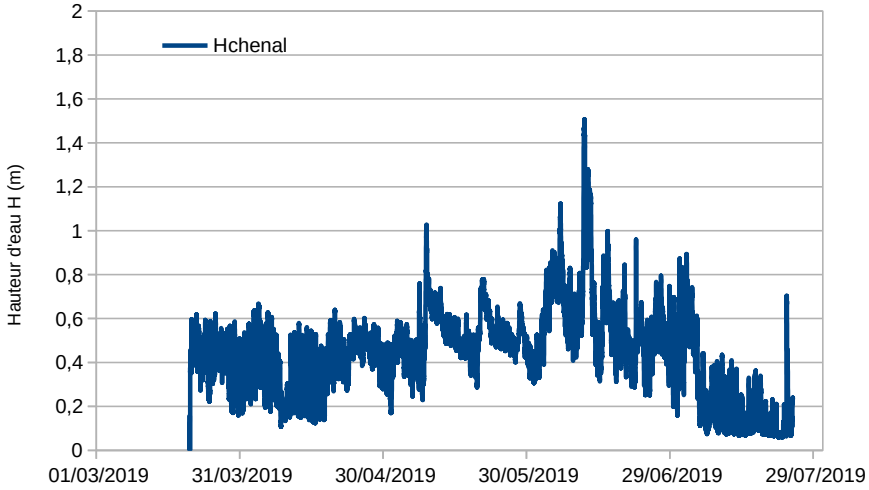
Figure 19 : Mesures de lignes d'eau et position des instruments selon leur position spatiale (a) et selon leur altitude et distance X_s au point le plus haut du radier (b).

La Figure 20a présente les évolutions du niveau d'eau pour chacun des capteurs recalé par rapport à leur niveau de référence z_0 (position exacte du capteur). Le calage du zéro pour chacun des capteurs a été fait à l'aide de mesures de fleur d'eau au niveau des deux capteurs (Figure 19b) avec une incertitude non-négligeable du fait de l'impossibilité de mesurer proche des capteurs (sous la végétation). On observe bien la symétrie des signaux des capteurs amont et central sauf au mois de juillet où le capteur central semble être passé hors eau (signal constant). Pour des raisons techniques, le capteur aval n'a fonctionné qu'à partir du mois du juin. La profondeur d'eau a par conséquent été estimée à partir du capteur amont (Figure 20b) en prenant une cote du fond $z_b = 288{,}9\ \mathrm{m}$.
La profondeur d'eau présentée Figure 20b est une profondeur d'eau moyenne ; la profondeur d'eau proche de la berge est bien plus élevée. Comme indiqué par les mesures de débit à Pont-de-Grésy (Figure 16), un seul événement peut être observé sur cette période soit le 11 juin (et aussi un petit événement le 6 juin).

(a)



(b)



(c)

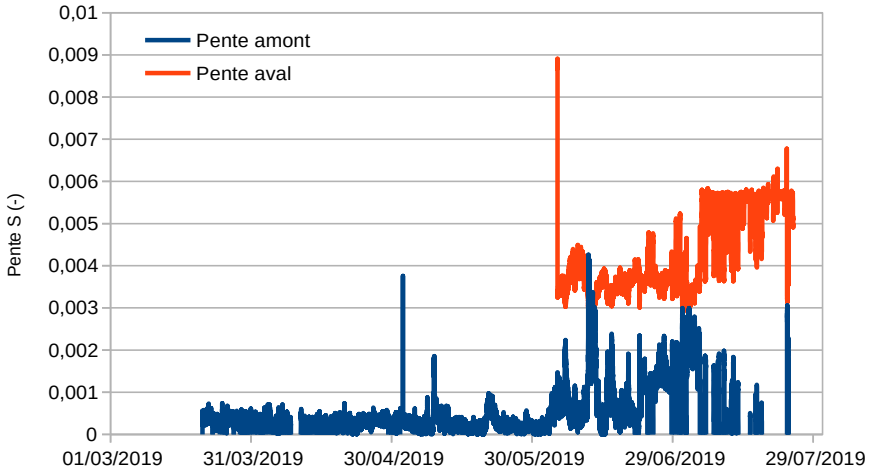


Figure 20 : *Chronique de niveau d'eau mesuré par chacun des capteurs (a) de la hauteur d'eau moyenne sur la partie amont du banc (b) et des pentes amont et aval du chenal secondaire*.

La Figure 20c présente une estimation des pentes en amont (différence entre le capteur amont et le capteur central) et aval (différence entre le capteur central et le capteur aval). Les résultats sont cependant très bruités et sensibles à un recalage de la hauteur des capteurs sur la base des mesures de ligne d'eau réalisées le 20 mars 2019 (Figure 19b). On peut donc s'apercevoir que la pente moyenne du chenal secondaire amont est restée globalement constante sur la période ($S \approx 0{,}3‰$) avec des augmentations sensibles dès que le niveau d'eau $H_m > 0{,}8\ \mathrm{m}$ jusqu'à un maximum $S \approx 4‰$ lors de l'événement du 11 juin. La pente aval varie peu sur la période de mesure (juin, les valeurs du mois de juillet sont faussées du fait du capteur central a priori hors-eau) : $S \approx 4‰$.

3.2.2. Débit dans le chenal secondaire

Il aurait été intéressant d'estimer le débit dans le chenal secondaire en fonction du débit dans l'Isère comme proposé par Camenen et al. (2017), mais nous n'avons malheureusement pas de données pour proposer un modèle fiable. Tout comme en 2018 (Camenen et al., 2018), il est cependant possible d'appliquer la formule de Manning-Strickler avec les mesures de hauteur d'eau et pente mesurées dans le chenal (cf. Figure 20) :

$$Q = K_s A_w R_{hm}^{2/3} S^{1/2} \qquad \textit{Eq. 10}$$

avec $K_s = 30\,\mathrm{m}^{1/3}/s$ le coefficient de Strickler (le choix du Strickler est beaucoup plus faible que celui pris en 2018 - $K_s = 55\,\mathrm{m}^{1/3}/s$ - mais a priori plus cohérent avec la granulométrie du lit, qui est centimétrique) et $R_{hm} = A_w / P_w$ le rayon hydraulique (rapport section mouillée A_w sur périmètre mouillés P_w). Pour le calcul du rayon hydraulique, nous avons fait l'hypothèse d'une section trapézoïdale asymétrique avec une paroi verticale en rive droite (berge), une base de largeur $B_b = 5\ \mathrm{m}$ constante avec de cote de fond moyenne $z_b = 288{,}75\ \mathrm{m}$, et d'une rive gauche (banc) de pente $\tan\alpha = 1/10$:

$$R_{hm} = \frac{A_w}{P_w} = \frac{H_{cm}\left(B_b + H_{cm}/2/\tan\alpha\right)}{B_b + H_{cm}\left(1 + 1/\sin\alpha\right)} \qquad \textit{Eq. 11}$$

où $H_{cm} = z_w - z_b$ est la hauteur d'eau de référence. De manière simplifiée, une courbe de tarage plus empirique peut être utilisée :

$$Q = a\left(H_{cm} - H_0\right)^b \qquad \textit{Eq. 12}$$

avec $a = 25$, $H_0 = 0.4$, et $b = 2.0$.

A partir de l'équation de Manning-Stricker (Eq. 10) et en combinant avec les mesures de débits estimés à Pont-de-Grésy, il est possible d'estimer le débit dans le chenal du banc de Fréterive en fonction du débit de l'Isère avec une corrélation du type :

$$Q_{chenalBF} = a_Q\left(Q_{Isère} - Q_{cr}\right)^{b_Q} \qquad \textit{Eq. 13}$$

où $Q_{cr} = 20\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ est le débit de mise en eau du chenal secondaire et $a_Q = 1.1 \times 10^{-2}$ et $b_Q = 1.5$ sont des coefficients. La valeur de Q_{cr} a été partiellement validée par la visite du site le 18 juillet où le chenal secondaire était hors-eau et le débit de l'Isère de 16 m³/s (cf. Figure 30). Du fait de l'absence de jaugeage, les Eqs. 10, 12 et 13 ont été comparées et adaptées pour obtenir des résultats à peu près cohérents. Cependant, la forte incertitude sur l'estimation de la pente et le fait que le coefficient

a_Q obtenu soit 4 fois supérieur à celui trouvé en 2018 (Camenen et al., 2018) ne nous permet pas de valider ces résultats.

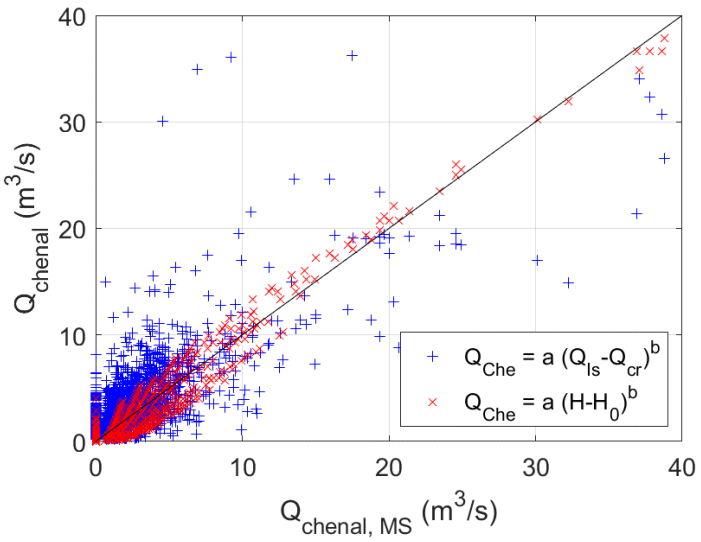


Figure 21 : Comparaison entre les débits estimés dans le chenal secondaire de Fréterive selon les Eqs. 10, 12 et 13.

La Figure 22 présente les chroniques de débit dans le chenal secondaire sur la période de mesure. Ces estimations indiquent que le débit dans le chenal est le plus souvent inférieur à 10 m³/s avec quelques pointes au dessus de 20 m³/s pour les coups d'eau. De tels résultats méritent cependant d'être vérifié ne serait-ce par exemple avec le modèle 2D construit par EDF-LNHE.

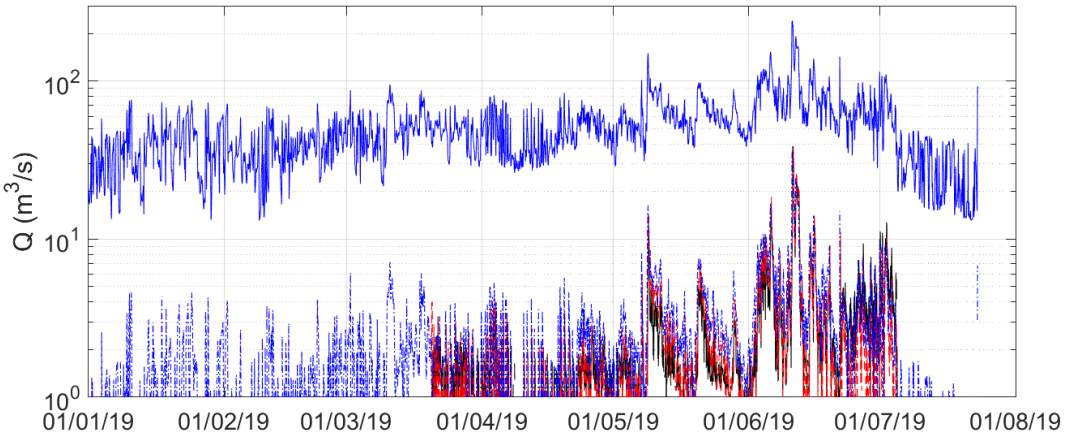


Figure 22 : Débits estimés dans le chenal secondaire de Fréterive selon les Eqs. 10, 12 et 13 en comparaison avec le débit estimé dans l'Isère sur le premier semestre 2019.

3.2.3. Contraintes moyennes sur la section

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la contrainte au fond moyennée sur une section τ_m. N'ayant pas de mesures de vitesse de surface cette année, nous nous limiterons à la plus commune et la plus simple dans notre cas, soit d'utiliser la pente d'énergie :

$$\tau_{m,S} = \rho g R_{hm} S \qquad \textit{Eq. 14}$$

où $\rho = 1000\ \mathrm{kg/m^3}$ est la masse volumique de l'eau, $g = 9{,}81\ \mathrm{m^2/s}$ est l'accélération de la gravité. On peut ainsi observer Figure 23 que les contraintes dans le chenal secondaire du banc de Fréterive étaient généralement faibles ($\tau_{m,S} < 5\ \mathrm{Pa}$) mais permettaient de transporter des matériaux sableux ($\tau_{cr,sable} \approx 0{,}2\ \mathrm{Pa}$). Ces résultats restent cependant bruités et fortement incertains.

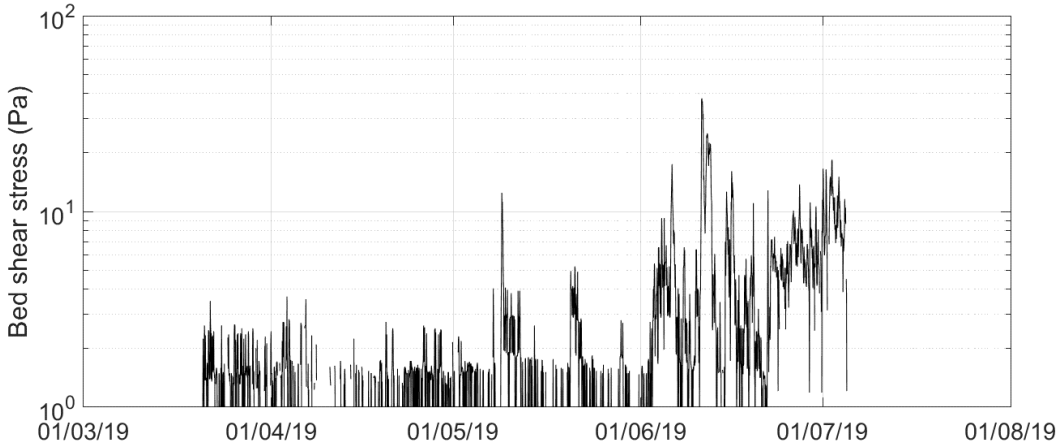


Figure 23 : Contrainte moyenne estimée dans le chenal secondaire de Fréterive sur le premier semestre 2019.

3.3. Matière en Suspension (MES) dans l'Isère au niveau du banc de Fréterive

Il a été possible d'estimer la concentration au niveau du chenal principal (rive gauche) et en aval du chenal secondaire (RD) grâce à la pose des deux turbidimètres. Cependant, le calage de ces turbidimètres est peu satisfaisant (peu de points, fortes dispersion). Un calage global avec les données de Pont-de-Grésy a été réalisé en faisant l'hypothèse que les concentrations sont similaires entre les deux sites (Figure 24). Même si la dispersion est assez grande, il est possible de valider la calibration des turbidimètres. On peut toutefois noter une sous-estimation des concentrations par la sonde autonome Campbell OBS05+ pour des concentrations supérieures à 500 mg/L.

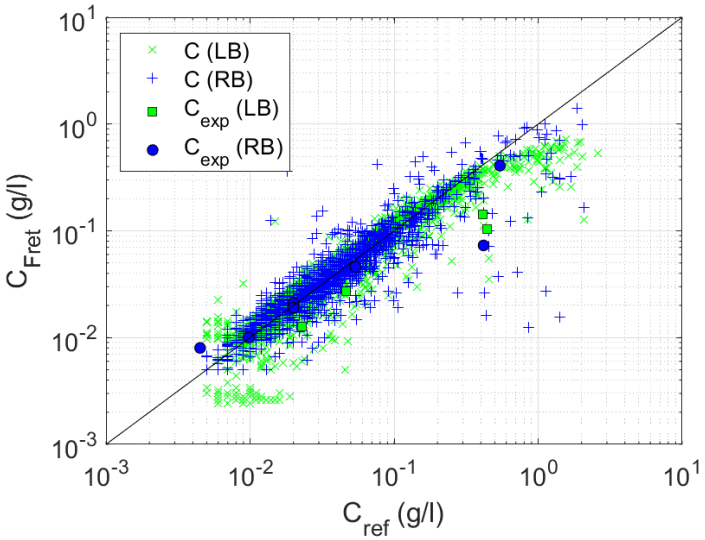


Figure 24 : Comparaison entre les concentrations mesurées à Pont de Grésy et celles mesurées à Fréterive (Pont-de-Grésy est pris comme référence ; sont rajoutés aussi les points de calibration pour les turbidimètres de Fréterive, LB : rive gauche -left bank- ; RB : rive droite -right bank-).

En Figure 25a, nous présentons les chroniques de concentrations pour les différentes stations sur l'ensemble de la période de mesure. On peut voir que globalement, les signaux sont très similaires. Il est à noter aussi les difficultés expérimentales pour les mesures sur Fréterive. De nombreuses périodes sans mesure apparaissent du fait de problèmes de capteur ou du capteur hors-d'eau. Afin de visualiser une potentielle variation de flux dans le système en faisant l'hypothèse que le débit ne varie pas entre Pont-de-Grésy et Fréterive, le différentiel des concentrations ($\Delta_C = (C_{PG} - C_{Fret})/C_{PG}$) est présenté Figure 25b. Même si le bruit est élevé, nous pouvons remarquer que les concentrations à Fréterive sont légèrement plus élevées que celles de Pont-de-Grésy sur la période mi-avril à mai ($\Delta_C \approx -0{,}2$). Sur cette période où les débits (cf. Figure 16) ainsi que les concentrations (Figure 25a) commencent à monter par rapport à l'hiver, il y aurait donc potentiellement une reprise de sédiments le long du tronçon Pont-de-Grésy à Freterive. Inversement, les concentrations à Fréterive deviennent plus faibles que celles de Pont-de-Grésy au mois de juillet ($\Delta_C \approx +0{,}25$). Un dépôt non négligeable aurait eu lieu sur cette période. Ceci reste cependant difficile à interpréter car cette période est caractérisée par une petite crue ($Q_{max} \approx 120\ \mathrm{m^3/s}$ et $C_{max} \approx 2\ \mathrm{g/l}$) suivie d'une période de fort étiage (faibles débits et concentrations).

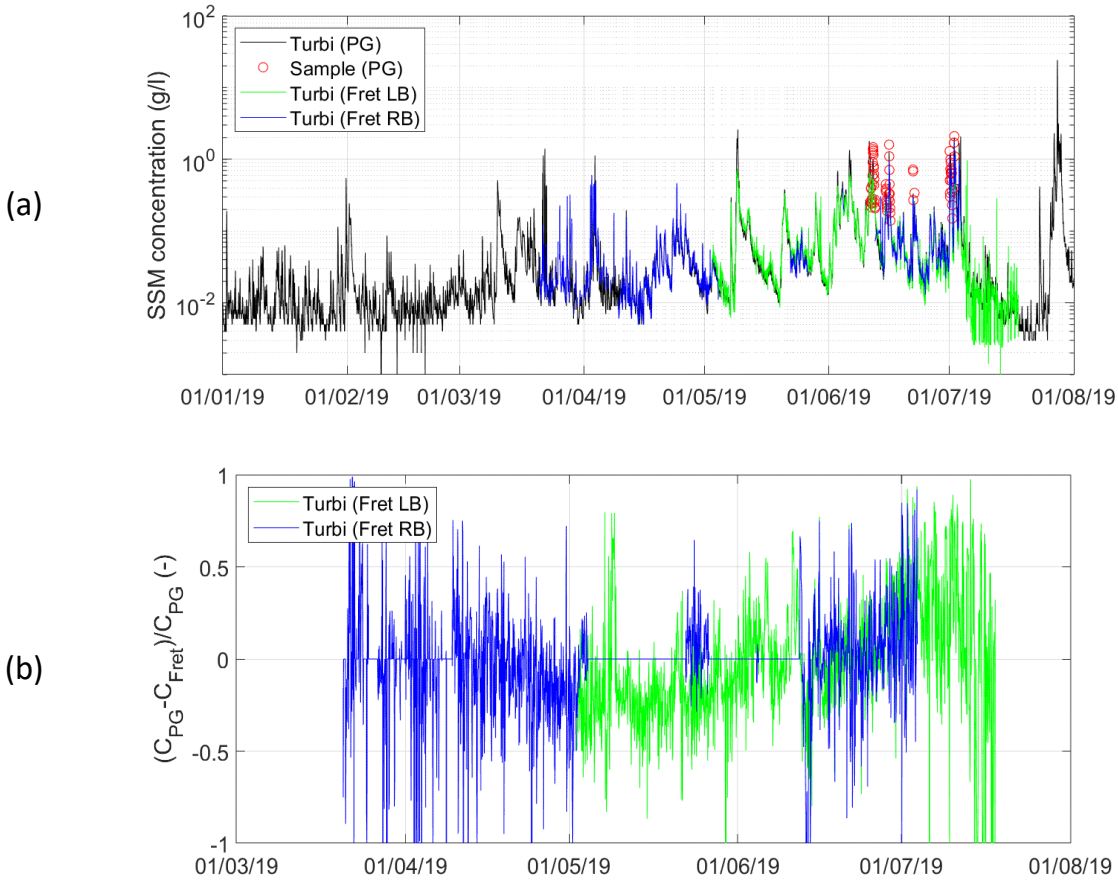


Figure 25 : Concentrations estimées à Pont-de-Grésy et Fréterive (a) et différentiel entre les concentrations à Pont-de-Grésy et à Fréterive (b).

3.4. Suspension graduée dans le chenal secondaire

3.4.1. Mesure des concentrations en sable

De manière similaire à l'étude réalisée au cours de la chasse de l'Arc de 2017 (Camenen et al, 2017), et sur le banc de Fréterive en 2018 (Camenen et al., 2018), nous avons réalisé des mesures de concentrations à différentes profondeurs dans le chenal secondaire de Fréterive afin d'appréhender une potentielle variabilité des concentrations en sable. Ce dispositif pour la mesure de la suspension graduée a été mis en place en rive droite du chenal (cf. Figure 8). Ce dernier consiste en des prélèvements simultanés à différentes profondeurs réalisés à l'aide d'une pompe péristaltique dont les tuyaux ont été fixés à des hauteurs précises (respectivement, 5 cm, 10 cm et 20 cm au-dessus du fond) sur une structure métallique similaire à celle utilisée pour la bouteille de Delft.

Afin de mesurer de manière robuste les concentrations en sables, la méthode américaine ASTM D3977 a été adoptée. Cette dernière, rappelons-le, consiste principalement en un tamisage de l'échantillon à 63 µm afin de récupérer l'ensemble des sables et éviter un biais lors du sous-échantillonnage réalisé pour la mesure de concentration par filtration. (Dramais et al., 2018).

De premiers résultats sur les tests de la pompe péristaltique Albin Pump ALP17 sont présentés Figure 13. Le Tableau 3 précise les différentes conditions hydrauliques et mesures de concentrations en

sable réalisées dans le chenal secondaire en mai et juin 2019. Il est à noter que nous avons fait le choix ici d'estimer le débit Q_{Che} à partir de l'Eq. 13 et la hauteur d'eau est estimée telle que $H_{Ch}=z_w-z_b$ avec $z_b=288{,}75\ \mathrm{m}$. La vitesse moyenne dans le chenal est ainsi obtenue telle que $V_{Ch}=Q_{Ch}/A_w$ avec A_w calculée sur la base de l'Eq. 11. A part pour l'expérimentation 12/06/2019 à 10:40, où la hauteur semble trop élevée par rapport au débit, les résultats sont assez cohérents. Il n'est pas choquant d'avoir une vitesse moyenne sur la hauteur d'eau bien supérieure (2 à 3 fois plus grande) à la vitesse mesurée à + 20 cm (soit relativement proche du fond). L'estimation de la concentration moyenne sur la hauteur d'eau C_{sm} a été faite sur la base d'une décroissance de 25 % sur 20 cm, une première approximation faite à partir des profils mesurés (Figure 12). Nous n'avons pu faire que peu d'analyse granulométrique sur ces échantillons ; le mode sableux se situait toutefois à 200 µm (De Angelis, 2019).

Tableau 3: Mesures des concentrations en sable réalisées au niveau du chenal secondaire du banc de Fréterive au printemps 2019 (: calculé)*

Date, heure (TU+1)	Q_{PG} (m³/s)	z_{Che} (m)	Q_{Che}* (m³/s)	H_{Ch}* (m)	V_{Ch}* (m/s)	V_{+20cm} (m/s)	C_{sm} (mg/l)
02/05/2019 09:45	58	289,40	2.6	0.65	0,48	0,15	7
22/05/2019 08:50	68	289,53	3.7	0.78	0,53	0,20	12
04/06/2019 09:20	115	289,75	10.2	1.00	1.02	0,40	63
04/06/2019 12:40	106	289,72	8.8	0.97	0.92	0,40	106
12/06/2019 09:00	164	290,06	19.0	1.31	1.26	0,70	100
12/06/2019 10:40	135	290,50	13.6	1.75	0,56	0,70	79

La Figure 26 présente ainsi la vitesse d'écoulement moyenne dans le chenal de Fréterive en fonction du débit dans ce même chenal (estimé directement en fonction du débit dans l'Isère, cf. Eq. 13). Il est à noter que la vitesse estimé pour le modèle se base sur un calcul de la hauteur d'eau via Eq. 12 (inversée) et la section mouillée avec A_w calculée sur la base de l'Eq. 11. De fait du bon accord entre les équations 10 et 12 (cf. Figure 21), il est assez logique de retrouver un modèle donnant des valeurs proches à la valeur V_{Ch} calculée.

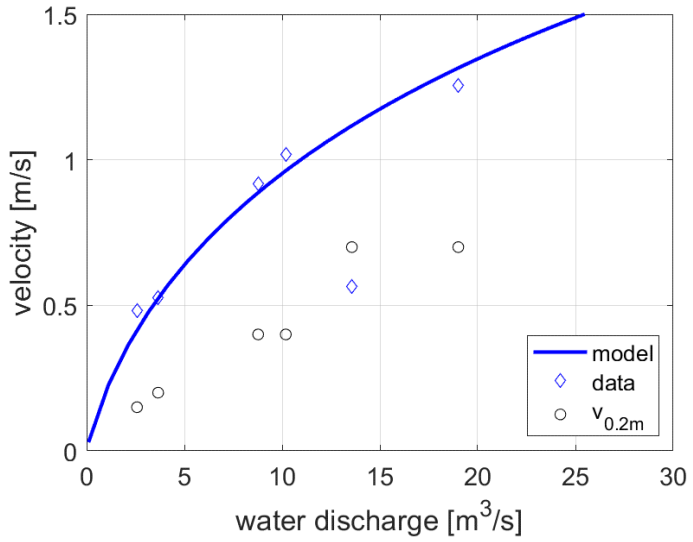


Figure 26 : Vitesses du courant estimées dans le chenal secondaire du banc de Fréterive en fonction du débit estimé dans ce même chenal en fonction du débit de l'Isère (mesuré à Pont-de-Grésy).

3.4.2. Évaluation des flux de sable

De manière similaire à ce qui a été fait en 2018 (Camenen et al., 2018) et décrit aux paragraphes 5.4.1 et 5.5.1, il est possible d'estimer une courbe de tarage sédimentaire pour le flux de sable dans le chenal secondaire du banc de Fréterive. Si la largeur de chenal peut être estimée à environ 10 m (variable selon la hauteur d'eau), nous avons considéré que la largeur active était de 5 m. Le diamètre utilisé pour les simulations est $d_{50}=200\,\mu\mathrm{m}$, en cohérence avec les granulométrie des dépôts observés (paragraphe 4.2.2) et des échantillons en suspension. Enfin, nous avons fait pour première hypothèse que le fond est composé à 20 % de fines. Aussi, la rugosité de peau et de forme a été pris égale à $k_s=k_{st}=0.04\,\mathrm{m}$ (hypothèse de $d_{90}=2\,\mathrm{cm}$). Les résultats données par la courbe de tarage sont dans un bon accord avec les résultats expérimentaux (Figure 27). Ces résultats sont toutefois à prendre avec précautions car il existe de fortes incertitudes et pour le modèle et pour les points expérimentaux. On peut aussi noter que le modèle indique un transport solide par charriage du même ordre de grandeur que la suspension pour les débits a priori observés, soit pour $Q_{Che}<20\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$. Aucune mesure de débit, ni de charriage n'a été réalisée dans le chenal secondaire.

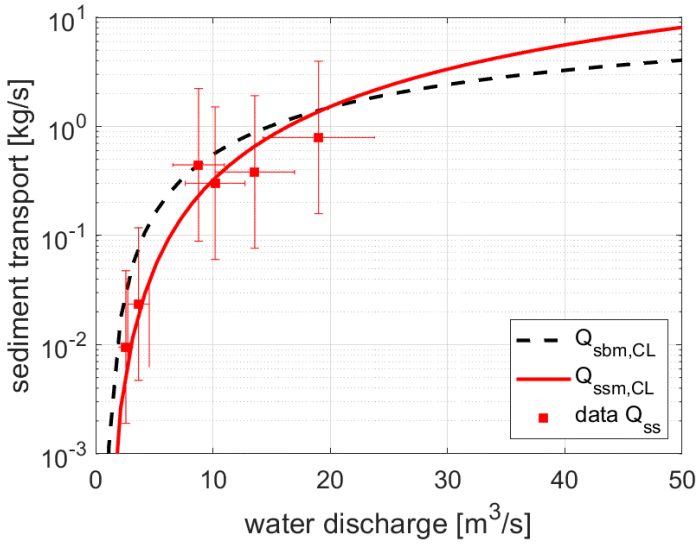


Figure 27 : Courbe de tarage sédimentaire estimée dans le chenal secondaire du banc de Fréterive.

En appliquant ce modèle sur l'ensemble de la chronique de janvier à juillet, il nous a ainsi été possible d'évaluer le transport solide par charriage et suspension dans le chenal secondaire. Nous avons ainsi obtenu $V_{sb}=1000$ t et $V_{ss}=660$ t. Encore une fois, ces valeurs sont à prendre avec beaucoup de précautions, ne serait-ce que par le choix de $\alpha_s=0.2$ et des nombreuses incertitudes dans ces calculs.

4. Morphodynamique du banc de galet

Même si nous n'avons pas directement mesuré les évolutions topographiques et la granulométrie de surface, nos visites régulières du site depuis avril 2018 nous ont permis d'observer une certaine dynamique du banc de Fréterive sur la période printanière en lien avec nos mesures.

4.1. Evolution de la bathymétrie du banc

Le site autour du banc de Fréterive a ainsi évolué de façon très importante avec une avancée globale du banc de 50 à 100 mètres depuis début 2018 avec une forte érosion de la tête du banc (cf. Figure 28 a et b), une érosion prononcée du côté du chenal principal et l'apparition (avancée) d'un banc de galet rive gauche (cf. Figure 28 c, le banc en rive gauche apparaît en haut à gauche de la photo). Le site de mesure qui se situait initialement au 1er tiers du chenal secondaire se trouve aujourd'hui juste en aval du radier amont du banc.

(a)

(b)

(c)

Figure 28 : Evolution du site de mesure sur le banc de Fréterive pour des débits faibles en fonction du temps : 4 avril 2018 (a), 6 août 2018 (b),et 2 mai 2019 (c).

4.2. Evolution de l'état de surface du banc

4.2.1. Observations générales

Les premières visites du site ont indiqué un classique tri granulométrique sur le banc avec un radier grossier sur la partie amont alimentant le chenal secondaire et des dépôts sablo-limoneux sur la queue du banc (cf. Figure 5). La granulométrie du banc reste ensuite assez homogène avec un gradient plus latéral que longitudinal avec des dépôts plus sableux sur le banc et des dépôts plus limoneux au bord du chenal secondaire (Figure 29 a). Après les débits relativement élevés de la période printanière de 2018, de gros dépôts sableux se sont formés sur le banc et ont perduré depuis (Figure 29 b). La végétation, qui s'était fortement développé lors de la période printanière et estivale de 2018, s'est encore étendue aujourd'hui (Figure 29 c et d).

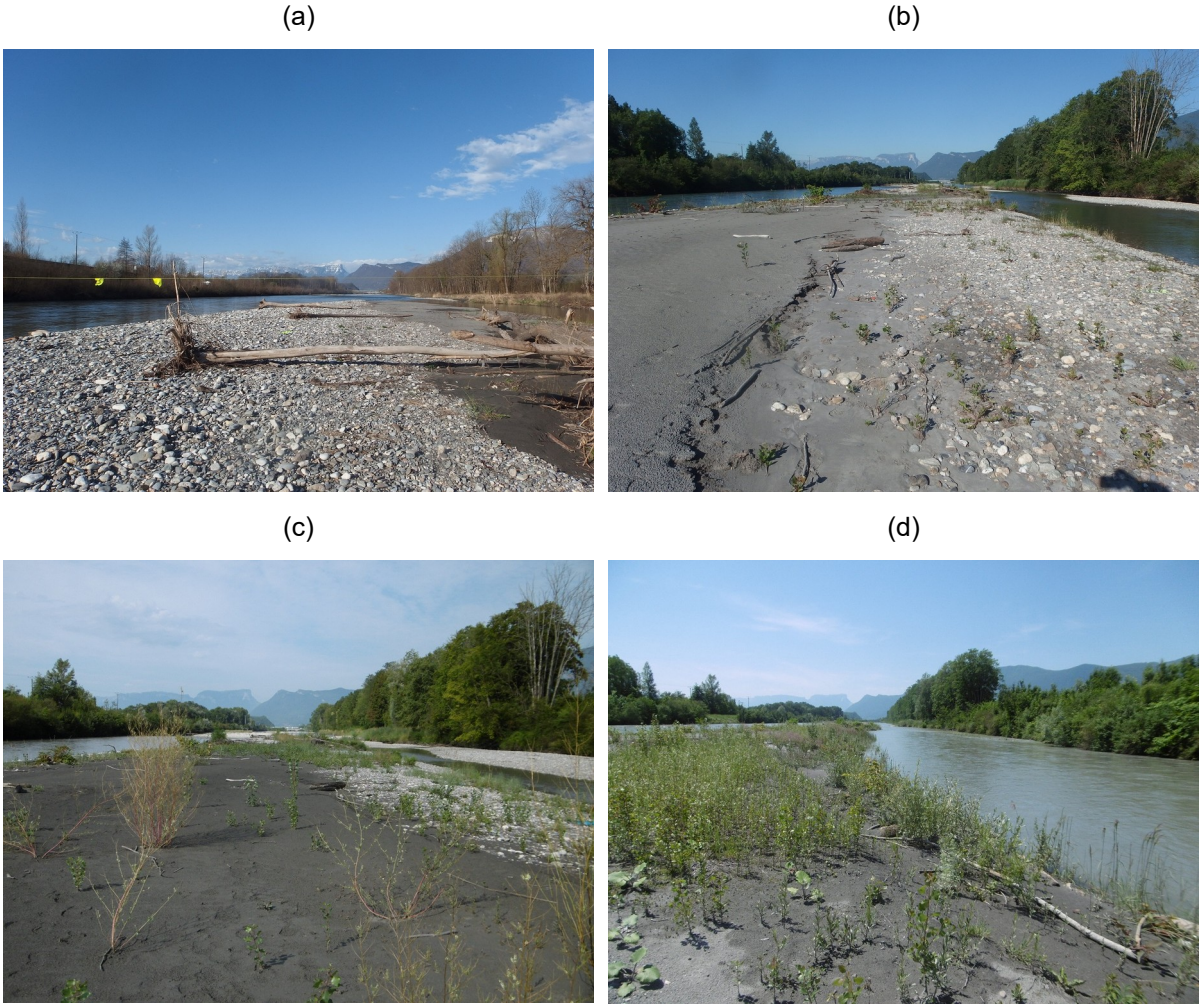


Figure 29 : Photos de la queue du banc de Fréterive en fonction du temps : 4 avril 2018 (a), 27 juin 2018 (b), et 6 août 2018 (c) et 19 juin 2019 (d).(Photos Camenen et Thollet)

On n'observe toujours pas de corrélation entre le couvert de végétation et la quantité de dépôt de fines. Il semble donc que la végétation pionnière a uniquement besoin d'un seuil minimum de fines pour s'étendre et l'accès à l'eau (hauteur par rapport à la nappe) peut aussi jouer quant à la

croissance de la végétation. L'hydrologie de l'année 2019, particulièrement faible, n'a pas permis d'arracher la végétation sur la banc (Jourdain et al., 2017b).

Tout comme en 2018, lors de période de très faible débits (été), nous avons observé dans le chenal secondaire un colmatage important du fait d'une alimentation du chenal secondaire réduite avec des vitesses très faibles. Des dépôts de sable sont observables sur la partie amont du chenal très rapidement suivis par des dépôts limoneux voire argileux.

Une visite au mois de juillet 20190 pour des débits de l'Isère très faibles a montré que le chenal secondaire était hors-eau pour un débit de l'Isère de 16 m³/s (Figure 30). On peut facilement imaginer que ce genre de période peut être très propice à la croissance de la végétation, en particulier sur les zones proches de la nappe (cf. Figure 30 a et d).

(a)

(b)

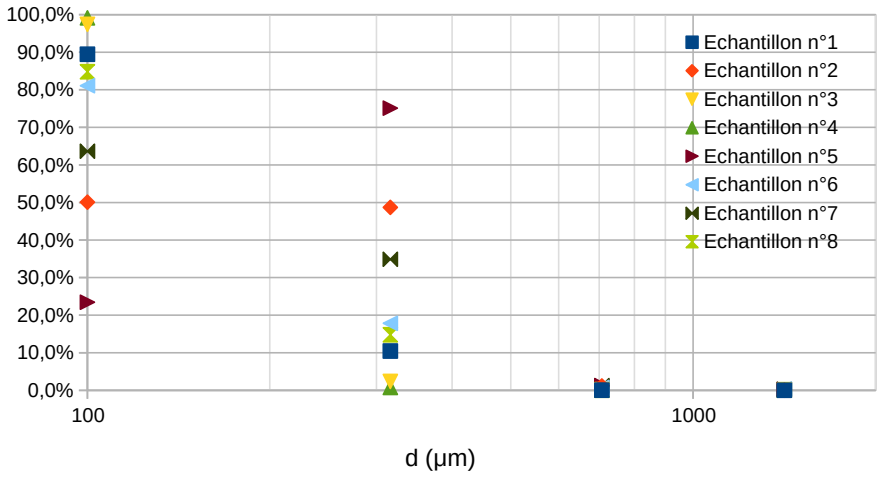
(c)

Figure 30 : Photos du banc de Fréterive en étiage (18 juillet 2019) : (a) tête de banc, (b) queue de banc, (c) centre du banc vue vers l'aval, et (d) centre du banc vue vers l'amont.(Photos Thollet)

4.2.2. Mesures granulométriques

Huit échantillons ont été prélevés dans des dépôts de fines à différentes positions sur le banc de Fréterive lors de la campagnes du 2 mai 2019 (cf. Figure 6). Une granulométrie de ces échantillons a été réalisée tout d'abord avec une colonne de tamis (0.2, 0.5 et 1 mm) puis avec le granulomètre laser pour le refus. Les résultats sont présentés Figure 31. On peut s'apercevoir d'une très forte variabilité du taux de sables ($d > 200\,\mu\mathrm{m}$) allant de près de 0 % (échantillons 3 et 4) à plus de 50 % (échantillons 2 et 5). Les échantillons 1, 4, 6 et 8 se situant dans le chenal secondaire ou juste en berge (cf. Figure 6), il semble assez logique de retrouver des quantité de sables faibles (<20%). De la même manière, les échantillons 2, 5 et 7 se situant sur la partie supérieure du banc, les dépôts correspondent donc à des événements plus importants et donc des taux de sables plus élevés. Par contre, l'échantillon 3, qui se situe aussi sur la partie supérieure du banc ne contient que très peu de sables ; il pourrait donc correspondre à un évènement moyen avec un léger débordement sur le banc. Si l'on regarde la granulométrie des passants à 200 µm, on observe une certaine homogénéité sur l'ensemble des échantillons avec un pic principal à $d \approx 40-50\,\mu\mathrm{m}$ et un pic secondaire à $d \approx 8\,\mu\mathrm{m}$ correspondant (aux proportions près) à ce qu'on observe classiquement pour les MES. Les variabilités de granulométrie observées pour les dépôts sur le banc semblent donc directement liées aux sables en mouvement (charriage / suspension) sur la zone considérée soit aux contraintes hydrodynamiques observées lors de l'événement.

(a)



(b)

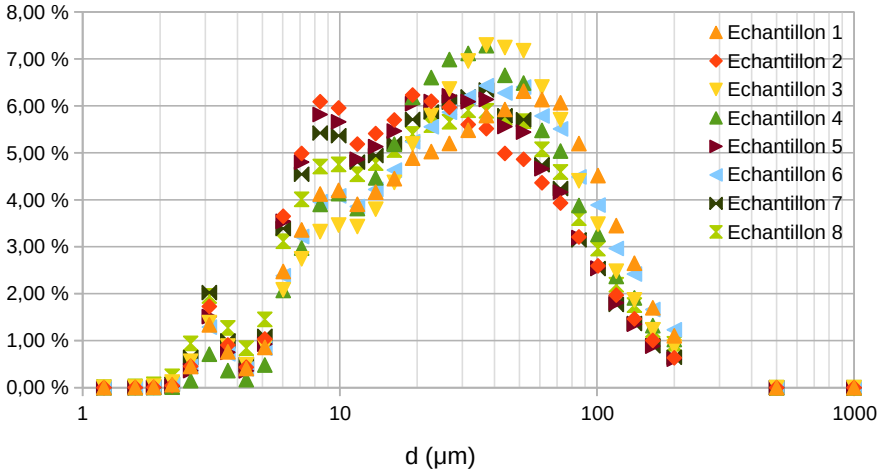
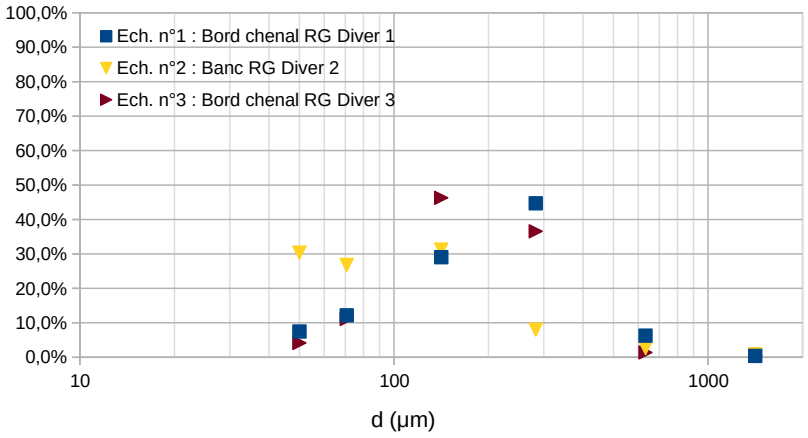


Figure 31 : Granulométrie de dépôts de fines sur le banc de Fréterive (2 mai 2019) : (a):résultats de la colonne à tamis et (b) : résultat du granulomètre laser sur le refus.

Afin d'étudier la possible variabilité de la granulométrie de surface sur le banc, nous avons réitéré ces mesures le 22 mai et le 19 juin 2019. Une granulométrie de ces échantillons a été réalisée uniquement avec la colonne de tamis (0,05, 0,1, 0.2, 0.4 et 1 mm). Sur la Figure 31, nous pouvons voir une certaine stabilité des granulométries aux incertitudes près, soit une majorité de sables entre 0,1 et 0,3 mm. Aussi, pour les échantillons prélevés proche du chenal secondaire (en bas de berge du banc), on retrouve des taux de fines supérieures à 10 % (Ech. 2 pour le 22 mai et Echs. 2 et 3 pour le 19 juin). On note cependant la présence de sables plus grossiers ($d > 1$ mm) sur les échantillons en amont du 19 juin. Ces derniers ont pu être apportés lors de l'événement du 10-12 juin.

(a)



(b)

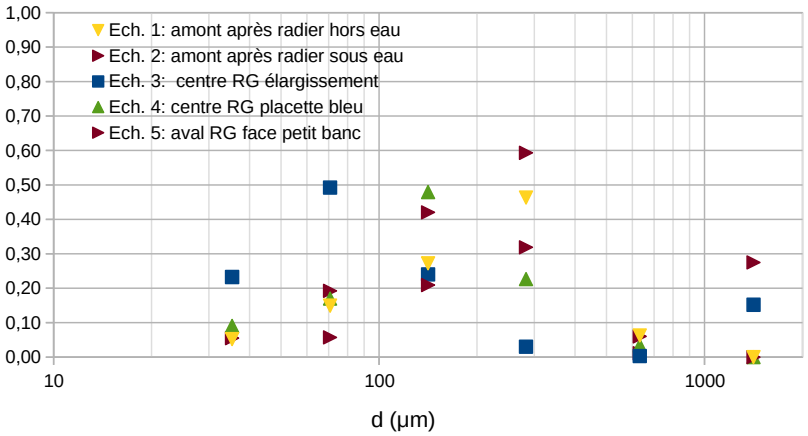


Figure 32 : Granulométrie de dépôts de fines sur le banc de Fréterive : (a) 22 mai 2019, (b) 19 juin 2019.

5. Estimation des flux de sable sur l'Arc lors d'une chasse

5.1. Chasse de l'Arc du 18 juin 2019

La Figure 33 présente la chronique de débit pour la chasse de l'Arc du 18 juin 2019. Les jaugeages radar réalisés lors de la manipe sont très cohérents avec les débits de la station (au décalage temporel près) en utilisant un coefficient de surface de 0.8. Par rapport aux débits classiquement observés lors des chasses de l'Arc, nous nous situons cette année sur une fourchette haute avec un débit max $Q_{max} \approx 160\,\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ (Camenen et al, 2017).

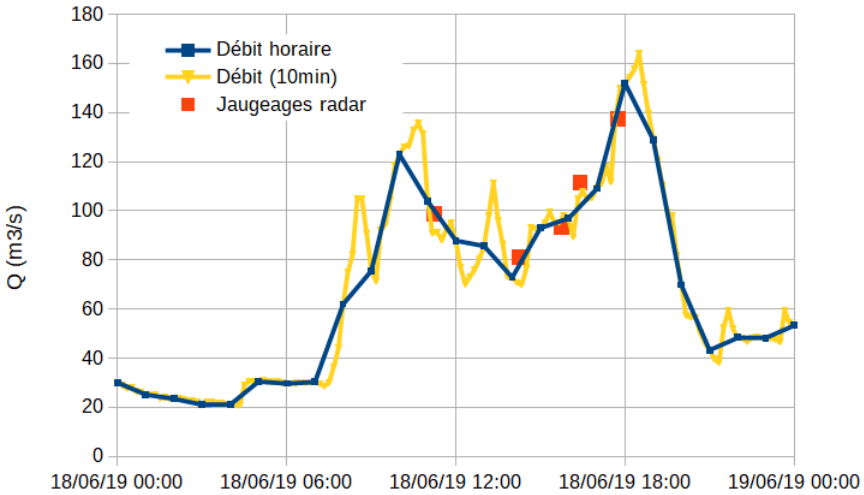


Figure 33 : Débits à St-Etienne-de-Cuines lors de la chasse de l'Arc du 18 juin 2019 (données de la station de Pontamafrey décalées temporellement).

Les jaugeages réalisés permettent d'avoir une idée de la distribution transversale des vitesses sur la section (Figure 34) ; il est à noter que la bathymétrie du fond est reprise d'anciennes bathymétries réalisées lors de campagnes de mesure en 2010-2011 (Camenen et al., 2012) et est donc assez incertaine. Le calage du niveau a été réalisé en se basant sur les mesures locales réalisées à la verticale des prélèvements et validé avec les débits de la station de mesure.

A partir de ces résultats, nous avons pu confirmer les hauteurs au niveau des points de prélèvements qui ont été fait entre les travées 6 et 7 (soit 30 m de la rive gauche, cf. Figure 34) au début, puis, du fait des vitesses trop importantes, entre les travées 5 et 6 (soit 25 m de la rive gauche, cf. Figure 34). Les vitesses de surface ont globalement peu variées au cours de l'événement. Entre les travées 6 et 7, elles ont varié entre 2.7 et 3.2 m/s alors qu'elles ont varié entre 1.7 et 2.3 m/s entre les travées 5 et 6.

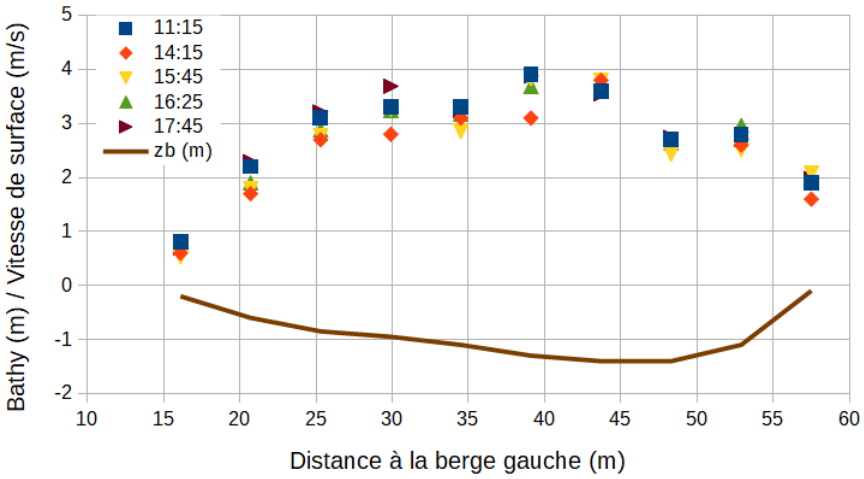


Figure 34 : Vitesses de surface au travers de la section aval de l'Arc au pont de St-Etienne-de-Cuines avec la topographie relative du lit (référence : niveau de la surface de l'eau le 18/06/2019 à 16h).

La Figure 35 présente les résultats de profondeurs d'eau en fonction du temps mesurées en même temps que les prélèvements (un capteur de pression avait été positionné sur la bouteille de Delft). On peut noter que les variations de hauteur suivent les variations des débits mesurés, en cohérence avec ce que l'on pouvait imaginer. Une relation en loi puissance entre le débit et la hauteur d'eau semble donc valable sur ce site (Camenen et al., 2012).

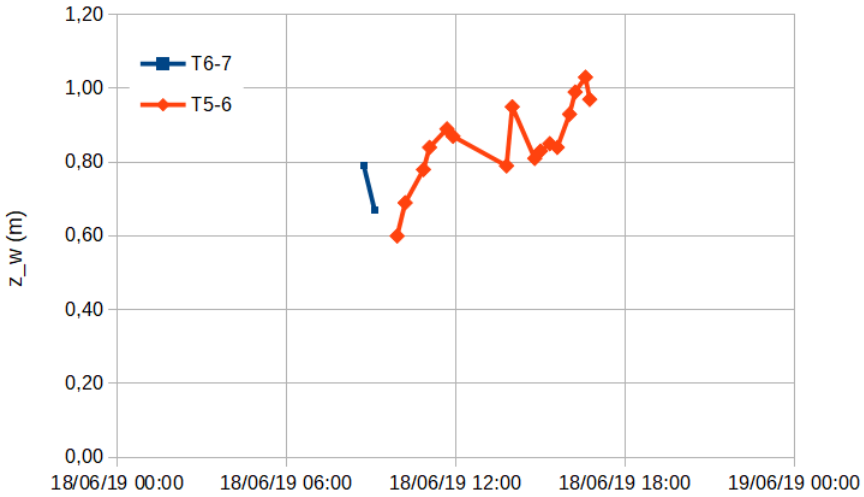


Figure 35 : Variation du niveau d'eau pont de St-Etienne-de-Cuines avec la topographie relative du lit (référence : niveau de la surface de l'eau le 18/06/2019 à 16h).

5.2. Concentrations et flux de MES

Les concentrations en MES (sables exclus) sont mesurées à l'aide d'un turbidimètre à la station de Pontamafrey située une dizaine de kilomètres en amont et recalée à partir de prélèvements réalisés par un préleveur automatique de type ISCO. Les résultats présentés en Figure 36 indiquent des concentrations assez faibles pour une chasse de l'Arc avec un pic de centration à 8 g/l. De façon étonnante, des concentrations plus élevées (>10 g/l) ont été observées la veille et le matin de la chasse. Ces valeurs correspondent a priori à une crue de l'Arvan. Nos stations sur l'Arvan de St-Sorlin-d'Arves et de St-Jean-de-Maurienne ont en effet enregistré des concentrations de plus de 50 g/l sur cette période.

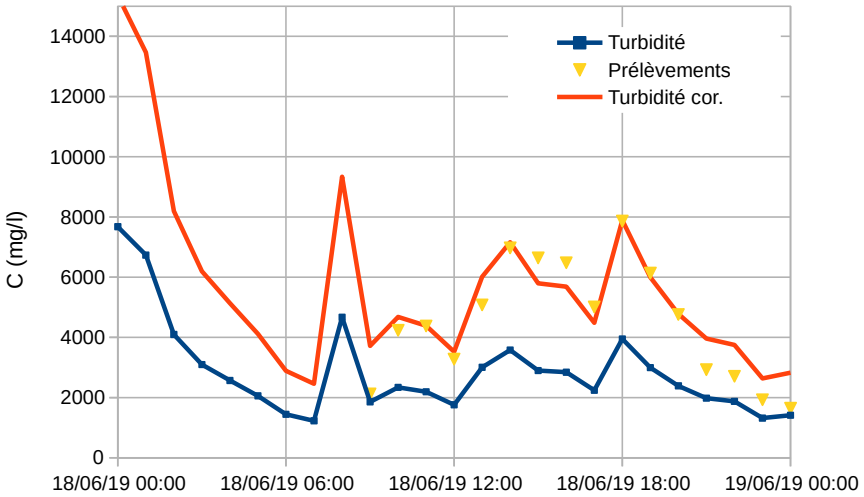


Figure 36 : Concentrations en MES à St-Etienne-de-Cuines lors de la chasse de l'Arc du 18 juin 2019 (données de la station de Pontamafrey décalées temporellement).

Les flux instantanés calculés à la station de Pontamafrey (avec le décalage temporel pour correspondre au site de St-Etienne-de-Cuines) sont présentés Figure 37. Le flux total de MES (suspension de lessivage) peut ainsi être estimé sur l'ensemble de la chasse (située de 7h à 21h) : $V_{chasse}=2,7\times10^4$ tonnes . Cette valeur reste dans les normes de ce qui a été déjà observés ces treize dernières années où, sauf cas exceptionnels, les volume de MES transportés lors d'une chasse varient entre $V_{chasse}=1,6\times10^4$ tonnes (2011) et $V_{chasse}=4,4\times10^4$ tonnes (2006). Seules les chasse de 2012 ($V_{chasse}=4,9\times10^4$ tonnes) et surtout 2016 ($V_{chasse}=6,8\times10^4$ tonnes) ont apporté des masses plus grandes mais l'hydrogramme de chasse avait été différent (avec des débits plus élevés).

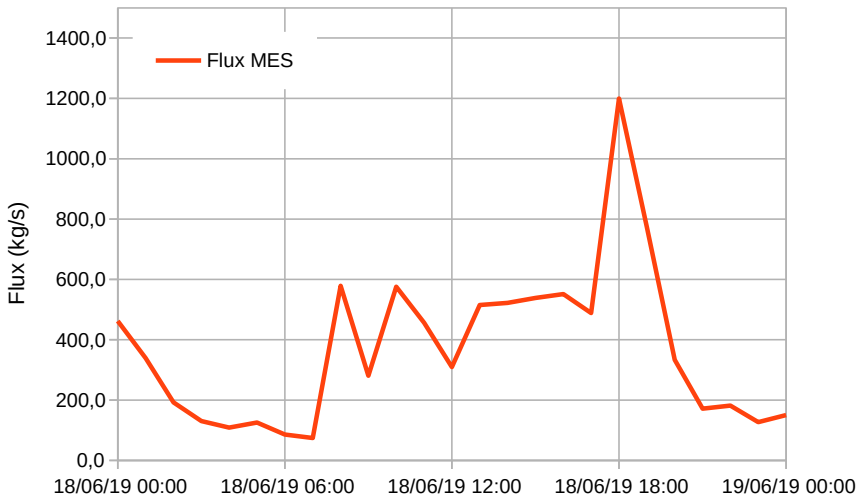


Figure 37 : Flux de MES à St-Etienne-de-Cuines lors de la chasse de l'Arc du 18 juin 2019 (données de la station de Pontamafrey décalées temporellement).

5.3. Prélèvements réalisés

Le Tableau 4 présente l'ensemble des prélèvements réalisés lors de la chasse de l'Arc du 18 juin 2019. un total de 21 prélèvements avec la bouteille de Delft et 18 échantillons issus de pompages réalisés en parallèle avec la pompe péristaltique. Si ces derniers échantillons ont été pour la plupart du temps doublés, dans 3 cas, aucun échantillon n'a pu être prélevé par pompage du fait de difficultés expérimentales. Les profondeurs ont pu être mesurées à l'aide d'un capteur de pression de type DIVER fixé sur la bouteille de Delft. De la même manière que lors des expériences menées sur l'Isère en 2018 (Camenen et al., 2018a), la capacité de la pompe était insuffisante pour mener des mesures iso-cinétiques. Si lors de la campagne sur l'Isère avec un préleveur de type ISCO, la vitesse d'aspiration s'élevait à environ 0.4 m/s pour une vitesse d'écoulement d'environ 2 m/s, lors de cette campagne sur l'Arc, la vitesse d'aspiration s'élevait à 0.8 m/s pour une vitesse d'écoulement variant entre 2 et 3 m/s, soit selon la position du prélèvement des vitesses proche du préleveur variant entre 1.2 m/s (prélèvement à 0.1 m au dessus du fond pour une vitesse moyenne du courant de 2 m/s) à 2.4 m/s (prélèvement à 0.36 m au dessus du fond pour une vitesse moyenne du courant de 3 m/s). Les prélèvements sont donc clairement non iso-cinétiques, et devraient induire une sur-estimation de la concentration comme indiqué par Gray & Landers, M. (2014) et observé lors de la campagne sur l'Isère.

Une granulométrie des sédiments sableux prélevés avec la Bouteille de Delft nous a permis d'avoir les caractéristiques moyennes des sédiments sableux en suspension (Figure 38) :

- $d_{10}=60\,\mu\mathrm{m}$
- $d_{50}=270\,\mu\mathrm{m}$
- $d_{90}=0{,}9\,\mathrm{mm}$

D'une manière similaire, une granulométrie des échantillons issus des prélèvement par pompage nous a permis d'avoir les caractéristiques moyennes des sédiments sableux en suspension (Figure 38) :

- $d_{10}=60\,\mu\mathrm{m}$

- $d_{50} = 100 \mu m$
- $d_{90} = 250 \mu m$

Les différences observées entre les deux types de mesure sont très grandes. Il faut cependant avoir en tête que ce n'est pas le même type d'analyse qui a été réalisé. Les échantillons de la bouteille de Delft ont été analysés avec une colonne à tamis alors que les échantillons issus de la mesure par pompage ont été analyse avec un LISST 200X sans un pré-tamisage comme préconisé par Dramais et al. (2018). S'il est évident que les échantillons de la bouteille de Delft incluaient des classes plus grossières contrairement aux échantillons issus de la pompe (sables grossiers), un effet lié à l'instrumentation semble non-négligeable. Il y a en effet un risque que l'analyse des plus grossiers par le LISST 200X soit biaisé du fait d'un mauvais sous-échantillonnage et potentiellement d'une non-remise en suspension des sédiments les plus grossiers devant le laser.

Il est toutefois intéressant de noter que les deux types de mesure (colonne à tamis pour les échantillons de la bouteille de Delft et LISST6200X pour les échantillons par pompage) indiquent une granulométrie plus grossière proche du fond (échantillonnage à +20cm versus échantillonnage à +30cm, cf. Figure 38).

Tableau 4: Mesures avec la bouteille de Delft (BD) et la pompe péristaltique acquises lors de la chasse du 18 juin 2019 (les croix indiquent une absence de mesure, soit du fait de l'absence de capteur de pression pour les profondeur d'eau, soit de difficultés expérimentales -tuyau pincé, pompe non amorcée- pour les prélèvements par pompage).

Date heure	Position	Position BD	Profondeur eau (m)	Dt (s)	Concentration prélèvement pompage (g/l)	Flux (kg/m²/s)
17/06/19 15:45	Travée 6-7	0,20	x	300	0,60	0,60
17/06/19 16:20	Travée 6-7	0,10	x	360	0,89	1,96
17/06/19 16:40	Travée 6-7	0,36	x	380	0,57	1,02
18/06/19 08:45	Travée 6-7	0,36	0,79	340	8,45	12,54
18/06/19 09:10	Travée 6-7	0,20	0,67	130	x	35,06
18/06/19 09:55	Travée 5-6	0,20	0,60	120	3,10	20,61
18/06/19 10:10	Travée 5-6	0,30	0,69	150	3,90	37,54
18/06/19 10:50	Travée 5-6	0,30	0,78	135	x	18,13
18/06/19 11:05	Travée 5-6	0,20	0,84	210	4,40	22,06
18/06/19 11:40	Travée 5-6	0,20	0,89	120	3,85	14,69
18/06/19 11:50	Travée 5-6	0,30	0,87	135	x	5,50
18/06/19 13:45	Travée 5-6	0,30	0,79	120	3,60	6,97
18/06/19 14:00	Travée 5-6	0,20	0,95	130	5,90	7,49
18/06/19 14:45	Travée 5-6	0,20	0,81	120	4,65	10,92
18/06/19 15:00	Travée 5-6	0,30	0,83	120	4,70	10,53
18/06/19 15:15	Travée 5-6	0,30	0,85	120	5,35	10,53
18/06/19 15:35	Travée 5-6	0,20	0,84	120	5,25	8,68
18/06/19 16:00	Travée 5-6	0,20	0,93	130	5,55	7,29
18/06/19 16:15	Travée 5-6	0,36	0,99	120	3,90	7,06
18/06/19 16:35	Travée 5-6	0,36	1,03	130	5,50	13,81
18/06/19 16:45	Travée 5-6	0,20	0,97	120	5,70	14,96

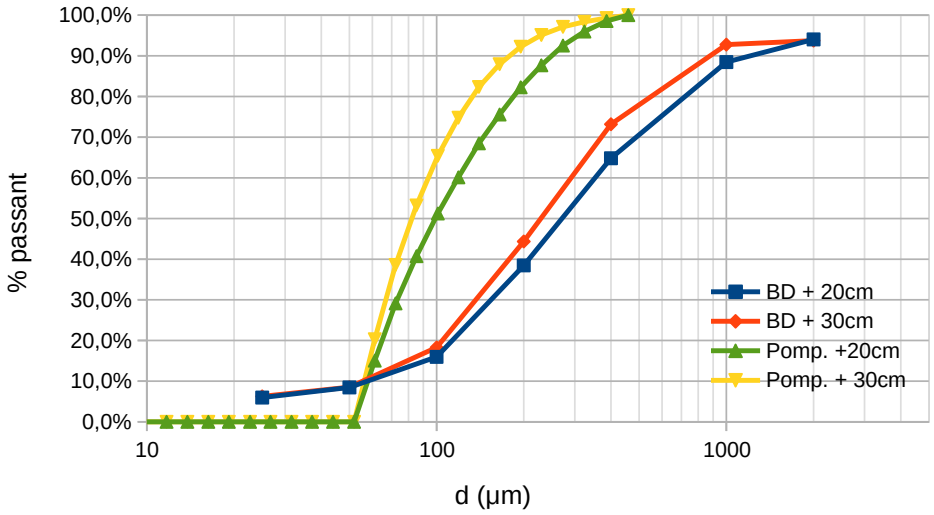


Figure 38 : Granulométrie des échantillons issus de la bouteille de Delft et issus du pompage.

5.4. Profil de concentration et de flux

5.4.1. Modèle théorique

La contrainte de cisaillement au fond peut être estimée simplement à partir de la vitesse moyennée sur la verticale selon l'équation suivante :

$$\tau = \rho C_D U^2 \qquad \textit{Eq. 15}$$

où C_D un coefficient de frottement ou de traînée :

$$C_D = \left[\frac{\kappa}{1+\ln\{k_s/(30h)\}}\right]^2 \qquad \textit{Eq. 16}$$

avec $\kappa = 0{,}41$ la constante de Von Karman et h le rayon hydraulique. Sur la base de la granulométrie du fond de l'Arc, nous avons pris $k_s \approx 2 d_{90} = 0.1\ \mathrm{m}$. Le paramètre de Shields peut ainsi être calculé :

$$\theta = \frac{\tau}{[\rho g (s-1) d_{50}]} \qquad \textit{Eq. 17}$$

L'estimation du transport solide pour les sables dans le chenal principal de l'Arc peut être modélisé d'une manière similaire à Camenen et al. (2014). Le transport solide par charriage et par suspension est calculé à l'aide des formules de Camenen & Larson (2005, 2008). Pour le transport solide par charriage, on a ainsi l'équation :

$$q_{sb,CL} = 12\sqrt{(s-1) g d_{50}^3}\, \theta^{3/2} \exp\left(-4.5 \frac{\theta_{cr}}{\theta}\right) \qquad \text{Eq. 18}$$

où q_{sb} est le flux solide charrié unitaire (par unité de largeur) [m³/s/m], θ le paramètre de Shields de peau, et θ_{cr} est le paramètre de Shields critique.
Pour la suspension graduée, on utilise de même :

$$q_{ss}=V\,c_R\frac{\epsilon_s}{W_s}\left[1-\exp\left(\frac{-W_s}{\epsilon_s R_h}\right)\right] \qquad \text{Eq. 19}$$

où q_{ss} est le flux solide par suspension unitaire [m³/s/m], c_R la concentration de référence, ϵ_s la diffusion sédimentaire verticale, et W_s la vitesse de chute du sédiment. La concentration de référence se calcule comme pour le charriage avec le paramètre de Shields de peau :

$$c_R=1.5\times10^{-3}\exp(-0.2\,d_*)\,\theta\exp\left(-4.5\frac{\theta_{cr}}{\theta}\right) \qquad \text{Eq. 20}$$

avec $d_*=[(s-1)g/\nu^2]^{1/3}d_{50}$ le diamètre sédimentologique ($\nu\approx10^{-6}$ m²/s est la viscosité cinématique de l'eau). Le coefficient de diffusion sédimentaire vertical ϵ_s s'estime à partir du paramètre de Shields de forme ($\theta_t=u_{*t}^2/[g(s-1)d_{50}]$) :

$$\epsilon_s=\frac{\kappa}{6}u_{*t}h \qquad \text{Eq. 21}$$

5.4.2. Comparaison entre le modèle et les points expérimentaux

Les Figures 39 et 40 présentent l'ensemble des résultats expérimentaux comparés au modèle numérique avec différentes hypothèses de composition du fond de la rivière en sable (10 %, 20 % et 50%). Les concentrations $C(z)$ mesurées avec la pompe peuvent être transformées en flux $\Phi(z)$ et inversement les flux mesurés avec la bouteille transformés en concentrations en connaissant la vitesse locale $u(z)$:

$$\Phi(z)=C(z)u(z) \qquad \text{Eq. 22}$$

Les résultats avec la bouteille et Delft et le système de pompage peuvent ainsi être comparés en terme de flux (Figure 40). Si on observe le plus souvent des valeurs plus grandes pour la bouteille de Delft par rapport au système de pompage (ce qui est globalement contraire à la théorie car la vitesse du prélèvement par pompage est beaucoup plus faible que la vitesse de l'écoulement, cf. Figure 12), les résultats sont globalement assez cohérents entre les deux système de mesure. Ces différences peuvent aussi être liées à la granulométrie récupérée, le système de pompage ne permettant pas, a priori, d'échantillonner les sables les plus grossiers. Nous sommes toutefois étonné par ce résultat car la vitesse de pompage reste bien supérieure à la vitesse de chute des sables grossiers et nous avons à chaque essai bien attendu qu'un équilibre soit atteint avant d'échantillonner.
On peut s'apercevoir qu'en prenant le coefficient $\alpha_s=0{,}5$, le modèle donne la bonne tendance par rapport aux points expérimentaux (Figures 39 et 40). Il est aussi intéressant de noter que le point de mesure pris la veille (pour $Q\approx50\,\mathrm{m^3/s}$) $\alpha_s=0{,}1$ indique que, pour une période hors chasse, la composition du fond inclut beaucoup moins de sable (un facteur 10 plus faible). Ceci peut-être expliqué par les apports de sable liés à la chasse mais aussi par de potentielles reprises de sédiments sableux sur les bancs de graviers pour des débits $Q>75\,\mathrm{m^3/s}$ (Jaballah et al., 2015).

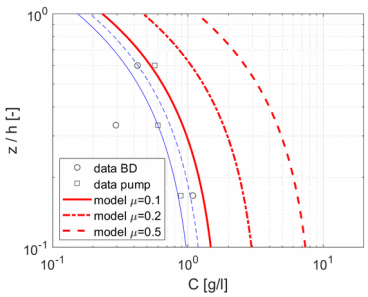
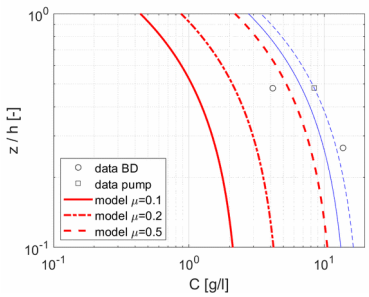
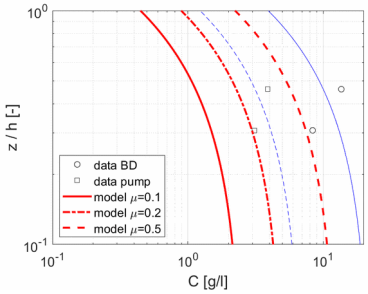
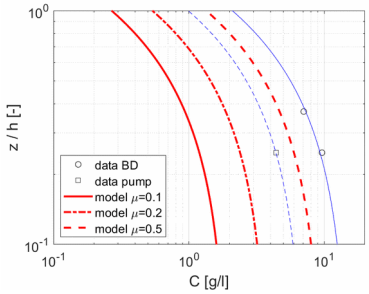
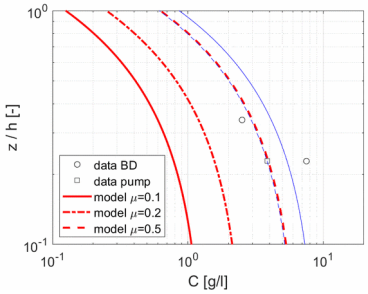
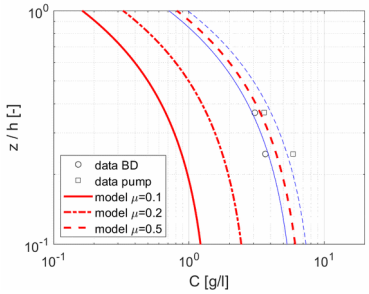
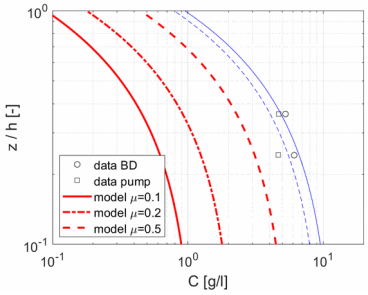
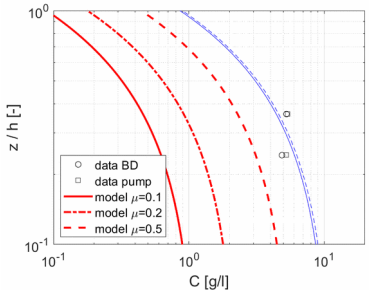
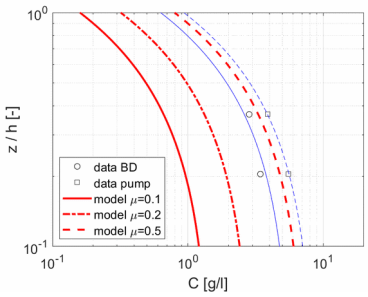
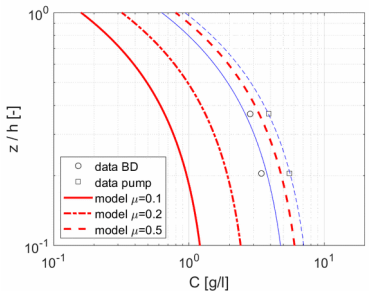
17/06 16h00		18/06 9h00	
18/06 10h00		18/06 11h00	
18/06 11h45		18/06 14h00	
18/06 15h00		18/06 15h30	
18/06 16h10		18/06 16h40	

Figure 39 : Concentrations mesurées avec la pompe et indirectement avec la bouteille de Delft et modélisées en fonction des conditions hydrauliques pendant la chasse de l'Arc (en bleu figurent les ajustements exponentiels aux données expérimentales).

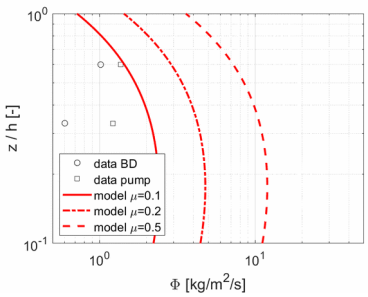
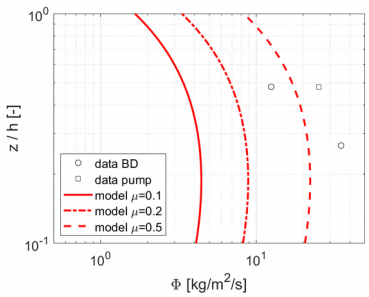
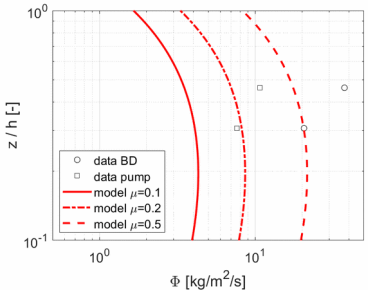
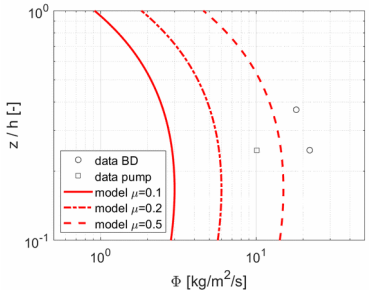
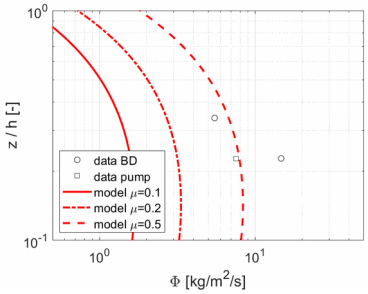
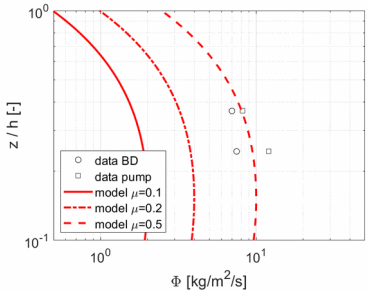
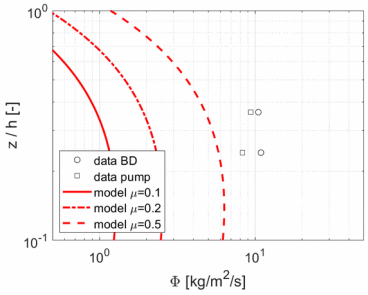
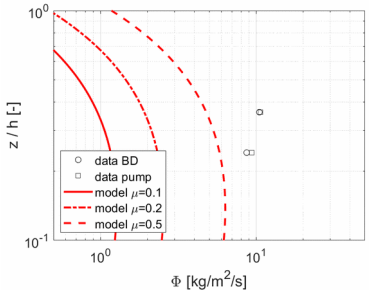
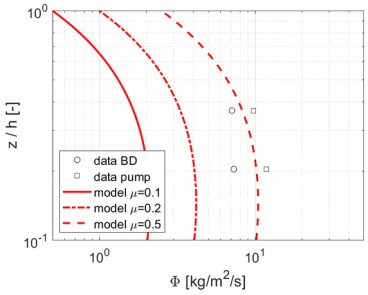
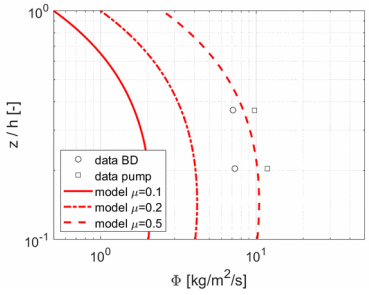
17/06 16h00		18/06 9h00	
18/06 10h00		18/06 11h00	
18/06 11h45		18/06 14h00	
18/06 15h00		18/06 15h30	
18/06 16h10		18/06 16h40	

Figure 40 : Flux mesurés avec la bouteille de Delft et indirectement avec la pompe et modélisés en fonction des conditions hydrauliques pendant la chasse de l'Arc

5.5. Estimation des flux de sable lors de la chasse

5.5.1. Courbe de tarage sédimentaire

Les résultats présentés en Fig. 39 et 40 nous ont permis de calculer le flux total sur la section de l'Arc pour 9 points en chasse et un point hors chasse. Du fait du nombre relativement limité de points expérimentaux sur la verticale. Nous avons fait l'hypothèse que l'Eq. 21 donne une bonne approximation de la valeur réelle de la diffusion verticale, seule la concentration au fond a été calée sur les données expérimentales, nous permettant ainsi d'avoir une estimation du profil de concentration expérimental. Au final, le flux total sur la section s'exprime tel que :

$$Q_{ss} = L_a \rho_s q_{ss} \qquad \text{Eq. 23}$$

avec dans notre cas, $q_{ss} = \int_0^h C_{\exp}(z) u(z) dz$ où $u(z)$ est la vitesse de l'écoulement au niveau z au-dessus du fond estimée selon le profil logarithmique et les mesures de vitesse de surface.

Sachant que nous n'avons eu la possibilité de faire qu'une unique verticale sur la section de mesure, l'application de l'Eq. 23 implique une forte hypothèse sur l'absence de variabilité latérale du transport solide sur la section.

La courbe de tarage sédimentaire se base du point de vue hydraulique sur les travaux de Camenen et al. (2012) réalisés sur la même section, et d'un point de vue sédimentaire sur les développements semi-empiriques présentés en section 5.4.1. On peut s'apercevoir qu'en prenant le coefficient $\alpha_s = 0{,}7$, le modèle donne la bonne tendance par rapport aux points expérimentaux (Figure 41). Si ce coefficient est supposé théoriquement représenter le taux de sable composant le fond, il faut cependant avoir en tête que le calage inclut aussi l'incertitude (erreur) liée au modèle semi-empirique. En effet, la composition en sable du lit de l'Arc, même en surface, même lors de la chasse, est a priori inférieure à cette valeur.

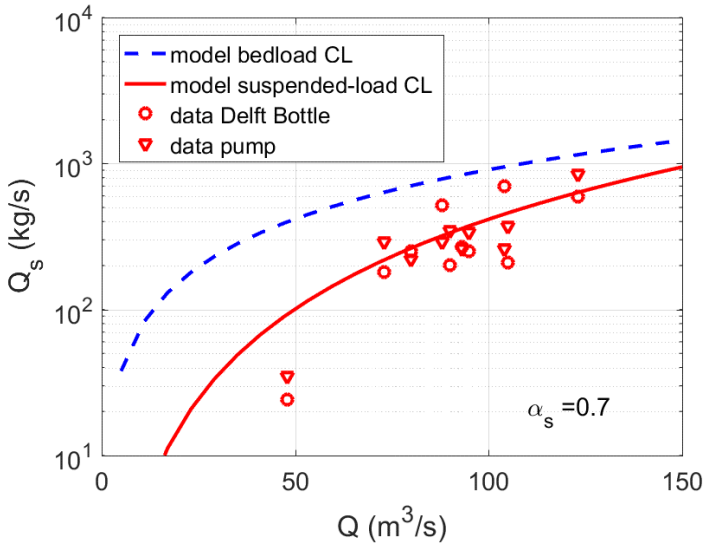


Figure 41 : Courbe de tarage hydro-sédimentaire sur la section de St-Etienne-de-Cuines

Enfin, le modèle de charriage (Camenen & Larson, 20005) pour ce cas très rugueux ($k_s = 0{,}2\,\mathrm{m}$) prédit des valeurs supérieures à celles du transport par suspension. Il est cependant très difficile de valider ces résultats pour ce cas particulier d'autant plus que la limite charriage-suspension est ici très difficile à définir...

5.5.2. Bilan pour la chasse de l'Arc du 18 juin 2019

A partir de la courbe de tarage présentée ci-dessus et de la chronique des débits lors de la chasse de l'Arc (Figure 33), il est donc possible d'estimer les flux de sable en suspension ayant transité à St-Etienne-de-Cuines lors de la chasse de l'Arc du 18 juin 2019 (Figure 42). On obtient alors un flux total sur l'ensemble de l'événement (limité entre 7h et 21h) égal à $\Phi_{ss}(chasse) = 1{,}95 \times 10^7\,\mathrm{kg}$ ou $\Phi_{ss}(chasse) = 1{,}95\,10^4\,\mathrm{tonnes}$, soit du même ordre de grandeur que les flux de MES (suspension de lessivage) qui a été estimé à $V_{chasse} = 2{,}7 \times 10^4$ tonnes (paragraphe 5.2).

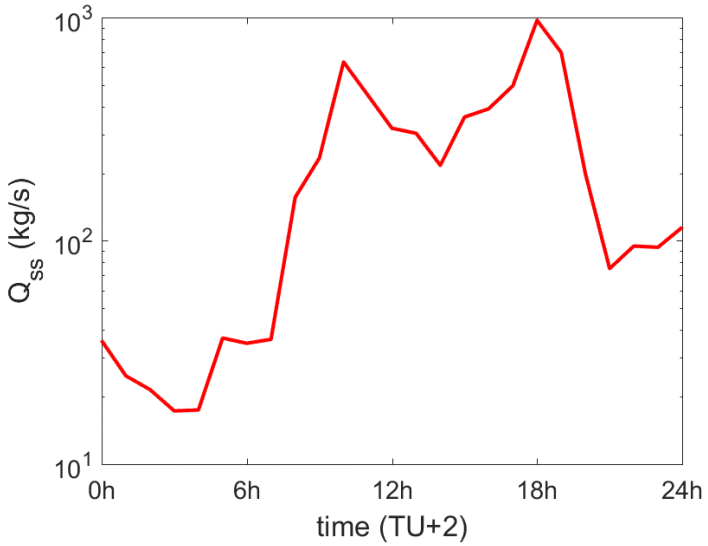


Figure 42 : Estimation du flux solide sableux lors de la chasse de l'Arc du 18 juin 2019 sur la section de St-Etienne-de-Cuines

6. Estimation de la dynamique des dépôts sur un banc de galet par analyse d'image

6.1. Analyse d'image du banc de galet

6.1.1. Système de prise de photo depuis la berge

Le système de prise de photo est installé sur le site de Sainte-Marie-de-Cuines. Il est composé de deux caméras photographiques, installées en hauteur sur la rive gauche de l'Arc, visant une partie du banc de galet étudié (Figure 43). Ce système a été mis en route en mai 2017, et fonctionne depuis sans discontinuer depuis, en complète autonomie, à l'exception de quelques courtes interruptions dues à l'arrêt des batteries alimentant ces caméras.

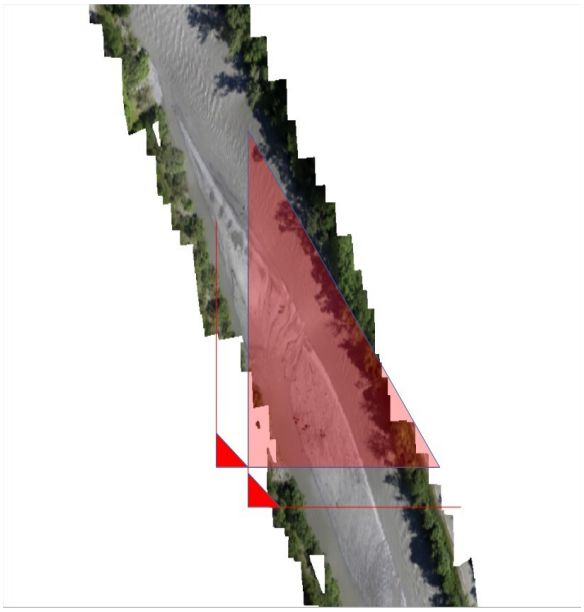


Figure 43 : Vue schématique de la disposition des caméras et de leur champ de vue

Ces deux caméras ont un dispositif de déclenchement automatique. Nous avons choisi les heures de prises de vue de manière à synchroniser les caméras, ce qui est le cas à quelques minutes près. Cet écart est suffisamment faible pour considérer que aucune évolution ne se produit sur le banc, ni en terme d'évolution de la hauteur d'eau, ni en terme de position des sédiments. Ainsi, le système utilisé est un véritable ensemble stéréoscopique, permettant par exemple de produire un MNT du banc. Une paire d'images stéréoscopiques est montré Figure 44.

Les prises de vues ont lieu tous les jours, deux fois, ce qui permet d'avoir des conditions d'éclairement (position du soleil, ennuagement) différentes, et de pouvoir observer en continu le banc au fil du temps. Les caméras sont positionnées en haut de berge, sur des troncs d'arbres de manière à augmenter l'angle de visée du banc et d'éviter un angle trop rasant.

(a) (b)

Figure 44 : Paire d'images prises par le système stéréoscopique

6.1.2. Analyse d'image réalisée

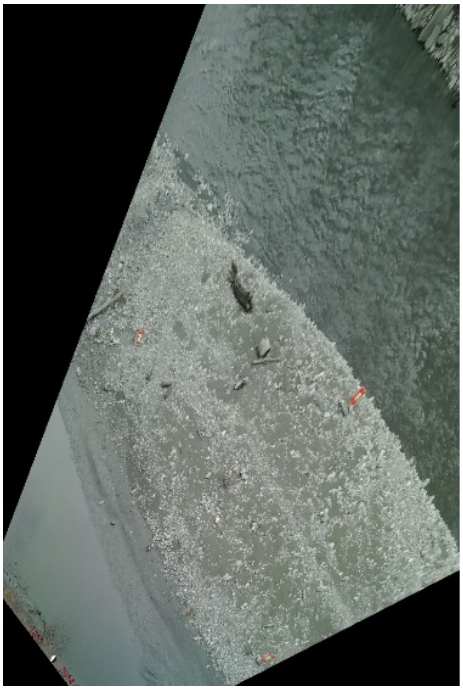
Avant tout, les paramètres optiques de la caméra doivent être connus (longueur focale, distorsion). Ces paramètres ont été déterminés pour chacune des caméras par un précédé de calibration classique.

La méthode d'analyse proposée se déroule en quatre étapes successives :

- Tout d'abord la caméra est géoréférencée précisément. Cette étape doit être renouvelée pour chaque prise de vue utilisée. En effet, la caméra est fixée à un tronc d'arbre, en hauteur, et elle subit donc des mouvements dès qu'il y a du vent dans la vallée. Le déplacement reste assez limité (quelques centimètres au maximum) mais l'écart angulaire est un paramètre sensible, et le déplacement apparent dans l'image de points sur le banc peut se monter en centaines de pixels. Quelques mires dans le champ de vue de la caméra permettent de réaliser cette première étape.
- Ensuite, une orthorectification de l'image dans le plan horizontal du banc est pratiquée (voir le résultat Figure 45 a).
- La troisième étape consiste en une délimitation du banc, afin d'éliminer les régions constituées d'eau, de végétation, de la berge opposée, … Il est assez aisé de la réaliser manuellement, à partir de l'orthoimage précédemment calculée. Une méthode automatique a été développée, un exemple de résultat est montré Figure 45. Les résultats de la méthode ont été comparés à des segmentations manuelles de bancs sur 22 images représentatives de la variabilité du paysage (éclairement, débit). Le taux de sur-détection moyen est de 2,86 %, le taux de sous-détection moyen est de 8,36 %. Cette sous-détection reste modérée, elle correspond à des sédiments fins sur le côté gauche du banc, le long du chenal secondaire.
- Enfin, la dernière étape est la détection des sédiments fins à l'intérieur du banc précédemment détecté. L'algorithme de cette segmentation se décompose en trois temps. Dans un premier temps, la méthode permet de mettre en évidence les zones de forte texture dans l'image. L'intensité de l'image est passée dans le domaine fréquentiel par une transformée de Fourier afin d'utiliser un filtre passe-haut, puis on revient dans le domaine spatial par la transformée inverse. Le deuxième temps caractérise les zones de sédiments fins. On utilise la technique de clustering K-means sur la partie de l'image appartenant au

banc. L'avantage de cette technique est sa robustesse aux changements entre prises de vue (humidité du banc, taux de sédiments fins, surface émergée, …). Le dernier temps consiste en des opérations de nettoyage pour enlever des pixels isolés et ainsi créer des zones plus homogènes.

(a) Orthoimage



(b) Masque du banc obtenu

Figure 45 : Résultat de la segmentation automatique de l'emprise du banc

Les étapes décrites ci-dessus ont été implémentées dans une extension pour le logiciel QGIS, afin de rendre plus simple l'utilisation de ce code par des utilisateurs profanes en traitement d'image ou utilisant des systèmes d'exploitation différents. La méthode est nommée DeFI (pour **Dé**pots de sédiments **F**ins par analyse d'**I**mages ;Pénard et al., 2019).

6.2. Dynamique des dépôts de surface sur le banc suite à la chasse du 18 juin 2019

La méthodologie précédente a été appliquée aux images avant et après la chasse de juin 2019. Les images choisies l'ont été pour leurs caractéristiques : débit, heure et ensoleillement les plus proches possible. Elles ont été prises respectivement le 13 juin à 15h30 et le 20 juin à 14h (Figure 46).

(a) Image avant chasse (b) Image après chasse

Figure 46 : Images du banc (a) avant chasse et (b) après.

Dans chacun des deux cas, la caméra a été géoréférencée, et les images orthorectifiées permettant une analyse comparative des deux états (Figure 47).

(a) Orthoimage avant chasse (b) Orthoimage après chasse

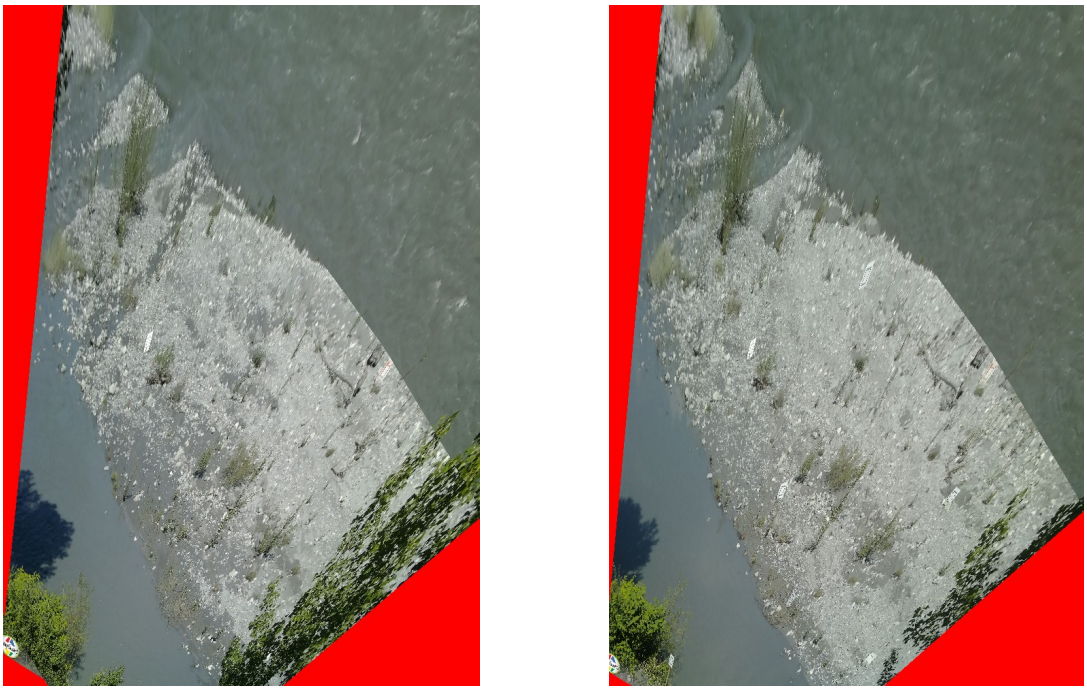


Figure 47 : Images orthorectifiées du banc (a) avant chasse et (b) après.

La segmentation du banc a été faite manuellement pour limiter les quelques pourcents d'erreur de la méthode automatique. Ensuite, la méthode DeFI a été appliquée sur ces deux images. La Figure 48 montre les résultats obtenus.

(a) Avant chasse (b) Après chasse

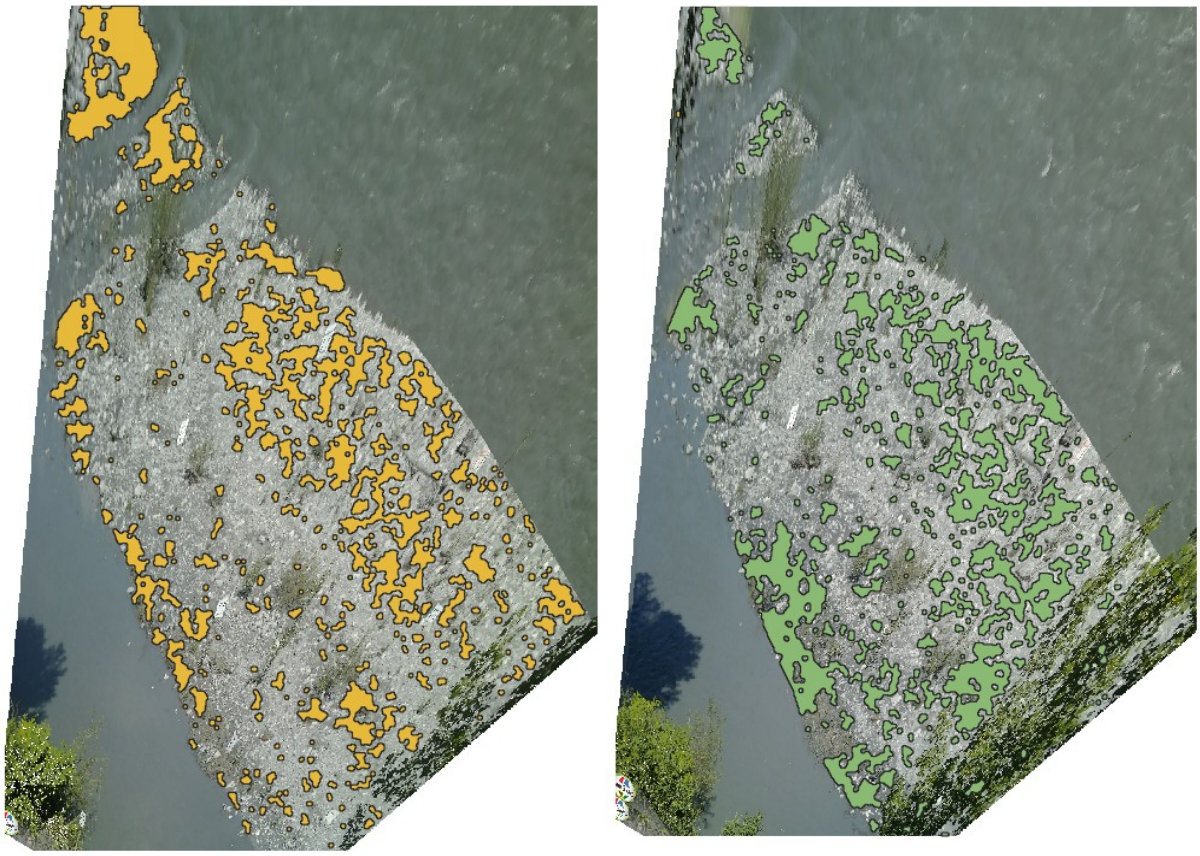


Figure 48 : Résultats de la détection des sédiments fins par la méthode DeFI.

Les résultats montrent que la répartition des sédiments fins à la surface a légèrement varié. Globalement, la surface de fines a diminué, passant de 213 m² à 180 m². En détail, on peut surtout noter cette diminution sur une grande partie du banc, à l'exception des zones les plus en aval où la surface a augmenté. La Figure 49 donne une vue plus détaillée de l'évolution de la répartition des fines en surface. La surface commune aux deux dates en sédiments fins, en rouge clair sur la figure, est de 78 m² (soit seulement 37 % de la surface de fines avant chasse). Les sédiments fins disparus (en blanc) représentent 134 m² (soit 63 % de la surface de fines avant chasse) et les nouvelles zones de sédiments fins 101 m² (rouge sombre). Il est aussi important d'avoir en tête que cette étude ne prend pas en compte les épaisseurs des dépôts qui peuvent varier avant et après la chasse (souvent plus épais juste après un événement).

Un des points importants est celui de la présence accrue de végétation sur le banc, en comparaison avec les années d'observation précédentes. Cette végétation masque les sédiments placés derrière par rapport à la caméra et perturbe l'algorithme de détection en créant des ruptures (des contours dans l'image) qui ne sont pas dues aux sédiments. L'élagage de l'arbre situé à droite de l'image de départ (en bas à droite sur l'orthoimage) au moment de la chasse dégage la vue de la caméra sur le banc dans cette zone, c'est pourquoi davantage de sédiments fins y sont détectés.

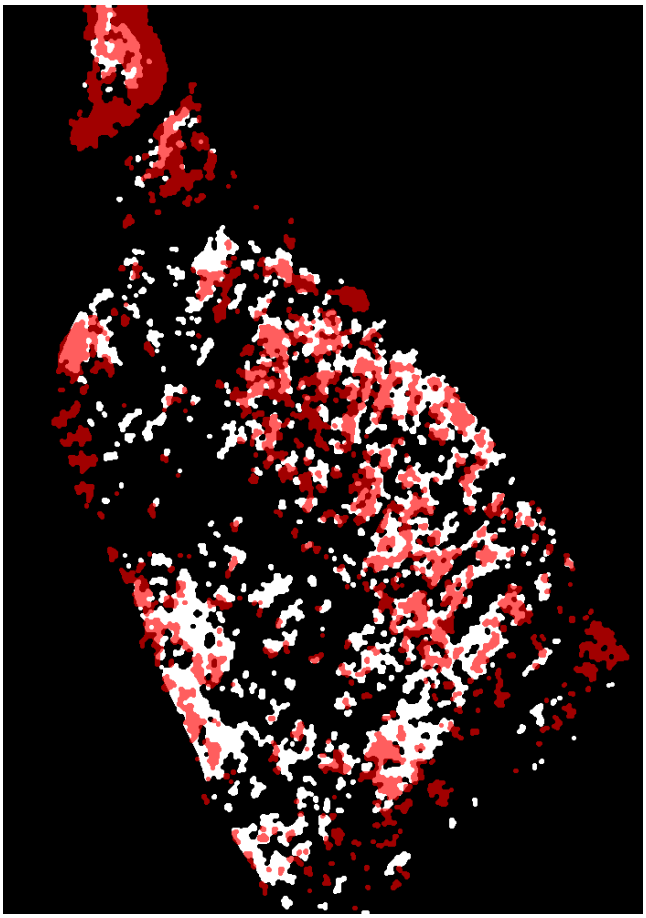
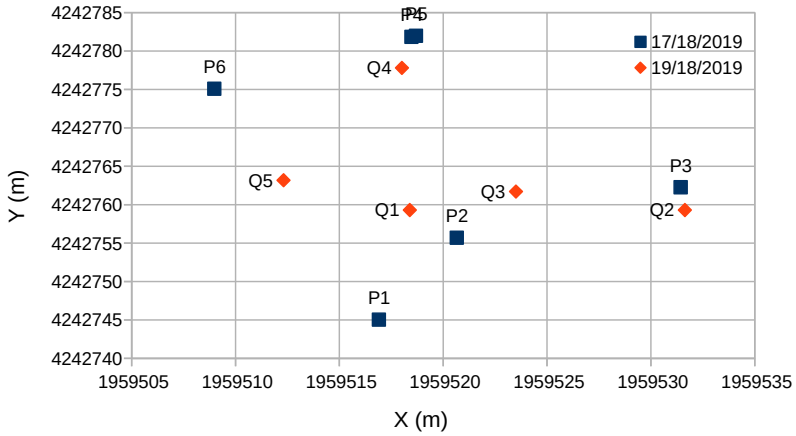


Figure 49 : Evolution des sédiments fins en surface pendant la chasse. Blanc : uniquement avant, rouge clair : avant et après, rouge foncé : uniquement après, noir : pas de sédiments fins

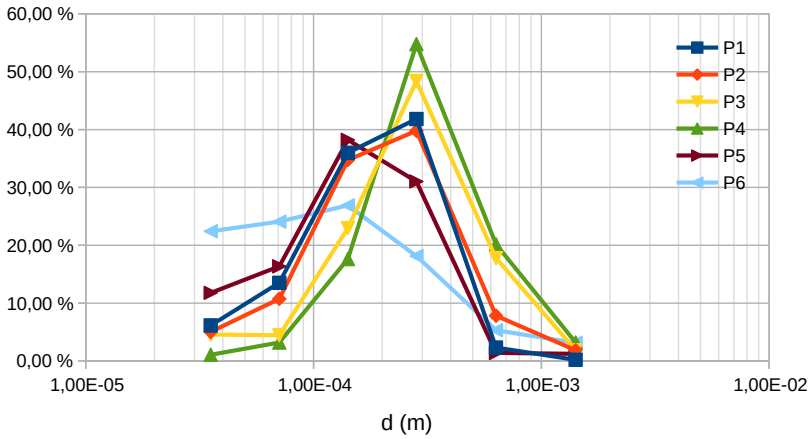
6.3. Granulométrie de surface du banc avant et après la chasse

Nous avons aussi effectué des granulométrie de dépôts de surface en plusieurs positions sur la banc de l'Arc étudié, ceci avant la chasse (17/06/2019) et après la chasse (19/06/2019). Ces positions sont présentés Figure 50a. Les granulométrie avant et après la chasse sont données Figure 50b et c. Elles ont été réalisées avec la colonne de tamis (0,05, 0,1, 0.2, 0.4 et 1 mm). On peut observer une certaine homogénéité des granulométrie de ces dépôts avec un mode prédominant à 250-300 µm. Pour les échantillons avant la chasse on retrouve toutefois un second mode à 150 µm et une présence de fine plus homogène. Les échantillons P1 et P5 situé en bord de chenal secondaire ont une proportion en fine non-négligeable mais pas vraiment différente des autres échantillons sur le banc. A près la chasse, à part pour l'échantillon Q2 incluant ce second mode sableux et l'échantillon Q4 contenant beaucoup de fines, les échantillons contiennent globalement moins de fines (<200 µm). Inversement, l'échantillon Q3 contient plus de sables grossiers. Ceci est cependant plus lié au choix du dépôt où le prélèvement a été fait qu'à l'influence de la chasse sur le mélange ; les échantillons ont en effet pas été prix aux mêmes points avant et après l'événement.

(a)



(b)



(c)

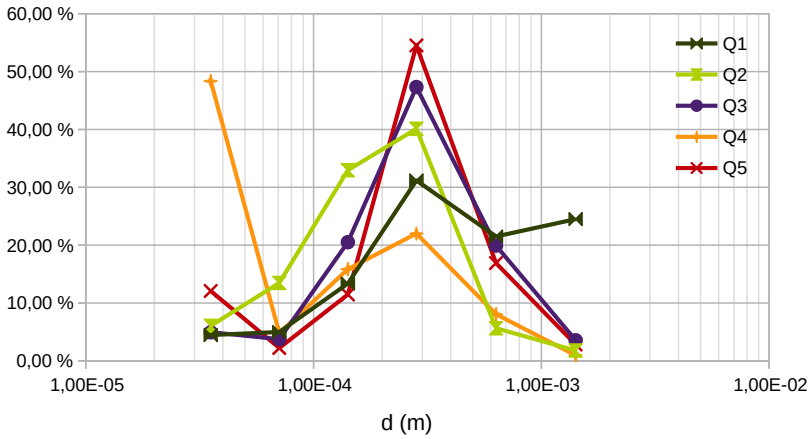


Figure 50 : Granulométrie de dépôts de fines sur le banc de l'Arc à Ste-Marie-de-Cuines : (a) positions des échantillons, (b) 17 juin 2019 et (b) 19 juin 2019.

7. Conclusions et perspectives

7.1. Flux de sable sur l'Arc et l'Isère

Même si les mesures et les estimations de volume cumulé restent très incertaines, nous avons pu montré que les flux de sables peuvent être très élevés au moins en période de chasse de barrage où ces flux seraient du même ordre de grandeur que les flux en MES (suspension de lessivage). La principale inconnue reste les stocks de sable disponibles et remobilisables. Notre principale hypothèse actuelle est que ces derniers sont importants dans les retenues de barrage et remobilisables lorsque les barrages sont ouverts. En dehors des périodes de chasse ou de crue (où les barrages sont ouverts et donc où les stocks de sable peuvent être libérés), il est clair que la capacité de transport n'est pas atteinte, le fond des chenaux étant principalement constitué de graviers (chenaux secondaire) ou galets (chenaux principaux). Cependant, les mesures sur le chenal de Fréterive indiquent la présence d'un transport de sable pouvant à terme expliquer certains dépôts en aval du chenal. Les dépôts sur le banc ne peuvent par contre être expliqués que par les événements de crue/chasse où le banc est inondé mais les vitesses (et donc les profondeurs d'eau) restent faibles, soit pour des événements moyens ou en descente de crue pour des événements forts.
Lors de ces expériences, nous avons pu tester un système de prélèvement par pompage à l'aide d'une pompe péristaltique. Même si les résultats sont globalement positifs (rapidité de prélèvement, qualité des échantillons), un biais non négligeable reste la difficulté pour ces pompes d'atteindre des fortes vitesses pour des hauteurs de charges élevées, ne permettant pas d'avoir des prélèvements iso-cinétiques pour les fortes vitesses d'écoulement. Ceci peut impacter qualitativement et quantitativement l'échantillonnage. De nouveaux essais seront nécessaires pour valider complètement cette méthode, en particuliers pour proposer un abaque permettant de corriger les données lors que le prélèvement n'est pas iso-cinétique. Ceci pourra se faire dans un environnement contrôlé avec l'utilisation d'un banc de mesure construit par la CNR (Cacoh) où nous avons déjà pu faire quelques tests..

7.2. Dynamique sédimentaire dans la Combe de Savoie

L'année hydrologique 2019 a été assez faible avec peu d'événements (au moins pour les 8 premiers mois) et pas assez de débit pour déclencher une chasse du barrage d'Aigueblanche. Les flux de MES mesurés à Pont-de-Grésy restent globalement faibles , en particuliers par rapport à 2018. Nous avons observé cependant une avancée du banc de Fréterive qui apparaît comme un des bancs les plus dynamiques du système restauré de la Combe de Savoie (Loire, 2019).
L'étude des flux sur le tronçon de Pont-de-Grésy à Fréterive par l'intermédiaire de stations hydro-sédimentaire n'a fait que relever des tendances très incertaines d'érosion ou dépôt. Par contre, nous n'avons pas observé d'évolution notable des dépôts sur le banc, que ce soit au niveau quantitatif (surface et épaisseur des dépôts) ni qualitative (granulométrie). On note cependant une certaine expansion de la végétation pionnière sans qu'elle soit toutefois clairement établie sur le long terme. Même si la procédure proposée semble prometteuse, il sera nécessaire de mettre plus de moyen à l'avenir pour être plus confiant sur les résultats :

- mise en place des expérimentations plus précoce afin de résoudre les possibles problèmes avant la période d'étude et éviter des trous dans les chroniques de mesure ;

- avoir un suivi plus dense de prélèvements (concentrations, granulos) pour le calage des turbidimètres ;
- faire aussi des mesures de débits (chenaux principal et secondaire).

7.3. Dynamique des dépôts de fines sur un banc de galet

L'étude des dépôts par analyse a montré tout l'intérêt de cette méthode pour comprendre la dynamique des dépôts suite à un événement et plus généralement dans le temps. La chasse des barrages de l'Arc-en-Maurienne de 2019 n'a que très peu impacté la surface totale de dépôts de fines sur le banc de galets étudié ; on note cependant une certaine variabilité de la position de ces dépôts, indiquant la forte dynamique pendant l'événement. Une analyse complémentaire de la granulométrie de ces dépôts confirme la relative homogénéité de ces dépôts, constitués essentiellement de sable avec un mode prédominant à 250-300 µm avec une part plus ou moins grande de limons selon la position. Des analyses complémentaires sont en cours avec la thèse de Junjian Deng sur l'impact d'autres événements ainsi que sur l'impact de la météo (pluie, vent) sur la répartition de ces dépôts.

8. Références

Antoine, G. (2013). *Dynamique des matériaux en suspension le long de rivières aménagées de montagne. Exemple de l'Arc en Maurienne et de l'Isère*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble, France. 282 p.

Antoine G., Jodeau M., Camenen B., Esteves M., Nemery J. & Lauters F. (2013). *Estimation des flux de matières en suspension lors des chasses hydrauliques de l'Arc de 2006 à 2011.* La Houille Blanche, 4:43-49.

Camenen, B. (2007). *A simple and general formula for the settling velocity of particules in suspension*. J. Hydraulic Eng. 133(2), 229–233.

Camenen, B., Buffet, A., Dramais, G., Pénard, L., Thollet, F., Lagouy, M., Le Bescond, C, Lacroix, F. & Berni, C. (2017). Expérience de terrain lors de la chasse de l'Arc (1er juin 2017) pour l'estimation de la dynamique sédimentaire. Rapport Isrtea-EDF ; 58 p.

Camenen, B., Buffet, A., Thollet, F., Lacroix, F., Liger, L. & Pénard, L. (2018a). Expérience de terrain lors de la chasse de la retenue d'Aigueblanche sur l'Isère (6 au 10 mai 2018) pour l'estimation de la dynamique des particules sableuses. Rapport Irstea-EDF ; 53 p.

Camenen, B., Holubová, K., Lukac, M., Le Coz, J. & Paquier, A. (2011). *Assessment of methods used in 1D models for computing bedload transport in a large river: the Danube River in Slovakia.* J. Hydraulic Eng., 2011 , 137 , 1190-1199

Camenen, B., Jaballah, M., Geay, T., Belleudy, P ., Laronne, J.B., & Laskowski, J.P. (2012). *Tentative measurements of bedload transport in an energetic alpine gravel bed river.* River Flow, San Jose, Costa Rica, Sept. 2012. pp. 379-386.

Camenen, B. & Larson, M. (2005). A bedload sediment transport formula for the nearshore Estuarine, Coastal & Shelf Science, 63: 249-260.

Camenen, B. & Larson M. (2008). *A general formula for noncohesive suspended sediment transport*. J. Coastal Res. 24(3), 615–627.

Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Peteuil, C., Fretaud, T., Falgon, A., Dussouillez, P. & Moore, S. A. (2014). A simple physically-based model for predicting sand transport dynamics in the Lower Mekong River River Flow, Proc. 7th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Schleiss, A. J.; de Cesare, G.; Franca, M. J. & Pfister, M. (Eds.), pp. 2189-2197.

Camenen, B., Thollet, F., Buffet, A., Dramais, G., Le Bescond, C. & Lagouy, M. (2018b). Estimation of sand suspension in a secondary channel of an alpine river. River Flow, Proc. 9th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Lyon, France, Sept. 2018.

Carlier, M. (1986). Hydraulique générale et appliquée. Edition Eyrolles 570 p.

Cellino, M., & Lemmin, U. (2004). *Influence of coherent flow structures on the dynamics of suspended sediment transport in open-channel flow*. J. Hydraulic Eng. 130(11):1077-1088.

Colebrook, C.F., White, C.M. (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 367-381.

Darcy, H. (1857). *Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux*. Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 367-381.

De Angelis (2019). *Validation d'une mesure de la suspension de sable par pompage.* Rapport stage PFE, Irstea-ENSE3, 48 p.

Dramais, G., Camenen B. & Le Coz, J. (2018). *Comparaisons de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable. Accepté pour publication dans* La Houille Blanche.

Durán, O., Claudin, P. & Andreotti, B. (2011). O*n aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws.* Aeolian Research 3:243-270.

Gray, J.R. & Landers, M. (2014). Measuring suspended sediment. Comprehensive water Quality and Purification. 159-204.

Hamm, N. T.; Dade, W. B. & Renshaw, C. E. (2011) *Fine particle deposition to porous beds*. Water Resources Res., 47(W11508) :1-13.

Jaballah, M. (2013). *Alternate bar morphodynamics in an engineered mountainous river [Morphodynamique des bancs alternés d'une rivière de montagne aménagée].* Université C. Bernard, Lyon 1.

Jaballah, M.; Camenen, B. & Paquier, A. (2015). *Alternate bar development in an alpine river following engineering works.* Advances in Water Resources, 81 : 103-113

Jodeau, M. (2007). *Morphodynamique d'un banc de galets en rivière aménagée lors de crues.* Université Claude Bernard, Lyon 1.

Jourdain, C. (2017a). *Action des crues sur la dynamique sédimentaire et végétale dans un lit de rivière à galets: l'Isère en Combe de Savoie*. Université de Grenoble-Alpes.

Jourdain, C.; Belleudy, P.; Tal, M. & Malavoi, J.-R. (2017b). *Le rôle de l'hydrologie sur la destruction de la végétation dans le lit d'une rivière à galets aménagée : l'Isère en Combe de Savoie.* Géomorphologie : relief, processus, environnement, 23 : 203-217.

Launay, M. (2014). *Flux de contaminants particulaires dans un grand cours d'eau anthropisé : dynamique des PCB et du mercure transportés par les matières en suspension du Rhône, du Léman à la Méditerranée*. Université Claude Bernard, Lyon 1.

Laperrousaz E. (2016). Proposition d'adaptation de l'hydrogramme des chasses de l'Arc. Rapport EDF-CIH, 15 p.

Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G. & Camenen, B. (2010). *Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers.* J. Hydrology, 394, 42-52

Lisle, T. E. and S. Hilton (1992). *The volume of fine sediment in pools: an index of sediment supply in gravel-bed streams*. Water Resources Bulletin 28(2), 371–383.

Loire, R. (2019). *Les lâchers morphogènes : définition, expérimentations et protocole opérationnel de mise en oeuvre* . École doctorale Sciences sociales de Lyon, ENS Lyon.

Pénard, L., Drevet, T. & Camenen, B. (2019). *Estimation de la dynamique d'érosion-reprise des sédiments fins sur les bancs de galets de l'Arc : une approche par traitement d'image.* Rapport technique AERMC/Irstea.

Pénard, L., Drevet, T., Vergne, T., Deng, J. & Camenen, B. (2019). Image-based fine sediment detection on gravel bars surface. Proc. RCEM, Nov. 2019, Auckland, Nouvelle Zélande.

Recking, A., Regazzoni, M., Lauters, F., Zanker, S., Geay, T., Camenen, B., Brunet, L., & Fontaine, F. (2020). *Measurement of sand transport with a submerged pump: presentation of the results of a test campaign carried out on the Isère River in July 2019*. abstract River Flow conf., Delft, Pays-Bas.

Sabol, T.A., Topping, D.J., Griffiths, R.E. (2010). *Field evaluation of sediment-concentration errors arising from non-isokinetic intake efficiency in depth-integrating suspended-sediment bag samplers.* Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas. 12 p.

Shields, A. (1936). *Anwendung der Ähnlichkeits-Mechanik und der Turbulenzforschung auf die Geshiebebewegung [Application des principes de similitude et de la recherche en turbulence au transport par charriage].* Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, 1936, 26.

Soulsby, R. L. (1997). *Dynamics of marine sands, a manual for practical applications.* Thomas Telford.

Soulsby, R. L. & Whitehouse, R. J. S. W. (1997). *Threshold of sediment motion in coastal environment.* Proc. Pacific Coasts and Ports'97 Conf., University of Canterbury, pp. 149-154

Thollet F., Le Coz J., Antoine G., François P. , Saguintaah L., Launay M. & Camenen B. (2013). *Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau.* La Houille Blanche, 4:50-56.

van Rijn, L. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications.